



# ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉ : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE

Donatien René Riantsoa

## ► To cite this version:

Donatien René Riantsoa. ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉ : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE. Eco-conception. Université d'Antananarivo, 2020. Français. <NNT : >. <tel-03165144>

**HAL Id: tel-03165144**

**<https://hal.science/tel-03165144v1>**

Submitted on 10 Mar 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.



HAL Authorization



## THÈSE

En vue de l'obtention du  
DIPLOME DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ  
D'ANTANANARIVO



Spécialité : TECHNOLOGIE DES POUDRES DIVISÉES ET ÉCOBÂTIMENTS

Thème :

# **« ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉ : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE »**

Présenté et soutenu publiquement par :

**RIANTSOA Donatien René**

Le 10 novembre 2020

Devant les membres du jury composé par :

Président : RANDRIANJA Roger, Professeur Titulaire

Directeur de Thèse : RAKOTONINDRAINY, Professeur Titulaire

Rapporteur externe : RAKOTOMAHEVITRA Andrianelison, Professeur Titulaire

Rapporteur interne : RAHELIARILALAO Bienvenue, Professeur Titulaire

Examineurs : - RAKOTOMALALA Jean Lalaina, Professeur Titulaire

- RAZAFINJATO Victor, Professeur Titulaire

## **DÉDICACES**

**Pour témoigner la Gratitude et l'Honneur du Dieu Tout Puissant,**

**Je dédie ce résultat de mon Effort personnel, particulièrement :**

**À l'âme ma Mère † ;**

**À toute ma Famille ;**

**À ma Femme ;**

**À mes Enfants ;**

**Aux amis qui me restent fidèles ;**

**Et à ceux qui m'ont soutenu moralement de loin ou de près.**

## REMERCIEMENT

Tout d'abord, je tiens à remercier le Dieu tout puissant de m'avoir écouté, fourni la santé, l'énergie, ainsi que du courage dans la réalisation de mon objectif personnel. Ensuite, j'adresse mes sincères remerciements et hautes considérations aux personnes qui m'aident et facilitent le processus de réalisation de ma recherche ainsi qu'à la rédaction du présent ouvrage, en particulier :

- ☞ Professeur MAMY Raoul Ravelomanana, Président de l'Université d'Antananarivo ;
- ☞ Professeur RANDRIANJA Roger, Directeur de l'École Doctorale de l'Ingénierie et Géoscience (INGE) de l'Université d'Antananarivo et toutes les équipes d'accueil qui m'ont beaucoup épaulées durant la réalisation de ma Thèse ;
- ☞ Professeur RAKOTONINDRAINY d'avoir accepté d'être mon Directeur de Thèse, d'offrir à ma disposition toutes ses compétences, son expérience ainsi que ses meilleurs et précieux services, tant sur la méthode de la conduite de la recherche que dans la rédaction de la présente manuscrite ;
- ☞ Tous les membres du jury, pour leurs critiques constructives ainsi que les apports de suggestions d'améliorations de la version finale de mon ouvrage ;
- ☞ Tous les membres de ma Famille pour leurs soutiens moraux, matériels et financiers qu'elles m'ont offerts durant la période de la réalisation de ma recherche ; et
- ☞ Toutes mes promotions ainsi que mes amis proches, qui ont été aussi toujours à mes côtés pour leurs conseils inestimables.

Ma profonde gratitude et toute ma sympathie à tous !!!

# SOMMAIRE

|                                                                                                                                                 |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| DÉDICACES.....                                                                                                                                  | ii   |
| REMERCIEMENT .....                                                                                                                              | iii  |
| LISTES DES ABRÉVIATIONS.....                                                                                                                    | vi   |
| NOMENCLATURES.....                                                                                                                              | vii  |
| LISTE DES GRAPHIQUES.....                                                                                                                       | xiii |
| LISTE DES FIGURES.....                                                                                                                          | xvi  |
| LISTE DES PHOTOS.....                                                                                                                           | xix  |
| LISTE DES TABLEUX.....                                                                                                                          | xxi  |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE.....                                                                                                                      | 1    |
| PARTIE I : PROCÉDÉ ANALYTIQUE.....                                                                                                              | 10   |
| CHAPITRE I- CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....                                                                       | 11   |
| I - LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE.....                                                                                                              | 11   |
| II - LE CLIMAT .....                                                                                                                            | 11   |
| III - RELIEF ET TOPOGRAPHIE .....                                                                                                               | 14   |
| IV - HYDROLOGIE.....                                                                                                                            | 14   |
| V - PÉDOLOGIE.....                                                                                                                              | 15   |
| VI - GÉOLOGIE.....                                                                                                                              | 15   |
| VII - OCCUPATION DES SOLS .....                                                                                                                 | 16   |
| CHAPITRE II- LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY .....                                                                              | 17   |
| I - LES ARGILES .....                                                                                                                           | 17   |
| II - LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY.....                                                                                       | 30   |
| III - ANALYSE ET SUGGESTION.....                                                                                                                | 40   |
| CHAPITRE III – CONCEPT DU CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT .....                                                                                 | 42   |
| I - INTRODUCTION.....                                                                                                                           | 42   |
| II - DÉFINITION DE LA CHALEUR .....                                                                                                             | 42   |
| III - LA THERMORÉGULATION HUMAINE .....                                                                                                         | 43   |
| IV - LE CONFORT THERMIQUE DANS LE BÂTIMENT .....                                                                                                | 45   |
| V - LE CONFORT THERMIQUE ET L'APPROCHE BIOCLIMATIQUE .....                                                                                      | 135  |
| PARTIE II : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE .....                                                                                                         | 158  |
| CHAPITRE I- DÉTERMINATION DE L'ARGILOLOGITÉ, LA TENEUR EN EAU NATURELLE AINSI QUE LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA..... | 159  |
| I - IDENTIFICATION DE L'ARGILOLOGITÉ DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                                       | 159  |
| II - DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU NATURELLE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                           | 164  |
| III - IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                             | 165  |
| CHAPITRE II- ÉVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DES PAROIS DU BÂTIMENT .....                                                                | 176  |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| I - DESCRIPTION ARCHITECTURALES DU BÂTIMENT .....                                                                             | 176 |
| II - HYPOTHÈSES THERMOPHYSIQUE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT L'ENVELOPPE DU MODÈLE DU BÂTIMENT.....                               | 177 |
| III - PERFORMANCE THERMOPHYSIQUE DES PAROIS DU MODÈLE DE BÂTIMENT .....                                                       | 186 |
| CHAPITRE III- SIMULATION DU CONFORT THERMIQUE DU BÂTIMENT .....                                                               | 190 |
| I - INTRODUCTION .....                                                                                                        | 190 |
| II - LES RAISONS DE CHOIX DU LOGICIEL ARCHICAD POUR LA RÉALISATION DE SIMULATION THERMIQUE DU BÂTIMENT OBJET DE L'ÉTUDE ..... | 190 |
| III - DÉFINITION DES BLOCS THERMIQUES DU BÂTIMENT .....                                                                       | 192 |
| IV - DÉFINITION DES SOURCES ET PLANNING DES VENTILATIONS .....                                                                | 195 |
| V - LES APPORTS INTERNES DANS CHAQUE PIÈCE DU BÂTIMENT .....                                                                  | 195 |
| VI - ENVIRONNEMENT RELATIF AU SITE D'IMPLANTATION DU PROJET .....                                                             | 197 |
| VII - CARACTÉRISATION DE SOL D'ASSISE .....                                                                                   | 204 |
| VIII - SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES DU BÂTIMENT .....                                                                          | 204 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE .....                                                                                                     | 233 |
| BIBLIOGRAPHIE.....                                                                                                            | 235 |
| WEBOGRAPHIE .....                                                                                                             | 241 |
| ANNEXE .....                                                                                                                  | 244 |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                                                      | 256 |

## LISTES DES ABRÉVIATIONS

|                   |                                                                                                                                    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ADEME :</b>    | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie                                                                           |
| <b>AIE :</b>      | Agence Internationale de l'Énergie                                                                                                 |
| <b>ASHRAE :</b>   | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (association des Ingénieurs climaticiens des États-Unis) |
| <b>BTP :</b>      | Bâtiments et Travaux Publics                                                                                                       |
| <b>CDTI :</b>     | Centre pour le Développement Technologique Industriel                                                                              |
| <b>CIE :</b>      | Commission Internationale de l'éclairage                                                                                           |
| <b>DR :</b>       | Draught Rating                                                                                                                     |
| <b>EPW :</b>      | EnergyPlus Weather                                                                                                                 |
| <b>FEDER :</b>    | Fonds Européen de Développement Régional                                                                                           |
| <b>FLJ :</b>      | Facteur lumière jour                                                                                                               |
| <b>HQE :</b>      | Haute Qualité Environnementale                                                                                                     |
| <b>I.R :</b>      | Infra – Rouge                                                                                                                      |
| <b>INSTAT :</b>   | Institut National de la Statistique                                                                                                |
| <b>N.M :</b>      | Norme malgache                                                                                                                     |
| <b>PMV :</b>      | Predicted Mean Vote                                                                                                                |
| <b>PPD :</b>      | Predicted Percentage Dissatisfied                                                                                                  |
| <b>RTAA DOM :</b> | Règlementations Thermique Acoustique Aération, Département d'outre-mer                                                             |
| <b>SED :</b>      | Simulation énergétique dynamique                                                                                                   |
| <b>SET :</b>      | Standard Effective Température                                                                                                     |
| <b>STD :</b>      | Simulation thermique dynamique                                                                                                     |
| <b>TBM :</b>      | Travaux de Bâtiments à Madagascar                                                                                                  |
| <b>TMY :</b>      | Typical meteorological year                                                                                                        |
| <b>U.V. :</b>     | Ultra – violet                                                                                                                     |

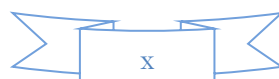
## NOMENCLATURES

|                                                          |                                                                                       |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>i :</b>                                               | Indice relatif aux heures                                                             |
| <b>j :</b>                                               | Indice relatif aux jours (1 à 365).                                                   |
| <b><math>\lambda</math> (w/m. k) :</b>                   | Conductivité thermique                                                                |
| <b><math>\lambda</math> (m) :</b>                        | Longueur d'onde                                                                       |
| <b><math>\lambda_j</math> [W/ (m.k)] :</b>               | Conductivité thermique d'un verre ou une couche de matériau j                         |
| <b>U (w/m<sup>2</sup>. K) ou (W/m<sup>2</sup>. °C) :</b> | - Coefficient de déperdition surfacique ;<br>- Coefficient de transmission thermique. |
| <b><math>U_f</math> [W/ (m<sup>2</sup>. K)] :</b>        | Coefficient surfacique moyen d'une menuiserie                                         |
| <b><math>U_{fi}</math> [W/ (m<sup>2</sup>. K)] :</b>     | Coefficient surfacique du montant ou de la traverse numéro « i » d'une menuiserie     |
| <b>Ug [W/ (m<sup>2</sup>. K)] :</b>                      | Coefficient surfacique d'un vitrage                                                   |
| <b>E (wh<sup>0,5</sup>/m<sup>2</sup>. K) :</b>           | Effusivité thermique                                                                  |
| <b>E (°C) :</b>                                          | Échange de chaleur au niveau de la peau par évaporation                               |
| <b>Cp (Wh/m<sup>3</sup>. k) :</b>                        | Capacité thermique                                                                    |
| <b>a ou <math>\alpha</math> (m<sup>2</sup>/s) :</b>      | Diffusivité thermique                                                                 |
| <b>I (Wh/m<sup>2</sup>. K) :</b>                         | Inertie thermique d'un matériau                                                       |
| <b>I<sub>p</sub> (%) :</b>                               | Indice de plasticité                                                                  |
| <b>I<sub>c</sub> (%) :</b>                               | Indice de consistance                                                                 |
| <b>W<sub>L</sub> (%) :</b>                               | Limite de liquidité                                                                   |
| <b>W<sub>P</sub> (%) :</b>                               | Limite de plasticité                                                                  |
| <b>D (heures) :</b>                                      | Déphasage thermique                                                                   |
| <b>P (kg/m<sup>3</sup>) :</b>                            | Densité ou masse volumique                                                            |
| <b><math>\mu</math> (coefficient « mu ») :</b>           | Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau                                  |
| <b><math>\mu</math> [kg/ (m.s)] :</b>                    | Viscosité dynamique d'un gaz                                                          |
| <b>Top (°C) ou t<sub>0</sub> (°C) :</b>                  | Température opérative                                                                 |
| <b>Tr (°C) :</b>                                         | Température radiante                                                                  |
| <b>T<sub>m</sub> (K) :</b>                               | Température moyenne absolue de la lame de gaz                                         |
| <b>T<sub>int</sub> (K) :</b>                             | Température interne du local                                                          |
| <b>T<sub>ext</sub> (K) :</b>                             | Température externe d'une paroi composite                                             |
| <b>HR (%) :</b>                                          | Humidité relative de l'air                                                            |
| <b>HS (kg<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub>) :</b>      | Humidité spécifique de l'air                                                          |
| <b>U (m/s) :</b>                                         | Vitesse relative de l'air                                                             |
| <b>Ta (K) :</b>                                          | Température ambiante de l'air                                                         |
| <b><math>\theta</math> (°C) :</b>                        | Température                                                                           |
| <b><math>\theta_a</math> (°C) :</b>                      | Température de l'air                                                                  |
| <b><math>\theta_e</math> (°C) :</b>                      | Température extérieure de base                                                        |

|                                         |                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Theta_i$ (°C) :                       | Température intérieure de base                                                                                       |
| $\Theta_{mrt}$ (°C) ou $T_{mrt}$ (K) :  | Température radiante moyenne                                                                                         |
| $P$ (Pa) :                              | Pression partielle de vapeur d'eau                                                                                   |
| $P_a$ (kPa) :                           | Pression de vapeur d'air                                                                                             |
| $m$ (W/m <sup>2</sup> )                 | Activité spécifique d'un sujet                                                                                       |
| $m$ (kg) :                              | Masse d'un échantillon ;                                                                                             |
| $M$ (Watt) :                            | Activité ou chaleur métabolique d'un sujet                                                                           |
| $M$ (W/m <sup>2</sup> ) :               | Production de chaleur métabolique                                                                                    |
| $M_P$ (W/m <sup>2</sup> ) :             | Composante posturale                                                                                                 |
| $M_W$ (W/m <sup>2</sup> ) :             | Composante d'activité                                                                                                |
| $M_M$ (W/m <sup>2</sup> ) :             | Composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse                                                         |
| $n$ :                                   | - Exposant d'inclinaison d'un vitrage ;<br>- Nombre d'occupants.                                                     |
| $N$ :                                   | - Nombre de coups correspondant à la fermeture de l'échantillon sur 1 cm dans la coupelle ;<br>- Rendement mécanique |
| $N_u$ :                                 | Nombre de Nusselt                                                                                                    |
| $W$ (Watt) :                            | Travail mécanique fourni par un sujet                                                                                |
| $W$ :                                   | Mouillure cutanée.                                                                                                   |
| $w$ (%) :                               | Teneur en eau d'un sol                                                                                               |
| $W$ (W/m <sup>2</sup> ) :               | Travail spécifique du sujet                                                                                          |
| $W$ (kg) :                              | Poids d'échantillon humide d'un sol                                                                                  |
| $W_d$ (Kg) :                            | Poids de l'échantillon sec d'un sol                                                                                  |
| $\omega_e$ (g/kg <sub>air sec</sub> ) : | Teneur en eau de l'air extérieur                                                                                     |
| $\omega_i$ (g/kg <sub>air sec</sub> ) : | Teneur en eau de l'air intérieur                                                                                     |
| $A$ :                                   | Constante d'inclinaison d'un vitrage                                                                                 |
| $A$ (m <sup>2</sup> ) :                 | - Surface de la peau du sujet<br>- Taille d'une ouverture                                                            |
| $A_{fi}$ (m <sup>2</sup> ) :            | Aire projetée correspondante d'une menuiserie                                                                        |
| $A_{DU}$ (m <sup>2</sup> )              | Surface de la peau                                                                                                   |
| $A_i$ (°C) :                            | Amplitude de la température intérieure                                                                               |
| $A_e$ (°C) :                            | Amplitude de la température extérieure                                                                               |
| $f_{cl}$ :                              | Fraction de la surface habillée ou facteur d'habillement                                                             |
| $B_M$ (W/m <sup>2</sup> ) :             | Métabolisme basal                                                                                                    |
| $V_z$ (km/h) :                          | Vitesse du vent à l'altitude $Z$ (m)                                                                                 |
| $V_{10}$ (km/h) :                       | Vitesse du vent à l'altitude de 10 mètres (standard des stations météo)                                              |

|                                                                |                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>v (Hz) :</b>                                                | Fréquence                                                                                                                                                  |
| <b>v (m/s) :</b>                                               | Vitesse moyenne d'air dans un local                                                                                                                        |
| <b><math>\alpha</math> :</b>                                   | Coefficient d'absorption d'une paroi ou vitrage                                                                                                            |
| <b>S (m<sup>2</sup>) :</b>                                     | - Surface d'une paroi ;<br>- Surface du flux (m <sup>2</sup> ), correspondant à la surface de l'ouverture.                                                 |
| <b>s (m) :</b>                                                 | Épaisseur d'une lame de vitrage                                                                                                                            |
| <b>S<sub>T</sub> :</b>                                         | Sensation thermique                                                                                                                                        |
| <b>S<sub>f</sub> :</b>                                         | Facteur solaire d'une menuiserie                                                                                                                           |
| <b>S<sub>w</sub> :</b>                                         | Facteur solaire d'une fenêtre                                                                                                                              |
| <b>F :</b>                                                     | Facteur solaire d'une paroi                                                                                                                                |
| <b>S<sub>g</sub> :</b>                                         | Facteur solaire d'un vitrage                                                                                                                               |
| <b>R :</b>                                                     | Retard ou déphasage                                                                                                                                        |
| <b>R (m<sup>2</sup>. K/W) ou (m<sup>2</sup> °C/W) :</b>        | Résistance thermique d'un matériau                                                                                                                         |
| <b>R<sub>se</sub> et R<sub>si</sub> (m<sup>2</sup>. K/W) :</b> | Résistance thermique superficielle                                                                                                                         |
| <b>R (W/m<sup>2</sup>) :</b>                                   | - Rayonnement solaire incident sur la surface ;<br>- Flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau ou flux de chaleur radiatif. |
| <b>R<sub>cl</sub> (m<sup>2</sup>. K/W) :</b>                   | Résistance thermique vestimentaire                                                                                                                         |
| <b>R<sub>M</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                       | Rayonnement solaire incident sur la surface d'un mur                                                                                                       |
| <b>R<sub>v</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                       | Intensité du rayonnement solaire sur les vitrages                                                                                                          |
| <b>q<sub>v</sub> (m<sup>3</sup>/h) :</b>                       | Débit d'air extérieur de renouvellement                                                                                                                    |
| <b>Q<sub>R</sub> (W) :</b>                                     | Apport de chaleur par conduction et convection                                                                                                             |
| <b>Q (J) :</b>                                                 | Quantité de chaleur                                                                                                                                        |
| <b>Q<sub>M</sub> (W) :</b>                                     | Apports de chaleur par radiations                                                                                                                          |
| <b>Q<sub>LOC</sub> (W) :</b>                                   | Gains latents des occupants                                                                                                                                |
| <b>Q<sub>i</sub> (W) :</b>                                     | Gain de chaleur interne                                                                                                                                    |
| <b>Q<sub>c</sub> (W) :</b>                                     | Gain ou perte de chaleur par conduction                                                                                                                    |
| <b>Q<sub>s</sub> (W) :</b>                                     | Gain thermique solaire                                                                                                                                     |
| <b>Q<sub>v</sub> (W) :</b>                                     | Gain ou perte de chaleur par évaporation                                                                                                                   |
| <b>k (W/m<sup>2</sup>K) :</b>                                  | Coefficient de transmission thermique d'une paroi ou du vitrage                                                                                            |
| <b>K (°C) :</b>                                                | Échange de chaleur au niveau de la peau par conduction                                                                                                     |
| <b>K et <math>\alpha</math> :</b>                              | Coefficient variant en fonction du terrain                                                                                                                 |
| <b>Q (m<sup>3</sup>/s) :</b>                                   | - Vitesse de circulation de l'air ;<br>- Niveau de débit d'air.                                                                                            |
| <b>g :</b>                                                     | - Accélération de la pesanteur<br>- Facteur de réduction                                                                                                   |

|                                                 |                                                                                                   |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>H(W) :</b>                                   | Production de la chaleur interne du corps                                                         |
| <b>h (m) :</b>                                  | - Différence de hauteur entre deux ouvertures ;<br>- Hauteur.                                     |
| <b>h (W/m²K) :</b>                              | Coefficient d'échange de chaleur sensible                                                         |
| <b>h<sub>ro</sub> [W/ (m². K)] :</b>            | Coefficient de rayonnement d'un corps noir                                                        |
| <b>h<sub>c</sub> (W/m²) :</b>                   | Coefficient d'échange convectif                                                                   |
| <b>h<sub>g</sub> [W/ (m². K)] :</b>             | Conductance thermique du gaz.                                                                     |
| <b>h<sub>r</sub> (W/m². K) :</b>                | - Coefficient d'échange radiatif linéarisé<br>- Conductance thermique radiative de la lame de gaz |
| <b>h<sub>e</sub> (W/m². KPa) :</b>              | Coefficient d'échange de chaleur par évaporation                                                  |
| <b>h<sub>e</sub> et h<sub>i</sub> :</b>         | Coefficients globaux de convection sur le mur                                                     |
| <b>T (K ou °C) :</b>                            | Températures                                                                                      |
| <b>T(Kg):</b>                                   | Poids d'une tare                                                                                  |
| <b>P<sub>t</sub> (Pa) :</b>                     | Pression totale d'une ouverture                                                                   |
| <b>P<sub>s</sub> (Pa) :</b>                     | Pression de l'espace en aval d'une ouverture                                                      |
| <b>P<sub>exp</sub> (kPa) :</b>                  | Pression de vapeur d'eau dans l'air expiré                                                        |
| <b>P<sub>w</sub> (Kg)</b>                       | Poids de l'eau                                                                                    |
| <b>P<sub>s</sub> (Kg)</b>                       | Poids des grains d'un sol                                                                         |
| <b>P<sub>sk, s</sub> (kPa) :</b>                | Pression de vapeur à la surface de la peau                                                        |
| <b>d (kg/m³) :</b>                              | Masse volumique de l'air                                                                          |
| <b>d<sub>j</sub> (m) :</b>                      | Épaisseur du verre ou de la couche du matériau j                                                  |
| <b>D<sub>R</sub>:</b>                           | Degré heure du refroidissement                                                                    |
| <b>D<sub>R</sub> (%) :</b>                      | Gène par courant d'air                                                                            |
| <b>D<sub>v</sub> :</b>                          | Degré heure de la ventilation                                                                     |
| <b>D<sub>c</sub>:</b>                           | Degrés heures de chauffage                                                                        |
| <b>P<sub>a</sub> (kPa) :</b>                    | Pression de vapeur d'eau dans l'air                                                               |
| <b>p<sub>sat</sub> (θ) (Pa) :</b>               | Pression de vapeur saturante                                                                      |
| <b>e ou e<sub>i</sub> (m) :</b>                 | Épaisseur d'une paroi ou d'un matériau                                                            |
| <b>φ (W/m²) :</b>                               | Flux de chaleur (ou thermique)                                                                    |
| <b>Φ (Watt) :</b>                               | Densité de puissance d'une source de chaleur dans le matériau                                     |
| <b>Δ :</b>                                      | Changement de la valeur d'une variable                                                            |
| <b>ΔT ou Δθ (°C) :</b>                          | Différence de température de part et d'autre d'une paroi                                          |
| <b>ρ (kg/m³) :</b>                              | Masse volumique                                                                                   |
| <b>W<sub>k</sub> (Watt) :</b>                   | Travail externe                                                                                   |
| <b>E<sub>sk</sub> (W/m²) :</b>                  | Flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau                           |
| <b>E<sub>r</sub> ou E<sub>rs</sub> (W/m²) :</b> | Flux de chaleur échangé par voie respiratoire                                                     |



|                                                                 |                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>C (W/m<sup>2</sup>) :</b>                                    | Flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau                |
| <b>C (°C ou K) :</b>                                            | Chaleur                                                                                |
| <b>C<sub>p</sub> (J/KG. °C) :</b>                               | Chaleur spécifique d'un matériau                                                       |
| <b>C<sub>K</sub> ou C (W/m<sup>2</sup>) :</b>                   | Chaleur sensible échangée par conduction ou par convection à la surface de la peau     |
| <b>c (m/s) :</b>                                                | Vitesse de la lumière                                                                  |
| <b>C [J/ (kg. K)] :</b>                                         | Capacité thermique massique d'un gaz                                                   |
| <b>C<sub>res</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                      | Flux de chaleur par convection respiratoire                                            |
| <b>C :</b>                                                      | Coefficient de décharge d'un orifice                                                   |
| <b>C<sub>d</sub> :</b>                                          | Coefficient de décharge de l'ouverture                                                 |
| <b>C<sub>soc</sub>(W) :</b>                                     | Chaleur sensible des occupants                                                         |
| <b>C<sub>Loc</sub> (W) :</b>                                    | Chaleur latente des occupants                                                          |
| <b>t<sub>cl</sub> (°C) :</b>                                    | Température de la surface externe d'un vêtement                                        |
| <b>t<sub>a</sub> (°C) :</b>                                     | Température de l'air ambiant                                                           |
| <b>t<sub>exp</sub> (°C) :</b>                                   | Température de l'air expiré                                                            |
| <b><math>\overline{t_r}</math> (°C) :</b>                       | Température radiante moyenne                                                           |
| <b>T<sub>sk</sub> (°C) :</b>                                    | Température de peau                                                                    |
| <b>T (kg) :</b>                                                 | Poids de la tare                                                                       |
| <b>ε :</b>                                                      | - Émissivité moyenne du corps<br>- Émissivité corrigée à la température T <sub>m</sub> |
| <b>σ (5,67×10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>) :</b> | Constante de Stefan-Boltzmann                                                          |
| <b>f<sub>eff</sub> :</b>                                        | Coefficient effectif d'une surface rayonnante                                          |
| <b>f<sub>cl</sub> :</b>                                         | Facteur d'habillement                                                                  |
| <b>P<sub>sk, s</sub> (kPa) :</b>                                | Pression de vapeur à la surface de la peau                                             |
| <b>R<sub>e, cl</sub> [(m<sup>2</sup>. KPa) /W] :</b>            | Résistance vestimentaire à l'évaporation                                               |
| <b>R<sub>s, k</sub> [m<sup>2</sup>. K) /W] :</b>                | Résistance thermique de la lame d'air ou du gaz                                        |
| <b>G<sub>r</sub> :</b>                                          | Nombres de Grashof                                                                     |
| <b>P<sub>r</sub> :</b>                                          | Nombres de Prandtl                                                                     |
| <b>b<sub>g</sub> (m) :</b>                                      | Largeur visible d'un vitrage                                                           |
| <b>b<sub>f</sub> (m) :</b>                                      | Largeur projetée d'une menuiserie                                                      |
| <b>B<sub>M</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                        | Métabolisme basal                                                                      |
| <b>M<sub>P</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                        | Composante posturale                                                                   |
| <b>M<sub>W</sub> (W/m<sup>2</sup>) :</b>                        | Composante d'activité                                                                  |
| <b>W<sub>k</sub> (Watt) :</b>                                   | Travail externe                                                                        |
| <b>σ (5,67×10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>) :</b> | Constante de Stefan-Boltzmann                                                          |
| <b>L<sub>R</sub> :</b>                                          | Lewis ratio                                                                            |

|                                  |                                                                             |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>(C+R) (W/m²) :</b>            | Échange de chaleur sensible cutané                                          |
| <b>Sd (m) :</b>                  | Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau                    |
| <b><math>\Psi_g</math> :</b>     | Coefficient de transmission linéique de liaison vitrage/cadre d'une fenêtre |
| <b><math>\chi</math> (W/K) :</b> | Coefficient de transmission thermique ponctuel                              |
| <b><math>\Omega</math> :</b>     | Pulsation                                                                   |
| <b>L (m) :</b>                   | Longueur                                                                    |
| <b>l (m) :</b>                   | Largeur                                                                     |
| <b>m (kg) :</b>                  | Masse                                                                       |

## LISTE DES GRAPHIQUES

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graphe 1: Courbe de changement climatique mondiale .....                                                                                                                                 | 2   |
| Graphe 2: Objectif à atteindre pour réduire le changement climatique mondiale .....                                                                                                      | 3   |
| Graphe 3: La précipitation d'Antananarivo.....                                                                                                                                           | 12  |
| Graphe 4: Heure de soleil par jour d'Antananarivo .....                                                                                                                                  | 13  |
| Graphe 5: Vitesse moyenne mensuelle du vent d'Antananarivo .....                                                                                                                         | 13  |
| Graphe 6: Influence de la consistance sur la durée de séchage de la brique artisanale en terre cuite .....                                                                               | 36  |
| Graphe 7: Température de la peau en fonction de la température ambiante .....                                                                                                            | 55  |
| Graphe 8: Influence de la vitesse de l'air et de la température ambiante sur le taux de refroidissement par évaporation de sueur .....                                                   | 57  |
| Graphe 9: Plage de confort hygrométrique .....                                                                                                                                           | 68  |
| Graphe 10: Le taux d'humidité spécifique suivant la norme ASHRAE .....                                                                                                                   | 69  |
| Graphe 11: Relation entre vents intérieurs .....                                                                                                                                         | 100 |
| Graphe 12: Relation entre PPD et volume d'air de ventilation .....                                                                                                                       | 105 |
| Graphe 13: Qualification de la température de couleurs .....                                                                                                                             | 117 |
| Graphe 14: Températures des couleurs de la lumière .....                                                                                                                                 | 118 |
| Graphe 15: Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme d'après le Norme.....                                                                             | 123 |
| Graphe 16: Relation entre le pourcentage d'insatisfaits (PPD) et le vote moyen (PMV) .....                                                                                               | 125 |
| Graphe 17: Diagramme de Olgay .....                                                                                                                                                      | 130 |
| Graphe 18: Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5.....                                                                               | 131 |
| Graphe 19: Corrélation entre la température de confort et la température extérieure.....                                                                                                 | 132 |
| Graphe 20: Modèle ASHRAE 552 004 .....                                                                                                                                                   | 132 |
| Graphe 21: Modélisation suivant la norme EN 15 251 de 2007 .....                                                                                                                         | 133 |
| Graphe 22: Le diagramme du Givoni.....                                                                                                                                                   | 134 |
| Graphe 23: Model du Standard ASHRAE 552 009 .....                                                                                                                                        | 135 |
| Graphe 24: Évolution de la température d'un site en fonction du type des reliefs.....                                                                                                    | 139 |
| Graphe 25: Albédo et émissivité des matériaux .....                                                                                                                                      | 140 |
| Graphe 26: Les différent état et le limites de variation de la teneur en eau d'un sol argileux .....                                                                                     | 167 |
| Graphe 27: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon P <sub>1</sub> .....                                                                                                        | 172 |
| Graphe 28: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon P <sub>2</sub> .....                                                                                                        | 172 |
| Graphe 29: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon P <sub>3</sub> .....                                                                                                        | 173 |
| Graphe 30 : Variation de la conductivité thermique des briques artisanes en terre cuite, selon EnergyPlus, avec la prise en compte de la valeur estimée de celui d'Ambohitrmanjaka. .... | 181 |
| Graphe 31: Performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment.....                                                                                                                       | 186 |
| Graphe 32: Température de l'air dans le site d'implantation du projet.....                                                                                                               | 199 |
| Graphe 33: Humidité relative du site d'implantation du projet.....                                                                                                                       | 200 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graphe 34: Rayonnement solaire du site .....                                                                                      | 201 |
| Graphe 35: Évolution de la vitesse d'air dans le site d'implantation du bâtiment .....                                            | 202 |
| Graphe 36 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers le nord .....                                | 206 |
| Graphe 37 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord .....        | 207 |
| Graphe 38 : Températures opératives journalières dans le bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord .....          | 207 |
| Graphe 39 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'hiver : orientation vers le nord .....      | 208 |
| Graphe 40 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le nord .....                         | 208 |
| Graphe 41 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le nord .....                         | 209 |
| Graphe 42 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord .....   | 209 |
| Graphe 43 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord ..... | 210 |
| Graphe 44 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers l'est .....                                  | 210 |
| Graphe 45 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est .....          | 211 |
| Graphe 46 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison : orientation vers l'est .....             | 211 |
| Graphe 47 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'hiver : orientation vers l'est .....                   | 212 |
| Graphe 48 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers l'est .....                           | 212 |
| Graphe 49 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est .....   | 213 |
| Graphe 50 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers l'est .....     | 213 |
| Graphe 51 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'hiver : orientation vers l'est .....           | 213 |
| Graphe 52 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers le sud .....                                 | 214 |
| Graphe 53 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud .....         | 214 |
| Graphe 54 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison d'été : orientation vers le sud .....      | 215 |
| Graphe 55: Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'hiver : orientation vers le sud .....        | 215 |
| Graphe 56 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le sud .....                          | 215 |
| Graphe 57 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud .....  | 216 |
| Graphe 58 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le sud .....    | 216 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graphe 59 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud .....  | 217 |
| Graphe 60 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers l'ouest .....                                | 217 |
| Graphe 61 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est ..             | 218 |
| Graphe 62 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison : orientation vers l'est .....             | 218 |
| Graphe 63 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'hiver : orientation vers l'est .....                   | 218 |
| Graphe 64 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers l'ouest .....                         | 219 |
| Graphe 65 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord ..... | 219 |
| Graphe 66 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord .....   | 220 |
| Graphe 67 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant l'hiver : orientation vers le nord ..             | 220 |
| Graphe 68 : Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment: orientation vers le nord .....                  | 224 |
| Graphe 69 : Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment: orientation vers l'est .....                    | 224 |
| Graphe 70 : Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment: orientation vers le sud .....                   | 224 |
| Graphe 71 : Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment: orientation vers l'ouest .....                  | 225 |
| Graphe 72 : Humidité relative journalière dans le bâtiment : orientation vers le nord .....                                       | 226 |
| Graphe 73 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers le nord .....                                              | 227 |
| Graphe 74 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers l'est .....                              | 227 |
| Graphe 75 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers l'est .....                                                | 228 |
| Graphe 76 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers le sud .....                             | 228 |
| Graphe 77 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers le sud .....                                               | 229 |
| Graphe 78 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers l'ouest .....                            | 230 |
| Graphe 79 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers l'ouest .....                                              | 230 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Diagramme de la structure et méthodologie de recherche de la thèse .....                                                          | 9  |
| Figure 2 : L'origine de l'argile .....                                                                                                       | 18 |
| Figure 3 : Schématisation des différents termes propres aux argiles .....                                                                    | 21 |
| Figure 4 : Représentation des tétraèdres de silicium et des octaèdres d'aluminium ou magnésium ainsi que de leur agencement en couches ..... | 22 |
| Figure 5 : Illustration de l'empilement des feuillets d'argile .....                                                                         | 22 |
| Figure 6 : Organisation des feuillets des matériaux d'argiles .....                                                                          | 23 |
| Figure 7 : Les différents niveaux de porosité des matériaux d'argiles .....                                                                  | 23 |
| Figure 8 : La microstructure des minéraux argileux de type 1 : 1 et 2 : 1 .....                                                              | 24 |
| Figure 9 : Structure des minéraux 1/1 .....                                                                                                  | 25 |
| Figure 10 : Structure idéale des minéraux 2/1 .....                                                                                          | 25 |
| Figure 11 : Représentation schématique des structures des minéraux .....                                                                     | 26 |
| Figure 12 : Classification des différents minéraux argileux par leur structure .....                                                         | 27 |
| Figure 13 : Les différentes phases d'un sol .....                                                                                            | 28 |
| Figure 14 : État des particules lamellaires de l'argile avant et après l'homogénéisation et humidification .....                             | 34 |
| Figure 15 : L'importance et la nécessité de la qualité du séchage des briques artisanales .....                                              | 36 |
| Figure 16 : Définition du confort thermique .....                                                                                            | 46 |
| Figure 17 : Le confort dans un local octroie une satisfaction individuelle .....                                                             | 46 |
| Figure 18 : La maîtrise du confort a un impact direct sur l'économie .....                                                                   | 46 |
| Figure 19 : Le confort thermique a un impact sur la qualité de l'air d'un local .....                                                        | 47 |
| Figure 20 : Le confort thermique participe à la pérennité d'un bâtiment .....                                                                | 47 |
| Figure 21 : Représentation schématique du métabolisme humain .....                                                                           | 48 |
| Figure 22 : Températures de confort correspondant à l'énergie dégagée pour chaque type d'activité métabolique d'un individu .....            | 49 |
| Figure 23 : Interaction thermique entre le corps humain et son environnement .....                                                           | 50 |
| Figure 24 : Relation entre les paramètres de confort et les modes d'échange de chaleur .....                                                 | 54 |
| Figure 25 : Bilan des échanges thermiques entre l'homme et son environnement .....                                                           | 57 |
| Figure 26 : Échanges des chaleurs liés à l'habillement d'un individu .....                                                                   | 60 |
| Figure 27 : Expérience sur l'importance de la température d'une paroi .....                                                                  | 63 |
| Figure 28 : Définition de la température opérative .....                                                                                     | 64 |
| Figure 29 : L'humidité ascensionnelle .....                                                                                                  | 66 |
| Figure 30 : L'humidité traversante .....                                                                                                     | 66 |
| Figure 31 : L'humidité pendant la construction/réhabilitation .....                                                                          | 66 |
| Figure 32 : L'humidité interne à l'habitation .....                                                                                          | 66 |
| Figure 33 : L'humidité accidentelle .....                                                                                                    | 67 |

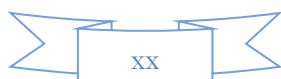
|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 34 : Diffusion d'humidité interne d'une paroi en hiver .....                                                 | 69  |
| Figure 35 : Diffusion d'humidité interne d'une paroi en été .....                                                   | 70  |
| Figure 36 : Condensation interne de l'humidité d'un local.....                                                      | 70  |
| Figure 37 : Le flux thermique traversant une paroi du bâtiment.....                                                 | 74  |
| Figure 38 : La conductivité thermique d'un matériau.....                                                            | 76  |
| Figure 39 : coefficient de transmission thermique des murs composés par plusieurs couches des matériaux .....       | 78  |
| Figure 40 : coefficient de transmission thermique d'une baie vitrée .....                                           | 85  |
| Figure 41 : coefficient de transmission thermique des fenêtres .....                                                | 86  |
| Figure 42 : Le facteur solaire d'une baie vitrée.....                                                               | 86  |
| Figure 43 : Gain thermique d'un espace.....                                                                         | 88  |
| Figure 44 : Le rayonnement solaire .....                                                                            | 89  |
| Figure 45 : Le flux solaire .....                                                                                   | 89  |
| Figure 46 : Les trois dimensions de la ventilation naturelle.....                                                   | 95  |
| Figure 47: Effet de cheminée .....                                                                                  | 97  |
| Figure 48 : La ventilation transversale .....                                                                       | 98  |
| Figure 49 : Consommation d'énergie d'une lampe à incandescence .....                                                | 111 |
| Figure 50 : Composition de la lampe fluorescente .....                                                              | 113 |
| Figure 51 : La dissipation de la chaleur de la lampe LED .....                                                      | 115 |
| Figure 52 : Température des couleurs de lampe fluorescente.....                                                     | 117 |
| Figure 53 : Le bâtiment se ressemble à un tonneau de Donaïdes .....                                                 | 119 |
| Figure 54 : Les principaux flux de chaleur au travers d'un bâtiment.....                                            | 119 |
| Figure 55 : Les inconforts locaux .....                                                                             | 127 |
| Figure 56 : la végétation est une bonne alternative pour le confort d'un bâtiment .....                             | 139 |
| Figure 57 : Le mouvement terre soleil .....                                                                         | 144 |
| Figure 58 : Positionnement du soleil aux équinoxes de printemps et d'automne.....                                   | 144 |
| Figure 59 : Positionnement du soleil au solstice d'été.....                                                         | 145 |
| Figure 60: Positionnement du soleil au solstice d'hiver .....                                                       | 145 |
| Figure 61 : Angle de la voute céleste.....                                                                          | 146 |
| Figure 62 : l'observateur repérait l'azimut et la hauteur du Soleil .....                                           | 146 |
| Figure 63 : Repérage de la position du soleil dans le sol .....                                                     | 146 |
| Figure 64 : traçage de la course du Soleil .....                                                                    | 146 |
| Figure 65 : Diagramme de la course du soleil .....                                                                  | 147 |
| Figure 66 : Liaison de différentes courbes relatives à une même latitude dans les différents moments de l'année ... | 147 |
| Figure 67 : Hauteur et l'azimut du Soleil .....                                                                     | 147 |
| Figure 68 : Hauteur du soleil .....                                                                                 | 148 |
| Figure 69 : Azimut du soleil .....                                                                                  | 148 |
| Figure 70 : Diagramme cylindrique ou stéréographique .....                                                          | 149 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 71 : Les principaux facteurs d'affaiblissement de l'ensoleillement.....     | 149 |
| Figure 72 : Impact de la vitesse du vent selon l'altitude et la nature du sol..... | 150 |
| Figure 73 : Stratégie de zonage thermique d'un bâtiment .....                      | 151 |
| Figure 74 : Les avantages d'une enveloppe de bâtiment bien conçu.....              | 153 |
| Figure 75 : L'auvent bloque le rayonnement direct .....                            | 156 |
| Figure 76 : État liquide de l'argile.....                                          | 166 |
| Figure 77 : État plastique de l'argile.....                                        | 166 |
| Figure 78 : État solide sans retrait de l'argile.....                              | 166 |
| Figure 79 : Dimension du cylindre pour la détermination $W_p$ .....                | 170 |
| Figure 80 : Hauteur d'élévation du cylindre de 3 mm .....                          | 170 |
| Figure 81: Comportements mécaniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka.....            | 174 |
| Figure 82 : Direction principale du vent du site.....                              | 202 |

## LISTE DES PHOTOS

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Photo 1 : Habitation en cage végétale des peuples et celle de l'aristocrate de Tananarive au début de XIX <sup>e</sup> siècle.... | 31  |
| Photo 2 : Évolution des matériaux utilisés pour la construction des bâtiments à Madagascar .....                                  | 32  |
| Photo 3 : Type de maison habillé à l'aide des briques en terre cuite traditionnelle de la haute terre malgache.....               | 32  |
| Photo 4 : Argile destinée pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite .....                                        | 33  |
| Photo 5 : Processus de moulage de l'argile crue .....                                                                             | 35  |
| Photo 6 : Le mode de séchage des briques en argile à Madagascar .....                                                             | 35  |
| Photo 7 : Processus de cuisson de la brique artisanale en terre cuite malagasy.....                                               | 37  |
| Photo 8 : Types de thermomètre pour mesurer la température ambiante de l'air. ....                                                | 62  |
| Photo 9 : Thermomètre de contact pour mesurer la température de la paroi .....                                                    | 63  |
| Photo 10 : Moisissures dues à un pont thermique. ....                                                                             | 69  |
| Photo 11 : Briques gélives soumises au gel .....                                                                                  | 70  |
| Photo 12 : Efflorescences de sels dans un mur .....                                                                               | 71  |
| Photo 13 : Les appareils des mesures de la vitesse de l'air. ....                                                                 | 73  |
| Photo 14 : Types d'ouvrants, classés selon la manière de les ouvrir .....                                                         | 101 |
| Photo 15 : Combinaisons d'ouvrants .....                                                                                          | 101 |
| Photo 16 : Ouvertures de ventilation.....                                                                                         | 102 |
| Photo 17 : Taux d'ouverture d'une pièce principale .....                                                                          | 102 |
| Photo 18 : Les ouvertures intérieures d'un logement .....                                                                         | 104 |
| Photo 19 : Pictogramme lié à la labellisation des lampes .....                                                                    | 110 |
| Photo 20 : Ampoules à incandescence.....                                                                                          | 111 |
| Photo 21 : Lampes halogènes .....                                                                                                 | 112 |
| Photo 22 : Lampe LED .....                                                                                                        | 114 |
| Photo 23 : Appareillages d'usages courant pour la détermination de l'argilogité d'un sol.....                                     | 160 |
| Photo 24 : Appareillages spécifiques pour la détermination de l'argilogité d'un sol .....                                         | 160 |
| Photo 25 : Produits utilisés pour la détermination de l'argilogité d'un sol .....                                                 | 160 |
| Photo 26 : Test de l'argilosité d'un sol .....                                                                                    | 161 |
| Photo 27 : Test au bleu de méthylène négatif .....                                                                                | 161 |
| Photo 28 : Test au bleu de méthylène positif.....                                                                                 | 161 |
| Photo 29 : Appareil de Casagrande .....                                                                                           | 168 |
| Photo 30 : Micro – onde pour déterminer la teneur en eau de l'argile .....                                                        | 168 |
| Photo 31 : Façade principale .....                                                                                                | 177 |
| Photo 32 : Façade latérale droite .....                                                                                           | 177 |
| Photo 33 : Façade postérieure .....                                                                                               | 177 |
| Photo 34 : Façade latérale gauche .....                                                                                           | 177 |
| Photo 35 : Échantillon des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka .....                                            | 178 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| Photo 36 : Plan du rez-de-chaussée.....      | 194 |
| Photo 37 : Plan du premier étage .....       | 194 |
| Photo 38 : Plan du comble habitable .....    | 194 |
| Photo 39 : Site d'emplacement du projet..... | 198 |



## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1 : Température mensuelle, annuelle, d'Antananarivo.....                                                           | 12  |
| Tableau 2 : Humidité relative d'Antananarivo .....                                                                         | 13  |
| Tableau 3 : Différences entre les argiles par rapport aux autres terres .....                                              | 28  |
| Tableau 4 : Transformation des éléments constituant les briques en fonction de la température de la cuisson.....           | 37  |
| Tableau 5 : Dimension standard de briques artisanales en terre cuite malgache .....                                        | 38  |
| Tableau 6 : Le phénomène objectif et subjectif de la sensation de confort .....                                            | 58  |
| Tableau 7 : Évaluation du niveau d'activité d'un individu .....                                                            | 59  |
| Tableau 8 : Estimation du niveau d'habillement .....                                                                       | 60  |
| Tableau 9 : Valeur de référence de température de l'air .....                                                              | 62  |
| Tableau 10 : Relation entre SET et sensation corporelle.....                                                               | 65  |
| Tableau 11 : Refroidissement équivalent de la paroi en fonction de la vitesse de l'air.....                                | 71  |
| Tableau 12 : Variation des vitesses de l'air en fonction de la température.....                                            | 72  |
| Tableau 13 : Plage de variation de vitesse de l'air en fonction de la température intérieure .....                         | 72  |
| Tableau 14 : Coefficient d'échange thermique superficiel d'une paroi .....                                                 | 76  |
| Tableau 15 : Coefficient de transmission thermique des matériaux de construction par rapport à leur masse surfacique ..... | 79  |
| Tableau 16 : Coefficient d'absorption « $\alpha$ » pour murs, toits et fenêtres.....                                       | 80  |
| Tableau 17 : Valeur de perméabilité à l'air de l'ensemble des parois d'un bâtiment.....                                    | 81  |
| Tableau 18 : Émissivité corrigée .....                                                                                     | 83  |
| Tableau 19 : Valeurs de calcul de $U_f$ pour cadres .....                                                                  | 85  |
| Tableau 20 : Les perméabilités à l'air des fenêtres/baies .....                                                            | 87  |
| Tableau 21 : Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi.....                                                      | 90  |
| Tableau 22 : Le facteur de réflexion des matériaux et des couleurs usuelles .....                                          | 91  |
| Tableau 23 : Plages utiles de coefficient de réflexion.....                                                                | 92  |
| Tableau 24 : Valeur recommandée de coefficient de réflexion .....                                                          | 92  |
| Tableau 25 : coefficient d'absorption d'un vitrage .....                                                                   | 93  |
| Tableau 26 : Facteur de réduction « $g$ » pour fenêtres protégées .....                                                    | 93  |
| Tableau 27 : Les différents types de systèmes de ventilation transversale d'un local .....                                 | 99  |
| Tableau 28 : Récapitulatif des différents dispositifs et de l'effet recherché .....                                        | 99  |
| Tableau 29 : Coefficient de porosité des baies.....                                                                        | 103 |
| Tableau 30 : Les débits d'air neuf recommandés.....                                                                        | 105 |
| Tableau 31 : Apports sensibles et hygrométriques des occupants.....                                                        | 108 |
| Tableau 32 : Puissance d'éclairage installée y compris ballast .....                                                       | 109 |
| Tableau 33 : Valeurs des plages d'IRC avec leurs correspondances en perception des couleurs .....                          | 110 |
| Tableau 34 : Indice d'efficacité énergétique des lampes.....                                                               | 110 |

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 35 : Caractéristiques des lampes à incandescence .....                                                                                            | 111 |
| Tableau 36 : Caractéristiques des lampes halogènes.....                                                                                                   | 112 |
| Tableau 37 : Caractéristiques de lampes fluorescentes.....                                                                                                | 113 |
| Tableau 38 : Les principales caractéristiques des lampes LED .....                                                                                        | 115 |
| Tableau 39 : Performance des différentes lampes .....                                                                                                     | 115 |
| Tableau 40 : Éclairage recommandé .....                                                                                                                   | 116 |
| Tableau 41 : Quelques facteurs des pertes et de gain d'énergie dans un local .....                                                                        | 120 |
| Tableau 42 : Indice de vote moyen prévisible .....                                                                                                        | 123 |
| Tableau 43 : Les éléments importants de la conception bioclimatique.....                                                                                  | 137 |
| Tableau 44 : Méthode simple pour déterminer les types des sols de la fondation d'un bâtiment.....                                                         | 141 |
| Tableau 45 : Classe de la zone, valeur de $\lambda$ et $Z_0$ .....                                                                                        | 151 |
| Tableau 46 : Types de protections extérieures des fenêtres .....                                                                                          | 154 |
| Tableau 47 : Classification des sols selon la valeur du bleu de méthylène .....                                                                           | 162 |
| Tableau 48 : Classification des sols selon la valeur du bleu de méthylène .....                                                                           | 163 |
| Tableau 49 : Teneur en eau naturelle de l'argile d'Ambositrimanjaka .....                                                                                 | 164 |
| Tableau 50 : Nombre de coup et teneur en eau de chaque échantillon .....                                                                                  | 171 |
| Tableau 51 : Résultats des pesées, teneur en eau des cylindres et $W_L$ de chaque échantillon .....                                                       | 173 |
| Tableau 52: Indice de plasticité et limite de retrait de l'argile d'Ambositrimanjaka .....                                                                | 174 |
| Tableau 53 : Classification et degré de plasticité des sols argileux, suivant la norme NF P 94 051 .....                                                  | 174 |
| Tableau 54 : Hauteur de chaque niveau du bâtiment.....                                                                                                    | 176 |
| Tableau 55 : Caractéristiques physiques des échantillons .....                                                                                            | 178 |
| Tableau 57 : Conductivité thermique et capacités thermiques des briques artisanales en terre cuite selon EnergyPlus .....                                 | 179 |
| Tableau 57 : Les éléments constructifs du bâtiment .....                                                                                                  | 181 |
| Tableau 58 : Coefficient de transmission thermique des ouvertures .....                                                                                   | 185 |
| Tableau 60 : Différence entre les valeurs de conductivités thermiques des murs de modèle du bâtiment par rapport aux valeurs déclarées par l'ASHRAE ..... | 188 |
| Tableau 61 : Zonage du bâtiment .....                                                                                                                     | 193 |
| Tableau 62 : Planning des ventilations de chaque bloc thermique .....                                                                                     | 195 |
| Tableau 62 : Apports internes dans chaque local du bâtiment .....                                                                                         | 196 |
| Tableau 63 : Niveau de protection aérienne du site d'implantation du bâtiment .....                                                                       | 203 |
| Tableau 64 : Paramètres des ombrages horizontaux du site d'implantation .....                                                                             | 204 |
| Tableau 65 : Caractéristique thermique du sol d'assise.....                                                                                               | 204 |
| Tableau 66 : Températures opératives dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'hiver .....                                                     | 221 |
| Tableau 67 : Températures opératives dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'intersaison .....                                               | 221 |
| Tableau 68 : Température opérative dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant la période d'été .....                                              | 221 |
| Tableau 69 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant la période d'hiver .....                                             | 222 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 70 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'intersaison ..... | 222 |
| Tableau 71 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'été .....         | 222 |
| Tableau 72 : Variation annuelle des humidités relatives dans le bâtiment .....                           | 231 |
| Tableau 73 : Répartition des points dans le Diagramme de GIVONI .....                                    | 231 |

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## CONTEXTE

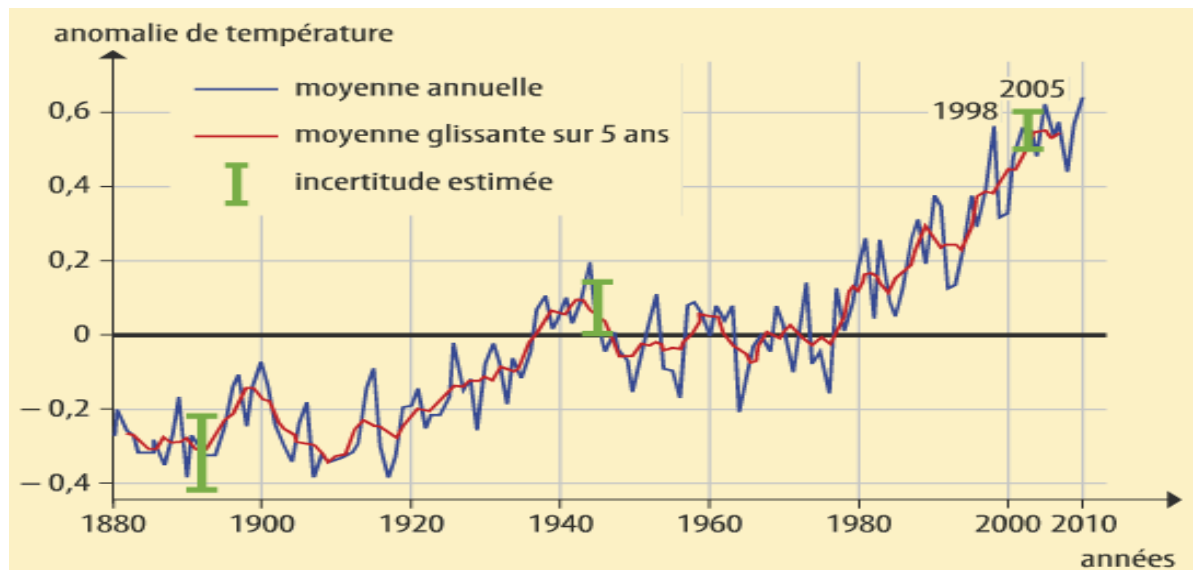
Madagascar possède des trésors en matériaux et des conditions climatiques naturelles inégalables. Ces ressources lui offrent ainsi tant d'intérêts sur la construction durable des logements d'habitation, notamment pour l'amélioration de leur bien-être par l'intermédiaire de la maîtrise du confort thermique dans son habitat, que sur l'économie nationale. Cependant, l'exigence thermique d'un bâtiment d'habitation n'est pas encore très connue dans le monde de la construction de bâtiment à Madagascar. Les critères de conception se basent seulement sur la disponibilité des matériaux de construction sans tenir en compte leurs rendements thermiques ainsi que les paramètres de base de l'architecture bioclimatique du site de l'édification. Or nous savons que le confort thermique constitue actuellement un enjeu mondial sur la demande des occupants d'un bâtiment, du fait de son impact sur les qualités de vie et des ambiances thermiques intérieures. En effet, l'analyse des confort thermique d'un bâtiment avec la prise en compte des variables bioclimatiques de leur site d'implantation permettent à leurs utilisateurs/occupants de prendre toutes les dispositions nécessaires comme le choix de l'exposition de la façade principale, afin de maîtriser la consommation d'énergies et gagner les avantages offerts par l'écosystème. C'est pourquoi la présente thèse se focalise sur l'« ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉ : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION OPTIMALE ».

## PROBLÉMATIQUE

Le secteur des Bâtiments et Travaux Publics est aujourd'hui l'un des premiers postes de consommateur d'énergie. Dans cette condition, ce domaine est l'un des principaux agents responsables des émissions de gaz à effet de serre, qui engendre des désordres environnementaux ainsi que le changement climatique très crucial actuel.

Les énergies entreprises dans l'extraction/transformations de matériaux, utilisées dans les matériels de mise en œuvre ainsi qu'exploitées par l'humanité dans la vie quotidienne étant mondialement le plus important émetteur de ces gaz nocifs. Selon l'AIE, dans 20 pays représentant 85 % de la consommation totale d'énergie finale en 2013, le secteur du bâtiment résidentiel, avec une part moyenne d'environ 21 %, représentait la troisième consommation d'énergie finale la plus élevée. De plus, les climatiseurs de chauffage ou de refroidissement des locaux représentaient jusqu'à 55 % de l'énergie totale consommée dans le secteur du bâtiment [AIE, 2016]. Ce phénomène incite les préoccupations mondiales en matière de la gestion environnementale et d'énergie pour conduire à une croissance rapide, dans l'obligation de construire leurs bâtiments d'habitation durable plus économes en énergie et d'utiliser autant que possible les ressources naturelles.

Quant au changement climatique, effet de ces émissions, le globe terrestre s'est réchauffé depuis 1900, et il est certain qu'il changera encore plus au cours de ce XXI<sup>e</sup> siècle [Robert KANDEL]. La courbe de réchauffement climatique mondiale de 1880 à 2010 ci-dessous en est la preuve.

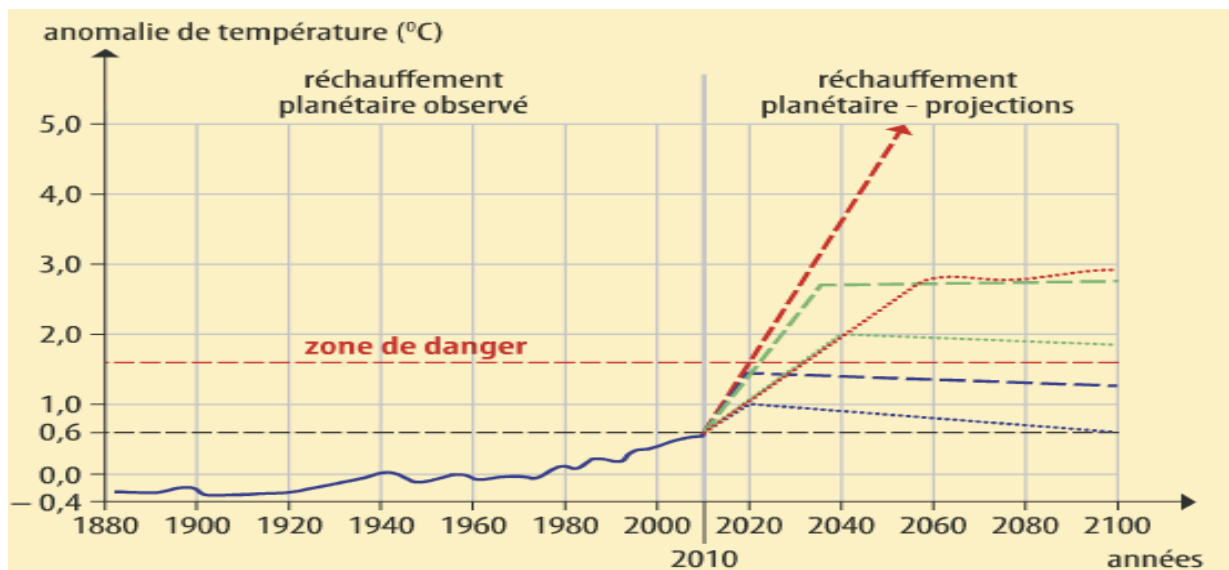


Graphe 1: Courbe de changement climatique mondiale

Cette courbe montre quatre phénomènes très remarquables, liés aux activités ainsi que l'histoire de l'humanité, notamment les guerres mondiales ainsi que la crise pétrolière des années 1970 :

- Avant et durant la première guerre mondiale, c'est-à-dire 1914 à 1918 : le changement climatique n'a pas encore d'impact direct sur la vie de la population mondiale ;
- Durant la deuxième guerre mondiale, donc de 1939 à 1945 : elle commence à décoller et s'atteler la vie quotidienne de l'être humain ;
- Bien qu'elle soit stable durant les 30 années glorieuses ;
- Elle reprend à redécoller depuis 1975 et l'anomalie de température engendrée par le changement climatique ne cesse plus de s'accroître et perturber, en effet, la condition de vie de l'humanité, notamment au sujet leur de santé.

En effet, de nombreux efforts d'approfondissement intellectuel se focalisent à la fois sur la recherche des moyens techniques, technologiques et matériaux efficaces pouvant remédier et/ou réduire immédiatement ces fléaux. Le graphe 2 ci-après expose l'objectif fixé par la politique mondiale, depuis 2010, à atteindre pour pallier cette catastrophe.



Graph 2: Objectif à atteindre pour réduire le changement climatique mondial

Pour cela, la courbe pleine en bleu montre le réchauffement climatique observé de 1880 à 2010, illustré par le graphe 1 ci-dessus, les courbes en tiret et en pointillés donnent les projections succinctes de réchauffement de 2010 à 2100, selon trois scénarios bien distincts :

- Les courbes 2010-2100 en bleu correspondent à l'hypothèse, tout à fait impossible, que les émissions anthropiques tombent à zéro pour cette année 2020 ;
- La courbe en vert prévoit une forte réduction de ces émissions à effet de serre d'ici 2040 ;
- Les courbes en rouge, sans réduction avant 2060.

Les courbes en pointillés correspondent à une sensibilité modérée du climat, compatible avec l'évolution récente. Tandis que, les courbes en tiret correspondent à une sensibilité très forte.

La capitale de Madagascar n'est pas à l'abri de ces désastres engendrés par l'activité humaine énumérée précédemment, parce qu'actuellement, elle est classée parmi les dix villes les plus polluées de la planète terre.

La conception d'un modèle capable de valoriser les comportements thermiques mesurés, des briques en terre cuite, ainsi que les gains énergétiques gratuits traversant l'enveloppe d'un bâtiment doivent contribuer à diminuer les besoins énergétiques et d'offrir un confort thermique interne admissible. De plus, l'enveloppe du bâtiment, construite avec ce type de matériaux, joue un rôle d'échangeur thermique. Dans cette tâche, elle est possible de gérer et d'adapter les flux thermiques aux environnements intérieurs et extérieurs. Bien entendu, le recours aux appareils consommateurs d'énergies et nuisibles à la santé humaine est alors réduit/évitée, et les énergies ainsi que les moyens naturels disponibles localement sont mieux exploités.

La mise en application des résultats issus de la recherche, avancée dans la présente thèse, est parmi les résolutions non négligeables pouvant réduire ce phénomène de changement climatique accru.

## **OBJECTIF ET INTÉRÊT SCIENTIFIQUE DU SUJET**

L'étude de l'orientation du bâtiment consiste à trouver le meilleur compromis entre confort thermique d'hiver et confort thermique d'été ainsi que les contraintes et l'opportunité du site d'implantation du projet, en répondant aux questions suivantes :

- ☞ Quelles sont les vues les plus agréables ?
- ☞ Vers où, l'orientation la plus profitable aux apports solaires ?
- ☞ D'où viennent les vents dominants ?
- ☞ Y a-t-il des pollutions sonores, olfactives ?

Les réponses à ces questions permettent ainsi de :

- ✓ Limiter l'exposition de l'enveloppe aux radiations solaires tout en maximisant le potentiel pour un éclairage et une ventilation naturelle ; et
- ✓ Récupérer et de réduire au maximum les apports solaires, notamment les rayonnements directs du soleil ;
- ✓ De favoriser un ensoleillement optimal des façades en hiver, de limiter les vitrages à l'ouest qui sont les plus problématiques vis-à-vis du confort d'été, de limiter les effets du vent d'hiver et de permettre une ouverture des fenêtres en été pour profiter de la fraîcheur du soir et de la nuit.

Une fois la meilleure orientation est définie, les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment lui donne une bonne inertie.

L'objectif principal de la recherche, de la présente thèse, est d'étudier les comportements géotechniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka, d'étudier les performances thermiques des murs construits avec ces briques, afin d'identifier l'orientation optimale d'un bâtiment d'habitation naturellement ventilé. Ceci est réalisé en exploitant les différents paramètres bioclimatiques aux alentours du site de construction du bâtiment. L'arrivée à cet objectif mérite des investissements de connaissances et efforts intellectuels très importants, ceux-là constitueront, en effet, une contribution dans l'amélioration de la condition de vie de l'humanité. Dans cette optique, cette étude amène des apports scientifiques importants dans la connaissance, notamment sur :

- ☞ L'argile ainsi que la brique artisanale en terre cuite ;
- ☞ Le concept du confort thermique et l'approche bioclimatique d'un bâtiment ;
- ☞ L'interdépendance entre le corps humain, l'ambiance thermique, les matériaux constituant l'enveloppe de l'espace où il habite, l'environnement dans lequel cet espace est bâti, etc., qui constituent l'équilibre thermique d'un individu.

La première connaissance a l'avantage sur : (i) la recherche de l'amélioration de la production et la contribution à la promotion des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, tout en suggérant de mettre en pratique les méthodes géotechniques, pour déterminer l'argilogité, la teneur en eau naturelle, ainsi

que l'indice de plasticité optimale des matériaux, liés au processus de fabrication. Ceux-là dans la perspective d'atteindre la qualité ainsi que la performance thermique optimale des briques produites ; (ii) d'inciter, en effet, les briquetiers à normaliser, géotechniquement, leurs produits dans la création d'un laboratoire.

Tandis que, les deux dernières connaissances ont le privilège dans : (i) la liaison entre théories et l'expérimentation avancées ; et (ii) l'encouragement des chercheurs, dans le domaine de la géoénergie, à réfléchir sur :

- La mutation entre la méthode de recherche traditionnelle : modélisation et mesures physiques externes utilisant des matériaux et matériels ayant un coût très élevé, à la fois nécessitant beaucoup de temps et difficile à mettre à jour ; et
- L'exploitation de la nouvelle technologie de l'informatique : modélisation sur un écran pouvant optimiser le temps de recherche, offre des diversités, d'efficacités des résultats et la possibilité de reconstruction du modèle dans un plus bref délai pour le mettre à jour autant que besoin.

L'analyse menée dans la présente thèse, notamment : sur l'argile, c'est l'estimation de la performance thermique de l'enveloppe du modèle de bâtiment étudié, la considération des différents apports thermiques (interne et externe) ainsi que les différents paramètres bioclimatiques du site, le traitement des données issues des simulations hygrothermiques, à travers la recherche effectuée, se concentrera donc à la fois sur la résolution des problématiques, annoncées ci-dessus, et de mettre en évidence l'intérêt scientifique du sujet.

## ***HYPOTHÈSES ET MÉTHODE DE RECHERCHE***

Sur la base des contextes ainsi que des problématiques avancés ci-dessus, l'usage des matériaux naturels performants thermiquement, comme les briques artisanales en terre cuite, dans la construction d'un bâtiment d'habitation accompagnée d'une étude d'orientation bien approfondie, vis-à-vis de l'emplacement géographique ainsi que l'environnement naturel du site, procurent de meilleurs avantages sur la gestion de l'écosystème et sur la santé des occupants de ce bâtiment. En effet, la sensation d'un confort thermique par excellence dans un bâtiment édifié avec les briques artisanales en terre cuite et pour participer à l'atteinte de ces objectifs communs de l'humanité, l'hypothèse de la présente thèse s'est basée sur le questionnement principal suivant : « **Quelle est l'orientation optimale d'un bâtiment d'habitation, naturellement ventilé, construit avec les briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka ?** ».

Pour aboutir à la réponse finale de cette question, la démarche adoptée dans cette thèse mettra en application deux méthodes bien distinctes, dont :

- Le procédé analytique pour la première partie ; et
- La Méthode expérimentale pour la deuxième partie.

Dans le procédé analytique, on va explorer dans un premier temps le contexte géographique et géologique de la région d'étude. Ceci permettra de cadrer préalablement le sujet, notamment :

- ☞ La limitation géographique de la région dans laquelle se trouve le projet ;
- ☞ Le climat, qui conditionne journalièrement les situations hygrométrique et climatique corporelles d'un individu, tant dans le territoire où il vit que dans l'intérieur de son bâtiment d'habitation ; et
- ☞ Le relief et le topographique, qui impulsent le contexte environnemental ainsi le microclimatique du site, tels que : la pédologie, l'ensoleillement, le vent, le vallonnement, l'occupation du sol, etc., et conditionnent, en conséquence, la circulation du vent naturel et la température de l'enveloppe, pour les transmettre vers l'espace interne considéré.

Ensuite, dans un deuxième temps, nous allons examiner les encyclopédismes des briques artisanales en terre cuite, en commençant par l'argile, matière première utilisée pour leur construction, notamment leur définition, leurs origines, leurs mécanismes de formation, leurs différents aspects, leurs distinctions par rapport aux autres minéraux, leurs structures, leurs classifications, leurs propriétés géotechniques, leur comportement mécanique et en terminant par l'analyse de leurs principales utilisations dans la vie quotidienne de l'humanité. Cet examen sera suivi des enrichissements ayant un rapport avec les briques artisanales en terre malagasy, et issus des matériaux primaires énumérés ci-dessus. Pour ceux-là, on va les définir d'abord, puis mettre en exergue un bref historique de leurs sources et utilisations ainsi que leur arrivée à Madagascar, l'analyse de leur processus de fabrication autant que la définition de leur norme géométrique et physique selon le TBM, et on va terminer par l'énumération par hypothèse, des principaux avantages de leurs utilisations dans le monde de construction de bâtiment. Ces deux notions, amèneront en effet, à la fin de cette partie des suggestions géotechniques pouvant améliorer à la fois la qualité ainsi que la performance thermique de ces types de matériaux.

Puis, dans le troisième chapitre, on va pousser plus en avant sur le concept du confort thermique d'un bâtiment. Pour cela, on va traiter le sujet en commençant par :

- ☞ La définition de la chaleur en même temps que l'approfondissement du principe de la thermorégulation humaine ainsi que la théorie du confort thermique dans un local d'un bâtiment, notamment :
  - ✚ La signification du confort thermique ;
  - ✚ Les différents enjeux du confort thermique ;
  - ✚ Le mode d'échange thermique d'un corps humain avec son environnement ;
  - ✚ Le bilan des échanges thermiques d'un corps humain ;
  - ✚ Les différents critères pouvant évaluer le confort thermique d'un local ; ainsi que
  - ✚ Les différents paramètres affectant le confort thermique d'un bâtiment, tels que : les facteurs liés à l'individu, les paramètres physiques ainsi que les différents apports thermiques.

- ☞ L'investigation sur la manière d'évolution des températures internes d'un bâtiment, suivie par la méthode de leur estimation ;
- ☞ L'observation des différents impacts d'inconfort locaux sur le corps humain ainsi que les critères nécessaires pour les éviter ; et
- ☞ L'exposé de différents modèles de traitement du confort thermique.

Et puis, on pensera à la liaison entre le confort thermique et l'approche bioclimatique, cette étape est consacrée essentiellement à la prise en considération des hypothèses sur :

- ❖ La signification du mot bioclimatique et son origine ;
- ❖ L'objectif de l'approche bioclimatique ;
- ❖ La conception de l'approche bioclimatique ;
- ❖ L'architecture bioclimatique ; et seront terminées par
- ❖ Les principaux paramètres de base de l'architecture bioclimatique, tels que : le site, la topographie, l'urbanisation, les couleurs de revêtement et la nature des sols d'assises, les paramètres climatiques, les paramètres architecturaux ainsi que le plan de masse.

Les théories exposées dans la partie précédente sont alors mises en pratique, dans la deuxième partie, par voie de la méthode expérimentale de laboratoire, en commençant par l'étude géotechnique des échantillons d'argiles extraits à Ambohitrimanjaka, relative aux suggestions géotechniques avancées dans le deuxième chapitre de la première partie, suivie par l'expertise de la performance thermique des murs façonnés avec lesdits matériaux, et terminée par la simulation du confort hygrothermique du bâtiment, en exploitant les différents paramètres de l'approche bioclimatique, qui conditionne l'environnement géographique et climatique du site. Dans ces conditions :

- ☞ On va identifier d'abord l'argilogité, la teneur en eau naturelle, ainsi que les comportements mécaniques des échantillons d'argiles relevés à Ambohitrimanjaka, respectivement à l'aide de l'essai au bleu de méthylène, de pesage ainsi qu'aux limites d'Atterberg et l'indice de plasticité ;
- ☞ Puis, on évaluera ensuite les performances thermiques des parois du modèle de bâtiment considéré bâti avec les briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka ;
- ☞ Et on entreprendra, enfin, la simulation à l'aide de l'outil de simulation numérique. Ceci étant, initialisé par la définition de l'objectif spécifique de l'étude ainsi que la simulation thermique d'un bâtiment, s'enchaînera avec la justification du choix du logiciel Archicad pour la réalisation de la modélisation et lesdites simulations, la description architecturale du bâtiment, la nature et l'épaisseur nominales de chaque couche constituant les structures composites de la paroi du bâtiment, la définition des blocs thermiques, ainsi que les sources, et planning de ventilation, les apports internes dans chaque pièce du bâtiment, l'environnement relatif au site d'implantation du projet, la caractérisation du sol d'assise et terminés par un reportage des résultats des simulations hygrothermiques du local de bâtiment pour

identifier l'orientation optimale du bâtiment, par l'intermédiaire de traitement des données thermique et hygrométrique, à l'aide des deux modèles différents : celui de l'ASHRAE et de GIVONI.

Les résultats issus de chaque essai, énumérés ci-dessus, seront ensuite validés, analysés et interprétés. Bien évidemment, une conclusion générale sera établie à la fin de cet ouvrage. Ce résumé mettra en exergue, en effet, les aboutissements développés et acquis dans l'ensemble de l'acte de la recherche et cumulés dans le présent ouvrage.

## **STRUCTURE DE LA THÈSE**

L'enrichissement issu du développement du Thème abordé ci-dessus, dans le présent ouvrage, se rapporte, en conséquence, sur deux grandes parties. Chaque partie est ensuite composée de trois chapitres bien distincts, dans lesquels, la première partie :

- ❖ Met en exergue [le contexte géographique et géologique de la région d'étude](#) ;
- ❖ Évoque les connaissances sur [les briques artisanales en terre cuite malagasy](#) ;
- ❖ Renseigne [le concept du confort thermique d'un bâtiment](#).

Et la deuxième partie fournit :

- ❖ [L'argilogité, la teneur en eau naturelle ainsi que les comportements mécaniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka](#) ;
- ❖ Les [performances thermiques des parois du modèle de bâtiment](#), considérées comme maçonneries avec ces matériaux issus du même village ; et
- ❖ Les résultats de [la simulation du confort thermique du bâtiment](#), sur laquelle se fixent les hypothèses retenues, exposent les différents résultats avec leurs analyses, issus des simulations des confort hygrothermiques effectuées au laboratoire pour identifier l'orientation optimale du bâtiment, objet de l'étude.

La structure ainsi que les méthodes de recherche développées ci-dessus sont alors résumées par le diagramme de la figure 1 de la page suivante :

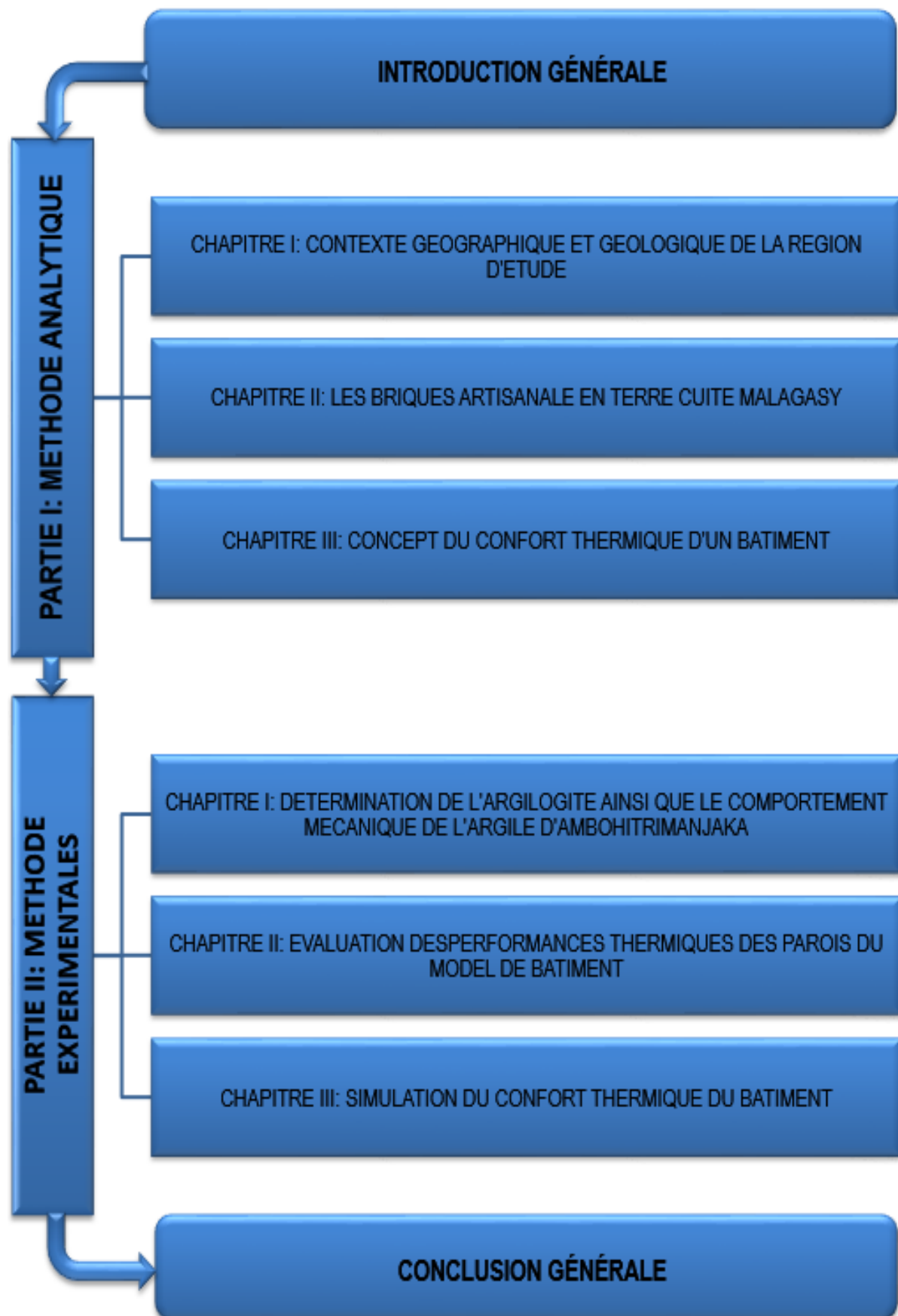


Figure 1 : Diagramme de la structure et méthodologie de recherche de la thèse

# **PARTIE I : PROCÉDÉ ANALYTIQUE**

## CHAPITRE I- CONTEXTES GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Ce présent chapitre traite les traits majeurs de la région d'étude. Il s'agit notamment de la localisation géographique, du climat, du relief et topographie, de l'hydrographie, des sols, de la géologie ainsi que de l'occupation des sols.

### I - LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

La région Analamanga fait partie des Hautes Terres centrales du pays. Située au centre de Madagascar et s'étendant sur une superficie de 17 448 km<sup>2</sup>. Les coordonnées géographiques de la région d'Analamanga sont les suivantes :

- ☞ Latitude : -18,8 ;
- ☞ Longitude : 47,5 ;
- ☞ Altitude : 1 276 m.

Elle est délimitée par 5 régions, à savoir : Betsiboka au nord, Itasy et Bongolava à l'ouest, Alaotra Mangoro à l'est, et Vakinankaratra au sud. Les routes nationales qui la traversent situent son chef-lieu : à 356 km de celui de Toamasina, à 588 km de celui de Mahajanga, à 160 km de celui d'Antsirabe, et puis à 205 km de celui de Tsiroanomandidy.

Antananarivo Renivohitra est la Capitale de la région Analamanga. Elle héberge les dispositifs centraux de l'administration étatique du Pays, les représentants diplomatiques, ainsi que les sièges de la plupart des organismes d'appui et des bailleurs de fonds.

### II - LE CLIMAT

La région d'Analamanga dispose d'un climat tropical d'altitude supérieure à 900 m, caractérisé par l'alternance d'une saison pluvieuse et chaude, entre novembre et avril, avec une saison fraîche et relativement sèche, du mai en octobre. Cependant, chaque ou type de relief et topographie de la région abrite plusieurs microclimats qui peuvent être constatés même jusqu'au niveau des communes, dont :

- ▶ À l'ouest, un sous climat de type tropical d'altitude avec 5 à 6 mois secs dans l'année ;
- ▶ Au centre, un sous climat de type d'altitude avec 4 à 5 mois secs dans l'année ;
- ▶ Au sud-est, généralement sous un climat de type tropical d'altitude, avec 3 à 4 mois secs dans l'année et notant un climat de type de haute montagne du massif d'Ankaratra ; et
- ▶ À l'est, un sous climat de type tropical avec 3 à 4 mois secs dans l'année.

#### II- 1- LA TEMPÉRATURE

Le tableau 1 ci-après donne la température moyenne mensuelle d'Analamanga :

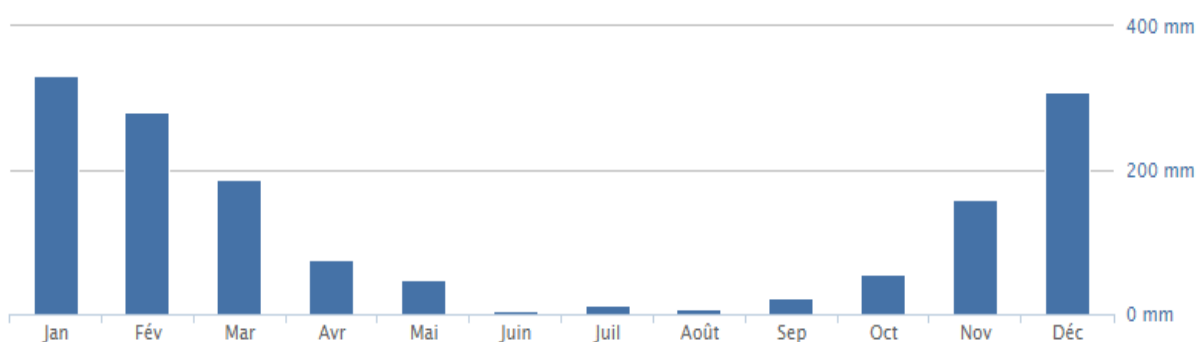
Tableau 1 : Température mensuelle, annuelle, d'Antananarivo

| Température | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Aout | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
|-------------|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|-----------|---------|----------|----------|
| Mini        | 17 °    | 17 °    | 17 ° | 15 °  | 13 ° | 10 ° | 10 °    | 10 ° | 11 °      | 13 °    | 15 °     | 17 °     |
| Maxi        | 27 °    | 27 °    | 27 ° | 26 °  | 24 ° | 22 ° | 21 °    | 22 ° | 24 °      | 27 °    | 28 °     | 28 °     |

La température maximale, de 28 °C, de cette région apparaît au mois de novembre et décembre. Tandis que la plus froide, de 10 °C, est au mois de juin, juillet ainsi qu'au mois d'aout. Dans l'ensemble de la région d'Analamanga, on remarque qu'au fur et à mesure qu'on descend vers le sud, notamment vers la région de Vakinankaratra, on constate une diminution des températures. Le phénomène contraire a lieu quand on se dirige vers l'ouest.

## II-2- LA PRÉCIPITATION

Quant à la pluie, la précipitation la plus importante enregistrée annuellement à Analamanga est une moyenne de 268,6 mm, surtout au mois de décembre et janvier, comme illustre l'histogramme du graphe 3 ci-après :



Graphe 3: La précipitation d'Antananarivo

Plus de 80 % des précipitations annuelles d'Analamanga tombent pendant les saisons chaude et pluvieuse. La pluie fine, moyenne de 3,6 mm, de la saison fraîche, c'est-à-dire les mois de juin, juillet et aout, arrive sous forme de brumes, de brouillards ou de crachins, survient surtout dans la partie orientale de la région. Cette zone fait partie de la zone où il existe une forte précipitation de la région Analamanga. Du fait de ses caractéristiques physiques et topographiques, la région d'Analamanga est moins exposée aux risques de cyclone. Par contre, l'intensité de la pluie pendant la saison humide favorise les inondations dans les parties basses traversées par le fleuve d'Ikopa.

## II-3- L'HYGROMÉTRIE

L'hygrométrie moyenne annuelle enregistrée à Ivato est 74 %, tandis que 72 % pour Arivonimamo. L'humidité relative d'Antananarivo subit des variations saisonnières. L'humidité maximale varie peu au cours de l'année et atteint 95 %. L'humidité minimale est voisine de 55 % en saison de pluies, elle baisse en saison fraîche et atteint la valeur la plus faible, de 40 % à 45 %, en octobre. Le tableau suivant donne la variation de l'humidité relative d'Antananarivo au cours d'une journée.

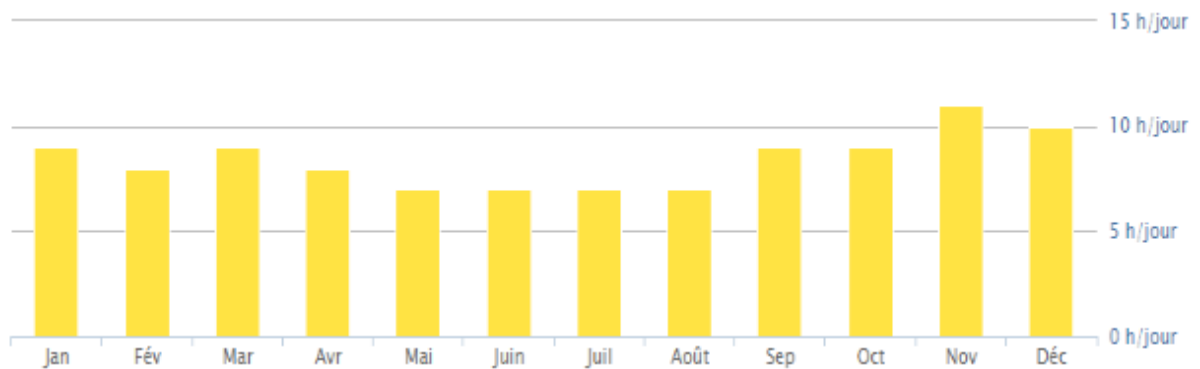
Tableau 2 : Humidité relative d'Antananarivo

| Stations    | 7 heures    | 12 heures   | 17 heures   |
|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Arivonimamo | 80 % à 90 % | 40 % à 70 % | 42 % à 62 % |
| Ivato       | 90 %        | 42 % à 62 % | 47 % à 70 % |

On déduit à partir de ce tableau que l'humidité relative atteint son maximum le matin, son minimum à 12 heures, ce minimum varie suivant la saison. Donc la variation hygrométrique d'Antananarivo dépend à la fois du type de saison et de la course journalière du soleil.

#### II-4- L'ENSOLEILLEMENT

Par définition, les jours avec moins de 20 % de la couverture nuageuse sont considérés comme des jours ensoleillés, avec 20- 80 % de la couverture nuageuse, comme partiellement ensoleillés et plus de 80 % comme nuageux. Le graphe 4 ci-dessous donne l'heure d'ensoleillement moyenne journalière et par mois de la région d'Analamanga.

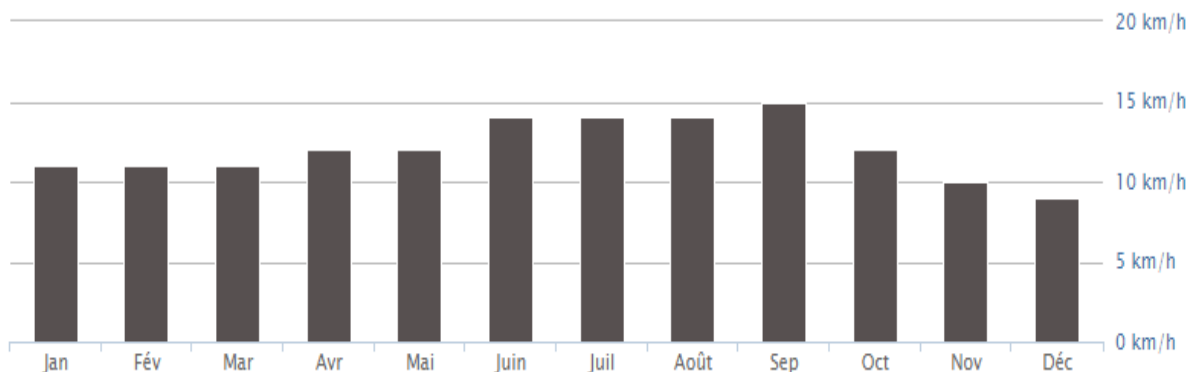


Graphe 4: Heure de soleil par jour d'Antananarivo

L'allure de cet histogramme montre bien qu'il n'y a pas de jour sans soleil à Antananarivo, même si le soleil n'apparaît qu'environ de sept (7) heures durant la période fraîche, en commençant par le mois de mai et se terminera le mois d'août.

#### II-5- LE VENT

Le diagramme du graphe ci-dessous donne la moyenne mensuelle de la vitesse du vent d'Analamanga.



Graphe 5: Vitesse moyenne mensuelle du vent d'Antananarivo

On remarque qu'en générale cette vitesse est comprise entre 10 et 15 km/h (ou 2,77 à 4,16 m/s), sauf le mois de décembre. La rose des vents montre que le vent d'Analamanga souffle soit dans la direction est-nord-est (ENE), soit venant de l'est (E) en majorité, ou bien venant de sud-est (SE).

### III - RELIEF ET TOPOGRAPHIE

La région d'Analamanga fait partie de ce que l'on appelle les hautes terres centrales malgaches. Ayant une superficie de 19 081 km<sup>2</sup> et un relief morcelé dont l'altitude varie de 600 à 1 700 m. En effet par rapport à l'ensemble de l'île, son relief se distingue par trois grands ensembles, à savoir :

- Les hauts plateaux, situés au nord et à l'ouest et dépassant l'altitude de 1 500 mètres, sont séparés par de vastes vallées drainées par deux fleuves : la Betsiboka et l'Ikopa ;
- Le Centre se caractérise par l'escarpement de faille de l'Angavo et le paysage de collines de l'Imerina ;  
et

► À l'ouest, la plaine d'Antananarivo, dont leur aménagement commençait au temps de la royauté Merina. Le district de Manjakandriana est formé par une succession de collines coupées par un chaos de boules granitiques. Cette cascade de dômes s'estompe au niveau du district d'Andramasina.

Au nord, le district d'Ankazobe fait partie du vaste ensemble de Tampoketsa, surface d'érosion monotone, uniforme, interrompue par de larges et longues vallées, suivies par des rivières au fond plat et bordé de forêts-galeries. Par contre, le district d'Anjozorobe (nord-est) présente un paysage, plus ouvert, avec des vallées séparant les tanety.

Au nord-ouest, elle est dominée par le plateau de Tampoketsa. Les vallées y sont moins importantes. Elles deviennent de plus en plus encaissées du plateau jusqu'au fleuve de l'Ikopa et se limitent souvent à des vallons occupés par des forêts-galeries. Vers le sud, ce plateau est relayé par des reliefs rocheux alignés est-ouest en gradins.

Au sud et à l'est, l'altitude diminue et les reliefs deviennent plus accidentés. Des plaines situées aux environs de 1 200 m se distribuent autour des zones habitées ou des cours d'eau : Betsimitatatra, de Manjakandriana à Anjozorobe, Mahitsy, aux environs d'Ambatomanga-Anjeva, d'Ambohimananambola en bordure de l'Ikopa et de ses affluents.

### IV - HYDROLOGIE

La région d'Analamanga dispose d'un réseau hydrographique relativement dense et bien réparti dans l'ensemble de son territoire. Ses plans d'eau (lacs et étangs) occupent une surface de 4 759 ha. Les plus connus en sont les lacs de Mantasoa (1 375 ha) et de Tsiacompaniry (2 333 ha). Situés dans la partie est et qui est la plus arrosée du territoire régional, ces deux lacs constituent donc les principaux réservoirs d'eau de la région :

- Tsiazompaniry est la source de la rivière Ikopa, qui relie Varahina et Sisaony. Ces rivières traversent et drainent entièrement la partie occidentale de la région d'Analamanga. Dans certains endroits, Ikopa montre des lits rocheux ou « bed-rock » régional pour certaines chutes, dont Farahantsana, Andranomafanan'Andriana, Kiangara, etc. La plupart des autres cours d'eaux provenant des autres altitudes dans cette partie rejoignent toujours ce fleuve et en constituent ses affluents dont les rôles sont si importants aussi pour le drainage de la partie occidentale d'Analamanga.
- Mantasoa est le cours d'eau le plus court d'Analamanga, il se dirige vers l'est pour alimenter la majeure quantité d'électricité de la capitale de Madagascar.

## V - PÉDOLOGIE

La grande partie du territoire régional d'Analamanga est couverte par des sols ferrallitiques bruns jaunes développés sur les surfaces d'aplanissement, ou bruns rouges formés à partir des glacis. Ces sols sont d'évolution diverse, allant des argiles latéritiques relativement fertiles jusqu'aux cuirasses bauxitiques du plateau de Tampoketsa. Généralement crevassés et criblés de lavaka, ils sont pauvres, imperméables et difficiles à travailler. Dans la partie orientale correspondant à la zone granitique de Carion (Mantasoa, Manjakandriana, Ambatomanga, Anjeva), les collines sont constituées par des sols plus alumineux tendant vers la bauxitisation ; tandis que les zones basses sont dominées par des sols argileux gris, plus fertiles provenant des sédiments enrichis en permanence par l'altération du granite riche en éléments. Dans les cuvettes, le long de la plupart des cours d'eau est dans des zones soulignées par de grandes fractures comme Mahitsy et Niadiana, on trouve des sols enrichis par les dépôts pluviaux et la crue, souvent hydromorphes et moyennement organiques.

## VI - GÉOLOGIE

Le sous-sol de la région d'Analamanga, en raison de sa situation au niveau de l'axe central de Madagascar, est généralement constitué de :

- Granites et migmatites du Tampoketsa Nord ;
- Néogène lacustre et granites du nord-est ;
- Séries shisto-quartzo-calcaire du sud.

Sur ce sous-sol, les formations diverses se sont constituées par :

- Les massifs quartziques, qui sont des roches sédimentaires (sables) ayant subi une métamorphisation ;
- Les massifs granitiques généralement dispersés sur la bordure occidentale du massif volcanique de l'Ankaratra dans l'ouest et le sud ;
- Les hautes plaines latéritiques ;
- Le relief granito-gneissique épars sur les hautes terres latéritiques ondulées ;

- Les plaines alluviales, suivant le long des fleuves, généralement aménagés en rizières.

Les latérites de la région d'Analamanga sont d'évolution très diverse allant des argiles latéritiques relativement fertiles, jusqu'aux cuirasses ou carapaces bauxitiques des Tampoketsa, imperméables, dépouillées d'éléments utiles, crevassées et criblées de lavaka. Dans l'ensemble, ces types de sols sont compacts, fragiles, difficiles à travailler. Les sols alluviaux n'occupant que des surfaces restreintes, se rencontrent dans les cuvettes ou de part et d'autre du lit de la plupart des cours d'eau et en particulier de l'Ikopa ou dans des zones soulignées par de grandes fractures comme la grande faille de Mahitsy ou celle de Niadiana.

## **VII - OCCUPATION DES SOLS**

La majorité de la surface de la région d'Analamanga est dominée par les savanes arborées et herbeuses. Les mosaïques de culture occupent également une partie très remarquable dans sa superficie. La carte 4 de la page suivante montre la concentration des forêts (primaire, dégradée et reboisée) dans le District de Manjakandriana et dans la partie est de celui d'Anjozorobe. La forêt dense de la partie est de la grande île commence à apparaître dans la côte est de l'ensemble de la région, notamment de l'extrême est du district d'Anjozorobe, de Manjakandriana et celui d'Andramasina. Et enfin, à part les plans d'eau qui occupent une surface de 4 927 ha, les surfaces bâties, quant à elles, sont localisées dans les chefs lieu de district, et plus particulièrement une grande partie des six arrondissements d'Antananarivo Renivohitra, Antananarivo Atsimondrano, Antananarivo Avaradrano et celui d'Ambohidratrimo.

## CHAPITRE II- LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY

Les briques artisanales en terre cuite malagasy, notamment celui d'Ambohitrimanjaka- Antananarivo, sont les principaux matériaux choisis, par hypothèse, dans la construction des parois verticales du modèle de bâtiment d'habitation, objet de l'approfondissement de la présente thèse. En effet, elles sont le centre d'intérêt des connaissances exposées dans le présent ouvrage. C'est pourquoi la connaissance de la théorie relative à ce type de matériaux est incontournable. Mais avant d'entrer au vif du sujet, nous allons orienter d'abord nos études sur l'argile, matière première utilisée pour la construction des briques artisanales en terre cuite, particulièrement : leurs origines, leurs mécanismes de formation, leurs aspects, leurs minéraux, leurs constituants physiques, leurs propriétés géotechniques, et enfin les principales utilisations de l'argile.

### I - LES ARGILES

#### I-1- INTRODUCTION

Depuis plus de 9 000 ans, l'argile est devenue le compagnon de l'Homme, et est utilisée pour l'aménagement de son habitat et son lieu de vie. Depuis cette époque, ce matériau est déjà connu par sa qualité, sa longévité et son manque de toxicité.

En raison de leur mode de genèse, plus souvent la pédogenèse et l'altération d'horizons, les argiles sont en général, des matériaux polyphasiques constitués à la fois de phases minérales et organiques.

Les sols mêmes sont des matériaux argileux, dont leurs minéralogies dépendent du climat, de la nature des matériaux sources, ainsi que de la topographie du site, etc.

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés, sous forme de très petits cristaux, en plaquettes hexagonales ou parfois en fibres.

Grâce à sa qualité unique, l'argile est un matériau de construction bien distingué aux autres. De plus, ce type de matériau est facile à manipuler. Les matériaux de construction et produits modernes à base d'argile offrent aujourd'hui de nombreuses possibilités d'usage, y compris les briques artisanales en terre cuite, à cause de leur capacité d'absorber et de libérer l'humidité, donc d'offrir un confort thermique plus ou moins stable dans un local.

#### I-2- DÉFINITION

D'après le Petit Larousse, l'argile est une « Roche sédimentaire terreuse, imperméable, formée surtout de silicates d'aluminium, et qui imbibée d'eau devient malléable ». Au quotidien, le terme argile désigne soit le minéral argileux lui-même soit une roche composée pour l'essentiel de ces minéraux.

Du point de vue géotechnique, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à  $4\ \mu$ . La limite de taille de  $2\ \mu$  constitue un héritage historique : les particules de moins de  $2\ \mu$  ne sont plus

visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et en déterminer la nature à l'aide de méthodes basées sur la diffraction des rayons X.

La nature des argiles a une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau. En effet, les particules d'argiles sont très plates et leur surface spécifique est très grande. Des anions  $\text{OH}^-$  et  $\text{O}_2^-$  sont repartis sur la périphérie des particules, les bords sont donc fortement chargés négativement et attirent des charges positives. Comme les molécules d'eau sont polaires, ainsi, il peut y avoir attraction et adsorption de molécules d'eau à la surface des particules. Plusieurs couches des molécules d'eau peuvent ainsi être adsorbées. En raison de leurs orientations particulières, ces molécules ont des propriétés physiques différentes de celle de l'eau normale, comme sa viscosité est élevée, son élimination est plus difficile par traitement thermique :  $200\text{ }^\circ\text{C} < T < 300\text{ }^\circ\text{C}$ .

### I-3- ORIGINE DE L'ARGILE

Les argiles sont d'origine sédimentaire, issues de la décomposition chimique de roches silicatées comme les gneiss, les granites, les schistes ainsi que les laves. Dans ces conditions, les roches silicatées ou massives montagneuses s'érodent ou s'altèrent en fragment de roches et se désintègrent dus aux intempéries, notamment à l'action de l'eau et du gaz carbonique. Les différents éléments résultants de la décomposition tels que les sables et l'argile, illustrés par la figure 2 ci-contre, sont ensuite transformés sous forme de vases et de limons. Ces matériaux sont alors transportés par les cours d'eau jusqu'aux zones de sédimentation comme les lits de rivières, les lacs, les lagunes, les mers, grands fonds océaniques, etc. Ainsi les dépôts présents dans ces grandes étendues d'eau forment par sédimentation une roche argileuse. La transformation effective des vases en argiles se fait par compaction<sup>1</sup>, déperdition de l'eau de constitution et augmentation de la densité : c'est la diagenèse<sup>2</sup>.

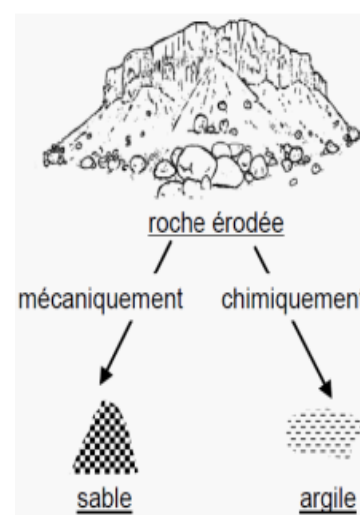


Figure 2 : L'origine de l'argile

### I-4- LE MÉCANISME DE FORMATION DE L'ARGILE

En général, les argiles sont d'origines des trois formations des minéraux argileux, dont : l'héritage, les transformations ainsi que les néogènes.

<sup>1</sup>Fait de devenir compacté

<sup>2</sup>Ensemble des transformations physiques et chimiques qui conduisent à la roche sédimentaire

#### I-4-1- L'héritage

Dans ce cas, les minéraux argileux présents dans une roche sont libérés en état intact par altération et sans modification. Les argiles formées ainsi, résultantes de la formation détritique sont ensuite cumulées dans le sol. Ce type de processus de formation des minéraux argileux ne se produit que rarement.

#### I-4-2- Les transformations

Les minéraux formés, cités ci-dessus, subissent des réarrangements de leurs réseaux silicatés, sans destruction complète de leur organisation précédente. Ils s'évaluent ensuite vers un nouvel état d'équilibre, avec les conditions locales du milieu dans lesquelles ils sont incorporés. On distingue, dans ces transformations la dégradation, c'est-à-dire les processus allant dans le sens de l'altération, autrement dit, de l'apparition d'une structure cristalline moins régulière, et d'une perte de substance. Le processus inverse porte le nom d'aggradation, et se rencontre dans les systèmes sédimentaires.

#### I-4-3- Les néogènes ou authigènes

C'est un mécanisme de réorganisation complète de la structure cristalline de l'argile, formée à partir de certains silicates, comme les amphiboles, les péridots, ou les feldspaths.

### I-5- LES DIFFÉRENTS ASPECTS DES ARGILES

À l'état naturel, les argiles ont des couleurs diverses, selon leurs principales compositions :

- La coloration brune est due à la présence de limonite ;
- La coloration rouge à celle de peroxyde de fer, qui contient plus d'Oxygène que d'Oxyde normal ;
- La coloration noire à celle de bioxyde de manganèse ou de lignite ;
- La coloration verte- claire, à celle de glauconie, de pyrite ou de sel de strontium ;
- La coloration violette, identique à lie de vin, à celle des matières organiques.

Ce sont des roches plastiques riches en alumine et plus ou moins hydratées, imperméables<sup>3</sup> et résistantes quand elles sont imbibées d'eau. Par contre, si on laisse dans une atmosphère sèche une pâte d'argile et d'eau, celle-ci s'évapore progressivement et il y a diminution du volume de la pâte argileuse pendant cette dessiccation, effet immédiat de la plasticité, ce phénomène s'appelle « retrait ». La pâte sèche ainsi obtenue forme une masse résistante, d'une plus grande densité apparente. Et quand on cuit l'argile au four, dès qu'elle est soumise à une température légèrement supérieure à 100 °C, l'eau hydrique s'élimine et vers 400 °C, l'hydrosilicate d'alumine commence à se décomposer. Cette décomposition a pour conséquence la désagrégation des cristaux et la perte définitive de leurs propriétés plastiques. En

---

<sup>3</sup>Elles font obstacle à l'infiltration de l'eau et permettent la formation de nappes phréatiques ; elles peuvent également interrompre la remontée du pétrole vers la surface et favoriser sa concentration dans des « pièges ». Enfin, la structure en feuillets et la plasticité des argiles peuvent, dans certaines conditions, être la cause de glissements de terrain.

continuant à élever la température vers 700 à 800 °C, la silice commence (point quartz) à se combiner avec l'alumine pour donner naissance à un bisilicate d'alumine anhydre. Cette combinaison se poursuit lentement dans la mesure où la température augmente et a pour effet de resserrer les grains de l'argile primitive. Vers 1 100 à 1 200 °C, la masse de l'argile est devenue compacte. Le silicate d'alumine ainsi formé est un corps dur, amorphe, qui constitue l'élément essentiel de tous les produits céramiques, ce phénomène de durcissement est une façon irréversible sans broyage.

La particularité de chaque argile<sup>4</sup> ainsi que la condition de cuisson déterminent la couleur de l'argile cuite, du blanc ou du rose au noir en passant par toutes les nuances : jaune, rouge, brun, plus rarement vert ou bleu, etc.

Les roches argileuses existent presque partout dans la surface de la Terre, mais toutes ne sont pas identiques, leurs propriétés ainsi que leur composition diffèrent suivant les conditions géologiques dans lesquelles elles se sont formées, telles que :

- ▶ Les conditions climatiques et cosmiques comme le vent, la pluie, la neige, la constitution et retrait des glaciers, le gel et dégel, les marées ;
- ▶ La topographie des sites qu'elles traversent : transport des roches de l'amont vers l'aval sur les versants montagneux ;
- ▶ Les roches d'origine dont elles sont issues : basalte, granite...

## I-6- DISTINCTION DES MINÉRAUX ARGILEUX

Les argiles sont des mélanges de minéraux argileux. Ainsi, on peut les distinguer :

- ▶ D'après les minéraux associés : argilites calcaires ou marnes, marnes dolomitiques, argilites sableuses, marnes sableuses, saieps sableux, marnes à gypse, etc. ;
- ▶ D'après le faciès : argilites bigarrées, marnes rubanées, argiles à varves, argiles plastiques, argiles à silex, etc.
- ▶ D'après la matière organique contenue : marnes à foraminifères, shales à poissons, argilites à plantes, shales bitumineux, etc. ;
- ▶ D'après son usage par l'homme : argiles réfractaires, marnes à ciment, argiles smectiques comme la terre à foulon, les bentonites, argiles à dégraisser, etc.

## I-7- STRUCTURES DES MINÉRAUX ARGILEUX

Avant d'étudier les différentes structures des minéraux argileux, nous allons définir d'abord quelques vocabulaires associés et propres aux structures des minéraux argileux :

---

<sup>4</sup>Teneur en oxydes métalliques.

- Le terme plan correspond à un plan d'atomes ;
- Une couche est formée par l'empilement de plans associés. Par exemple : les argiles sont formées de couches tétraédriques et octaédriques ;
- Un feuillet est un empilement articulé de couches. Par exemple : un feuillet 1 : 1 est composé d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, un feuillet 2 : 1 est composé d'une couche octaédrique située entre deux couches tétraédriques ;
- L'espace interfoliaire est l'espace entre les feuillets : il peut être vide, mais il contient souvent des cations, secs ou hydratés, des groupes hydroxylés ou des couches d'hydroxyles. Et enfin,
- Une unité structurale désigne l'association d'un feuillet et d'un espace interfoliaire.

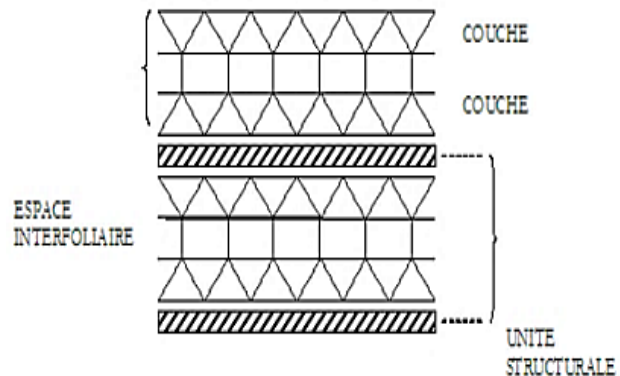


Figure 3 : Schématisation des différents termes propres aux argiles  
[Caillere et al. ,1982]

La figure 3 ci- contre illustre la structure des argiles associées aux termes décrits ci-dessus.

Les minéraux argileux sont appartenus au groupe de phyllosilicates, il s'agit ainsi de minéraux silicatés, apparaissent sous forme de lamelles, suite à l'empilement de feuillets élémentaires.

Chaque feuillet élémentaire résultat d'un arrangement d'un certain nombre de plans anioniques (O, OH), qui fait apparaître des cavités, soit de type tétraédrique, soit de type octaédrique. Ces cavités sont associées de manière homogène et de façon planaire, conduisant à l'individualisation des couches qui sont soit tétraédriques, soit octaédriques :

- La couche tétraédrique est formée de silice tétraédrique : d'un cation  $\text{Si}^{4+}$  entouré de quatre anions  $\text{O}^{2-}$ , qui constituent les sommets du tétraèdre. Chaque tétraèdre partage trois atomes d'oxygène avec les tétraèdres adjacents. Ces atomes d'oxygène partagés sont arrangés en réseau hexagonal qui constitue la base de la couche. En effet, chaque tétraèdre est formé d'un cation  $\text{Si}^{4+}$  et de trois anions  $\text{O}^{2-}$  qui forment la base du feuillet et qui appartiennent aussi à un tétraèdre adjacent, et d'un quatrième anion  $\text{O}^{2-}$  qui lui n'est pas partagé. Le bilan de charges de cette couche est alors :  $4 + 3 \cdot (-2) / 2 + (-2) = -1$ . L'électroneutralité de la couche est obtenue par la liaison avec une couche chargée positivement, par la présence d'ions compensateurs à la surface de la couche, ou par ajout d'un proton [Mitchell ,1976]  $\text{H}^+$  sur certains  $\text{O}^{2-}$ . L'épaisseur de cette couche tétraédrique est de 4,63 Å.
- La couche octaédrique est formée de cations  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$  entourés de six groupements hydroxyles  $\text{OH}^-$ . Ces octaèdres sont reliés entre eux par des anions communs et forment une couche plane. Le bilan des charges présentes dans le feuillet, illustré par la figure 04 ci- dessous, est de +3 pour le cation  $\text{Al}^{3+}$  et -1 pour le groupement hydroxyle, mais chaque  $\text{OH}^-$  est partagé avec trois cations, ce qui donne : +3

+ 6.  $(-1) / 3 = +1$ . Pour atteindre l'électroneutralité, seulement deux sites octaédriques sur trois sont occupés par un cation  $\text{Al}^{3+}$  ; on parle alors de couche dioctaédrique de gibbsite. Dans le cas du cation  $\text{Mg}^{2+}$ , lorsque tous les sites sont occupés, la couche est neutre ; c'est la structure tri- octaédrique de brucite [Mitchell, 1976]. La couche octaédrique a une épaisseur de 5,05 Å.

La figure 4 suivante illustre la présentation de ces deux couches énumérées ci-dessus :

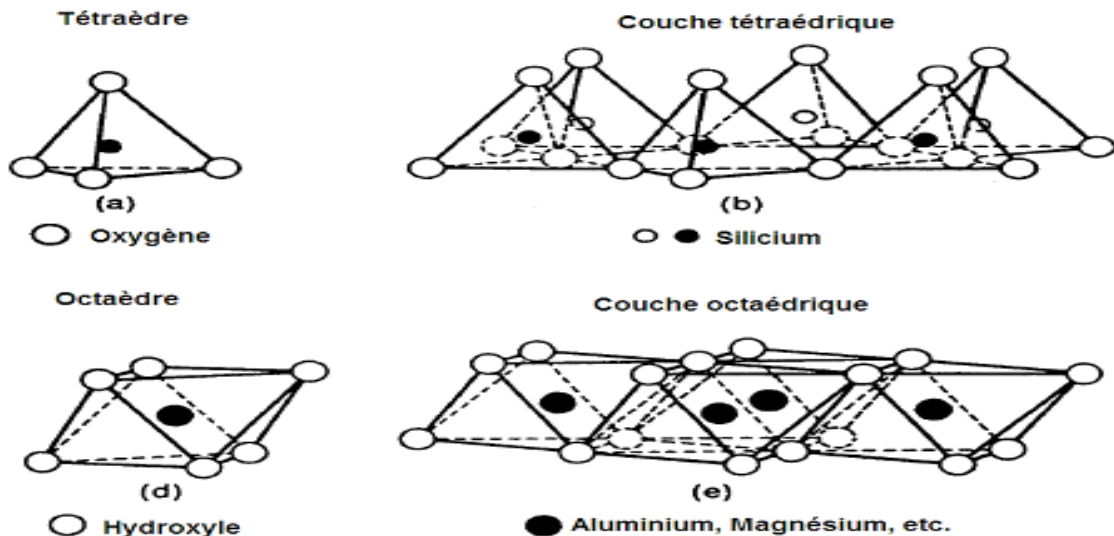


Figure 4 : Représentation des tétraèdres de silicium et des octaèdres d'aluminium ou magnésium ainsi que de leur agencement en couches [Grim ,1968]

Les couches tétraédriques (T) et les couches octaédriques (O) forment des feuillets. Elles sont séparées par des espaces interfoliaires pouvant contenir des molécules d'eau et des ions, comme illustre la figure 5 ci- contre. L'association d'un feuillet avec l'espace interfoliaire forme une unité structurale. Ces unités s'agencent entre elles pour former des particules argileuses.

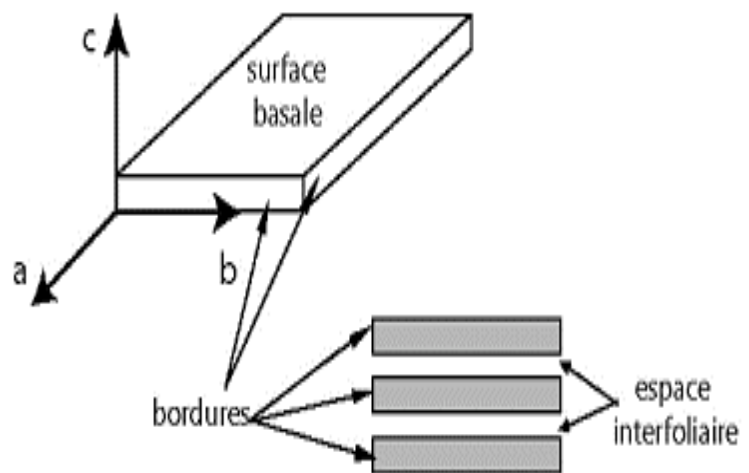


Figure 5 : Illustration de l'empilement des feuillets d'argile [Viallis-Terrisse ,2000]

La liaison entre une couche tétraédrique et une couche octaédrique se fait par l'intermédiaire du quatrième oxygène de la silice tétraédrique, qui appartient à un octaèdre du feuillet octaédrique.

### I-7-1- Organisation des feuillets

Les cristallites élémentaires de minéraux argileux s'organisent pour former le matériau argileux. La structure du matériau organisé et obtenu dépend essentiellement de la composition minéralogique, de la

forme des cristallites, de la composition de l'eau interstitielle ainsi que les conditions des milieux dans lesquelles la formation a été réalisée.

Il existe différentes structures provenant de la variation des propriétés de surface, charges, interactions fluides/particules et particules/particules, de ces matériaux argileux. Parmi ceux, Van Olphen [1977] relate les quatre cas, illustrés dans la figure 6 ci-contre, à savoir : (a) la dispersion de particules, (b) agrégation face à face, (c) le défoulement, c'est-à-dire pas de contact entre les particules, ainsi que (d) la floculation, dans laquelle les particules étant alors en contact bord/bord ou bord/face.

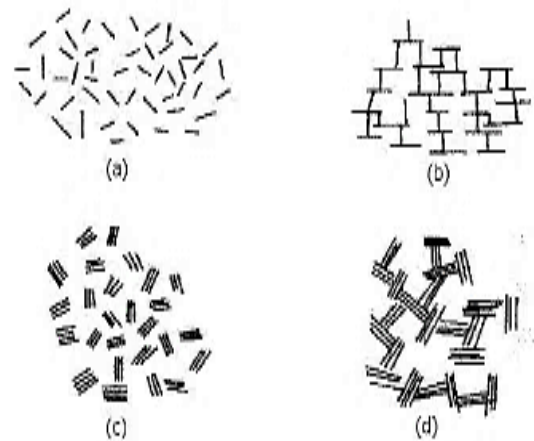


Figure 6 : Organisation des feuillets des matériaux d'argiles

Ces différents types d'arrangement présents au sein des suspensions se retrouvent dans les argiles compactes, les particules s'arrangent en agrégats, et parfois même, les agrégats peuvent s'arranger entre eux.

### I-7-2- Les niveaux des porosités des matériaux d'argiles

Le niveau d'organisation correspond quatre niveaux de porosités, comme illustre la figure 7 ci-après, à savoir :

- ☛ La porosité inter- particule ;
- ☛ La porosité intra- assemblage ;
- ☛ La porosité inter- agrégat ; et
- ☛ La porosité inter- assemblage.

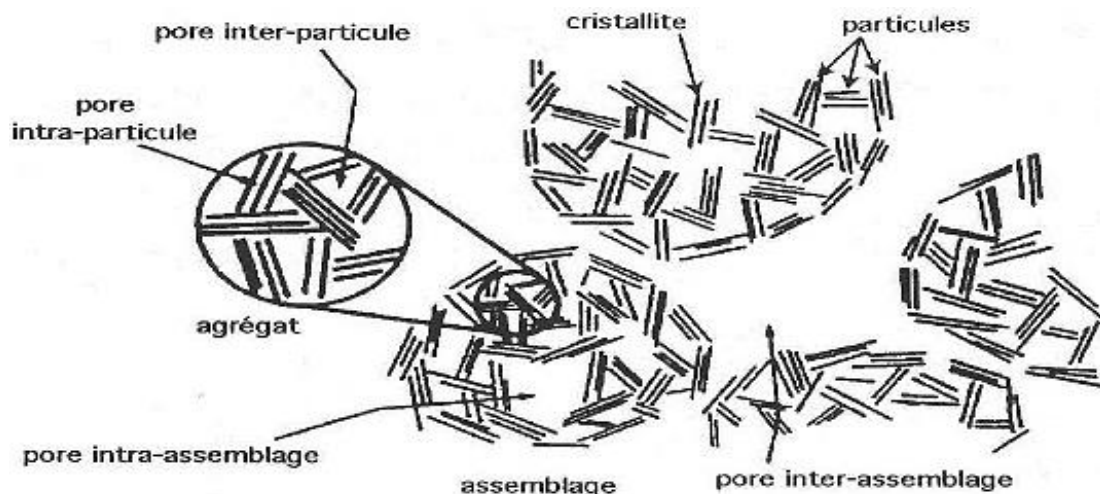


Figure 7 : Les différents niveaux de porosité des matériaux d'argiles

Dans le cas de la porosité inter- particule, seules les molécules polaires ont accès à l'espace interfoliaire, dont sa largeur est comprise entre 2 et 10 Å. Ces molécules constituent l'eau d'hydratation des cations. Cette porosité est influencée par le champ électrique et est fortement liée, ainsi ses propriétés sont très différentes de celles de l'eau libre, car elle est moins mobile. Stepkowska [1990] affirme que cette eau est susceptible de se déplacer le long des surfaces des feuillets, mais pas dans une direction perpendiculaire. Pour la porosité intra-agrégats ou intraparticule, la porosité existe entre les piles de feuillets adjacents, dans les particules primaires. Cette porosité est aussi appelée porosité lenticulaire ou micro- porosité. Les doubles couches diffuses se développent dans ces pores. L'eau qui forme en partie les couches diffuses est adsorbée et ne peut pas détachée de l'argile, sauf si la distance entre les particules est suffisamment importante.

Et pour la porosité inter- agrégats, l'eau est retenue par des forces de capillarité à l'aide de ces pores, de dimensions supérieures à 0,002 µm, et elle est appelée eau « externe », par opposition à l'eau contenue dans le reste de la porosité qui est appelée « eau interne ».

## I-8- CLASSIFICATION DES MINÉRAUX ARGILEUX

Les structures des minéraux argileux sont caractérisées par la superposition de feuillets, composées de couches tétraédriques : couches T de  $[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]^{6-}$ , et de couches octaédriques : couche O à base d'octaèdres de brucite  $\text{Mg}[\text{OH}]_2$  ou de gibbsite  $\text{Al}[\text{OH}]_3$ . Les feuillets sont des types TO ou TOT, et entre elles se placent différents cations  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . Les minéraux argileux sont ainsi classés en différents groupes, suivant le type de feuillets et le type d'empilement. On distingue deux grands groupes, illustrés par la figure 8 suivante :

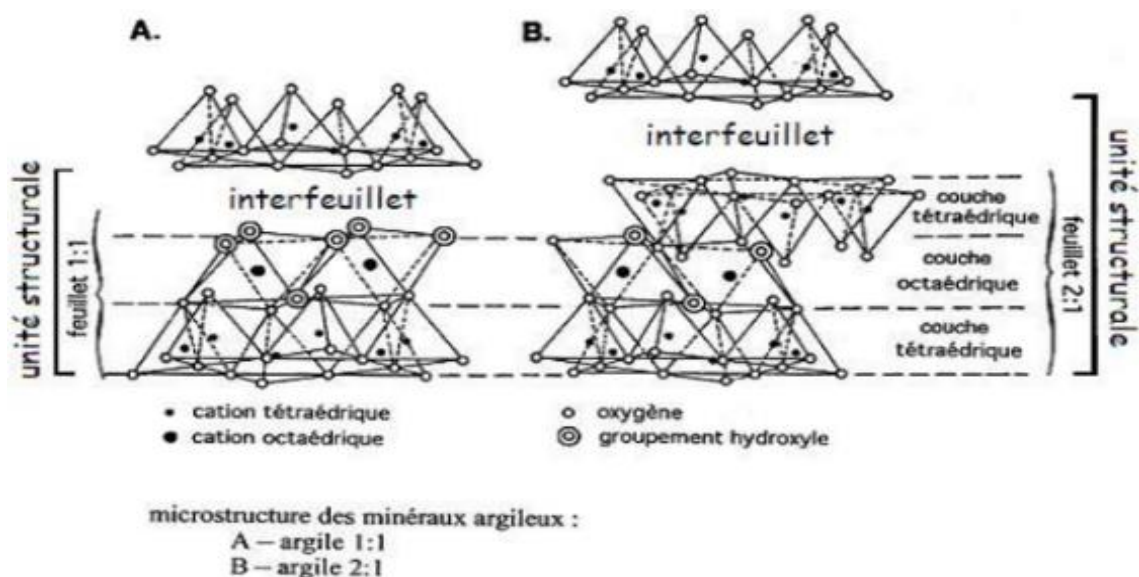


Figure 8 : La microstructure des minéraux argileux de type 1 : 1 et 2 : 1 [Grim ,1986]

### (i) Les argiles 1 : 1, caractérisées par des empilements de feuillets TO :

Les minéraux argileux de ce type sont caractérisés par :

► Une distance basale comprise entre 7,1 et 7,4 Å ;

► Un motif élémentaire formé par un empilement de trois plans anioniques : X (atomes d'oxygène, base des tétraèdres  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ), Y (atomes d'oxygène et hydroxyles internes) et Z (hydroxyles externes) et de deux plans cationiques [BERGAYA F. et Al., 2006], comme présente la figure 9 ci- contre :

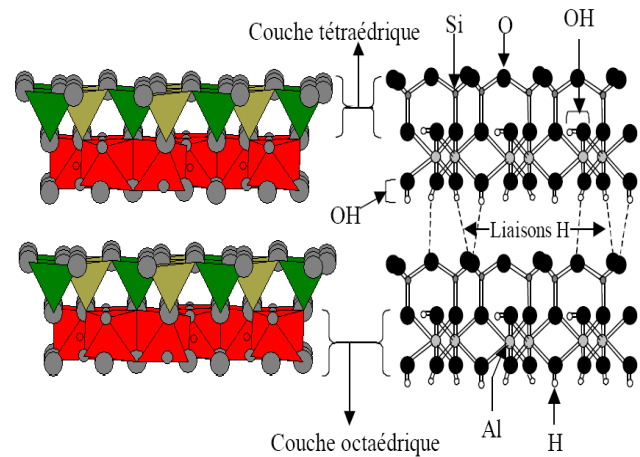


Figure 9 : Structure des minéraux 1/1 (exemple de la kaolinite)

Les liaisons Si- O ont un caractère covalent plus accentué que les liaisons Al-O dont la composante ionique est marquée. Les feuillets sont liés entre eux par des ponts d'hydrogène et des forces d'attraction de Van der Waals. Certains auteurs envisagent la possibilité d'une attraction électrostatique entre les deux surfaces basales des feuillets dont la polarité pourrait être opposée, du fait de substitutions cationiques [WIECKOWSKI T. et WIEWOVA A. ,1976 ; ZAMMA M. ,1984 ; CARTY W.M. ,1999].

#### (ii) Les argiles 1 : 2, caractérisées par des empilements de feuillets TOT :

Les feuillets de ces minéraux sont formés par deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique, comme montre la figure 10 ci-dessous. Le minéral représentatif de ce groupe est la muscovite. Ce minéral s'apparente à la phlogopite, mais présente des substitutions tétraédriques : le silicium est remplacé par l'aluminium et le déficit de charge est compensé par l'introduction du potassium ( $\text{K}^+$ ) dans l'espace interfoliaire [CAILLÈRE S. et Al., 1982 ; BERGAYA F. et al. ,2006].

Des substitutions cationiques sont observables au sein de ces minéraux 1 : 2 :

- ✓ Les ions  $\text{Si}^{4+}$  peuvent être remplacés par  $\text{Al}^{3+}$  et/ou  $\text{Fe}^{3+}$  dans les couches tétraédriques ;
- ✓ Les ions  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Mn}^{2+}$  peuvent se substituer aux ions  $\text{Al}^{3+}$  dans les couches octaédriques ;
- ✓ Dans les sites octaédriques,  $\text{Li}^+$  peut aussi remplacer  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ .

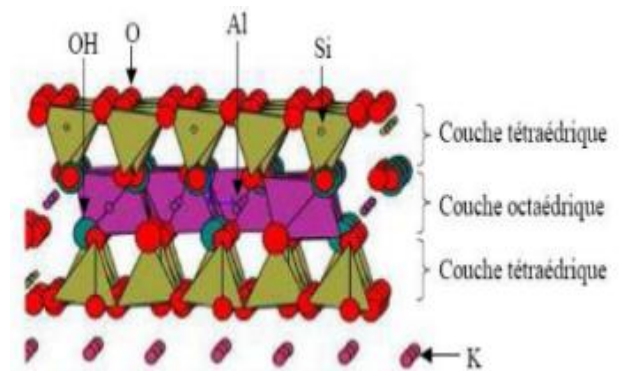


Figure 10 : Structure idéale des minéraux 2/1

Ces substitutions engendrent un déficit de charge compensé par l'intercalation de cations comme  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  dans l'espace interfoliaire qui peut accueillir des quantités variables d'eau pour hydrater ces cations.

Parmi les minéraux argileux, on peut citer :

- La Kaolinite<sup>5</sup>  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ , a des feuillets de 0,7 nm, à deux couches. Elle est fréquentée dans les roches argileuses résiduelles ou détritiques, provenant de l'altération des roches acides riches en feldspaths, comme les granites ;
- L'illite<sup>6</sup>  $\text{K}_x\text{Al}_2[\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ , a des feuillets de 1 nm, à trois couches. Ses caractéristiques minéralogiques sont proches de celles de micas, d'où l'existence d'intermédiaires illite-mica blancs : Minéral le plus commun des argiles ;
- Les smectites<sup>7</sup>, comme la montmorillonite et la beidellite, ont des teneurs variables en Na, Al, Fe, Mg, en feuillets à trois couches, de 1,4 nm, valeur qui varie en fonction de leur teneur en eau.

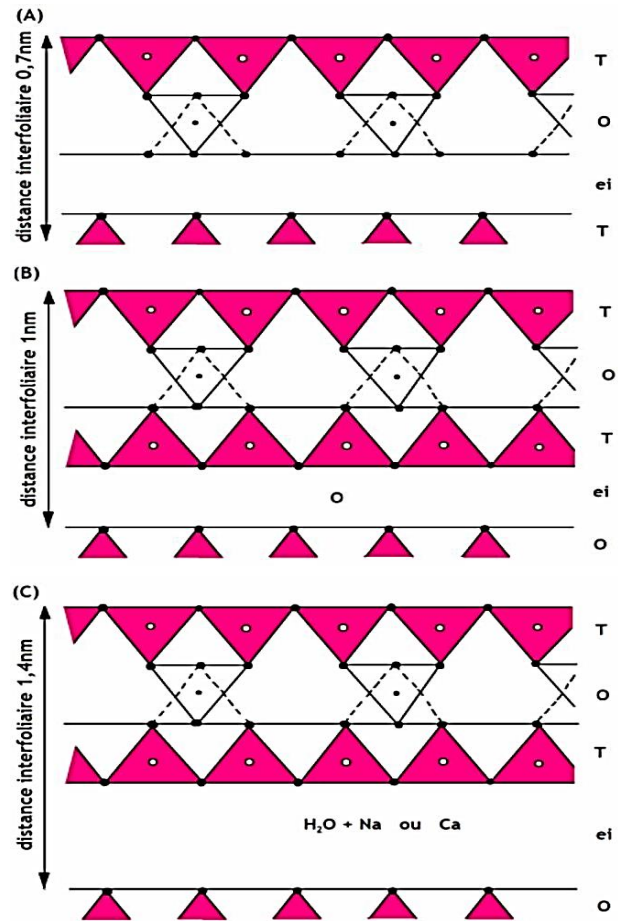


Figure 11 : Représentation schématique des structures des minéraux [G. Millot, 1964]

La figure 11 ci-dessus décrit la structure (projection sur un plan perpendiculaire aux feuillets) de trois minéraux cités précédemment. Dans cette figure : A désigne la kaolinite, B l'illite, C la montmorillonite, O la couche d'octaèdres d'atomes d'oxygène avec un aluminium au centre, T la couche de tétraèdres d'atomes d'oxygène avec un silicium au centre et ei l'espace interfoliaire où peuvent se placer divers cations.

- La glauconite<sup>8</sup>  $(\text{K}, \text{Na})_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}, \text{Mg})_4[\text{Si}_6(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_{20}](\text{OH})_4$ , à feuillets de 1 nm, et qui compose la glauconie ;
- Les interstratifiés (dits aussi minéraux argileux interstratifiés) sont formés par alternance, plus ou moins régulière, de feuillets de natures différentes, par exemple illite-montmorillonite, illite-chlorite, etc. ;

<sup>5</sup>Minéral blanchâtre translucide, silicate d'alumine hydratée, de système triclinique ou monoclinique

<sup>6</sup>Minéral argileux potassique se présentant sous une forme feuilletée

<sup>7</sup>Argile smectique : argile servant à dégraisser la laine

<sup>8</sup>Silicate naturel hydraté de fer et de potassium, de couleur vert foncé

- La vermiculite<sup>9</sup> est proche des smectites, mais si on la chauffe, elle augmente de volume, jusqu'à 20 fois, et s'exfolie en filaments ou vermicules ;
- Le chlorite<sup>10</sup> présente des feuillets de 1,4 nm, ayant trois couches, les smectites et les vermiculites sont les chlorites gonflants, à feuillets d'épaisseurs variables.

La classification de ces différents minéraux argileux est illustrée dans la figure 12 ci-dessous.

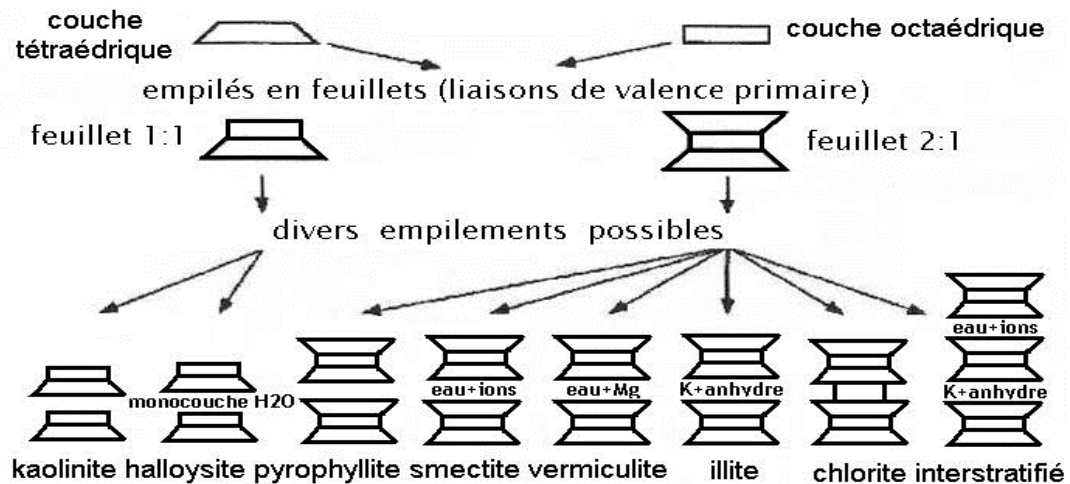


Figure 12 : Classification des différents minéraux argileux par leur structure [Grunberger (1995)]

L'empilement des plans d'anions oxygène O ou hydroxyle OH délimitent les cavités tétraédriques et octaédriques de chaque volume. Les cations de nature différente et ayant de taille voisine peuvent se localiser dans les diverses cavités sans apporter la modification fondamentale de la structure. On parle alors de substitution isomorphe, car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées :

- ✚ Les cavités tétraédriques peuvent être remplies par des cations tels que  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$  ;
- ✚ Les cavités octaédriques, qui sont plus grandes, sont occupées soit par des cations trivalents ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), soit par des cations divalents ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , ou même  $\text{Li}^{2+}$ ).

## I-9- CONSTITUANTS GÉOTECHNIQUES DE L'ARGILE

Géotechniquement, comme tous les autres types de sols, les argiles aussi sont constituées par de trois phases, comme illustre la figure 13 ci- dessous, dont :

- Une phase solide sous forme de grains : composés par des sols fins ou sols cohérents inférieurs à 20  $\mu\text{m}$  avec cohésion, ayant un comportement très différent en fonction des teneurs en eau : état solide, plastique ou liquide ;

<sup>9</sup>Silicate complexe, de la famille des micas, utilisé comme isolant thermique

<sup>10</sup>Minéral vitreux verdâtre ou incolore, de système monoclinique, de la famille des phyllosilicates, composé de magnésium, d'aluminium, de fer, de silicium et d'aluminium

- Une phase liquide : (i) eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant. Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense, c'est-à-dire supérieur à 300 °C ; (ii) eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100 °C ;
- Une phase gazeuse ou air : l'argile est saturée lorsque les vides sont remplis.

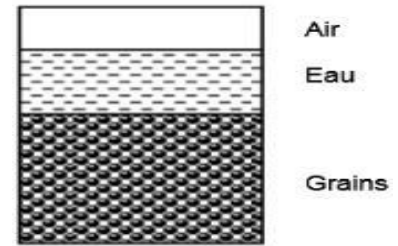


Figure 13 : Les différentes phases d'un sol

On remarque que le squelette solide est l'élément essentiel dans l'argile. Il influe donc de façon considérable sur le comportement des sols, et notamment les sols à forte proportion granulaire. La proportion d'eau est importante à considérer, notamment dans le comportement des sols fins.

Les teneurs en eau des argiles dans l'état naturelles sont :

- ☞ 20 à 30 % : Pour l'argile moyenne et raide ; et
- ☞ 50 à 100 % : Celui de l'argile molle.

[La teneur en eau naturelle de l'argile d'Ambositrimanjaka](#) destinée pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite dudit village sera déterminée dans le chapitre I de la deuxième partie du présent ouvrage.

## I-10- PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE L'ARGILE

À l'œil nu, les propriétés données par le tableau 3 suivant différencient les argiles par rapport aux autres types des sols :

Tableau 3 : Différences entre les argiles par rapport aux autres terres

| Argile                                                                                                                                                                                                                                 | Autres terres                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Très dure quand elle est sèche ;</li> <li>- Molle et collante quand elle est mouillée ;</li> <li>- Se rétracte et se fend en séchant ;</li> <li>- Garde sa forme quand elle sèche.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Friables quand elles sont sèches ;</li> <li>- Ne collent pas quand elles sont mouillées ;</li> <li>- Ne se fendent pas en séchant ;</li> <li>- Ne gardent pas leur forme quand elles sont sèches.</li> </ul> |

Dû aux propriétés suscitées, géotechniquement les argiles ont trois grandes caractéristiques, dont :

- ✓ Une déformabilité élevée (en fonction de la charge appliquée et du temps) : souple et plastique quand elles sont soumises à des contraintes ;
- ✓ Une faible perméabilité (qui varie avec les déformations du sol) : L'absorption d'eau grâce à leur texture en feuillets qui leur permet d'emprisonner les molécules d'H<sub>2</sub>O, d'où le gonflement et l'imperméabilité ;
- ✓ Une résistance limitée (qui croît en général avec la profondeur) : Sous contraintes statiques les argiles peuvent provoquer des tassements importants après gonflement en chassant les quantités d'eau emprisonnées.

## I-11- LES PRINCIPALES UTILISATIONS DE L'ARGILE

Depuis les nuits des temps, l'humanité se fie à l'argile comme matériau de construction parce qu'on peut l'utiliser sans dépenser beaucoup d'énergies ou de processus chimiques. À cause de leurs diverses propriétés physico-chimiques, parmi elles, on peut citer l'adsorption et absorption de divers ions et molécules, l'adhésion, l'émulsion, la malléabilité, résistance, etc., les argiles sont tout naturellement un bon matériau de construction. Ces propriétés sont les principales causes de leurs choix de l'utilisation, notamment dans l'industrie, telles que :

- ✓ La céramique pour la fabrication des couronnes dentaires, des porcelaines, etc. ;
- ✓ Les briques pour la fabrication des bâtiments, des hauts fourneaux, des fours d'affinage et de laboratoires, des tuiles, des carreaux de grès cérames, etc. ;
- ✓ La dilution des pesticides utilisés en agriculture lors de leur épandage ;
- ✓ La pharmaceutique et la médecine dans les pansements gastro-intestinaux et les excipients ;
- ✓ La papeterie qui compte parmi les premières consommatrices de kaolins ;
- ✓ La fabrication des boues de forage de la pétrolière.

De nombreux travaux de recherches ont montré que les argiles possèdent aussi des propriétés catalytiques, comme :

- ✓ Les catalyseurs argileux dans le cracking des produits pétroliers ;
- ✓ Le catalyseur de la montmorillonite utilisé dans la formation des aminoacides et leurs polymérisations en peptides ;
- ✓ Le produit d'essais de polymérisation du benzène en polyparaphénylène dans une montmorillonite.

Les domaines d'applications de minéraux argileux dans l'environnement sont notamment :

- ✓ Le transport des polluants organiques (pesticides, herbicides) et des éléments métalliques dans les sols ;
- ✓ La conception des barrières d'étanchéité dans les décharges ;
- ✓ Les problèmes de santé dans la fabrication de certains médicaments à effets retardés, pansements stomacaux et intestinaux. Dans cette condition, les argiles à foulon<sup>11</sup> sont utilisées pour fabriquer des produits pharmaceutiques absorbant les toxines, les bactéries et les alcaloïdes, pour traiter la dysenterie, épurer l'eau et les fluides de nettoyage à sec. Elles servent aussi de charge dans les plastiques, les peintures et les mastics ou comme support de catalyseur à base de platine.

---

<sup>11</sup> Substances de type argileux ou argiles non plastiques, habituellement riches en magnésie, possédant des propriétés d'absorption et/ou adsorption adéquates et formées par altération de cendres volcaniques ou par précipitation directe de la montmorillonite.

Cependant, il est noté que certaines argiles fibreuses très utilisées pour leurs propriétés isolantes peuvent avoir des effets néfastes. C'est le cas de la chrysolite ou amiante qui s'est révélée être une substance cancérigène.

## **II - LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY**

### **II-1- DÉFINITION DE LA BRIQUE EN TERRE CUITE**

Les briques en terre cuite sont des éléments de construction fabriquées artisanalement à partir de l'argile à base de silice, séchée au soleil, suivie d'une cuisson avec une température très élevée. Elle se présente sous forme de parallélépipède rectangle obtenue par pressage lorsqu'il s'agit de brique pleine.

La fabrication d'une brique artisanale en terre cuite ne nécessite pas aucun liant ni produit chimique, chaque brique est donc constituée à 100 % d'argile et de rien d'autre. Dans le cas de besoin d'augmentation de la porosité d'une brique, on mélange éventuellement avec l'argile une matière organique au cours du processus de sa fabrication, avant leur cuisson. Cette matière organique se consume complètement lors du processus de cuisson et ne laisse aucun résidu dans la brique.

La brique est un produit chimiquement très inerte sur lequel une atmosphère agressive n'a que peu ou pas de prise. Cette propriété est la base de la durabilité quasi légendaire de la brique.

À partir des argiles en terre cuite, on peut obtenir les éléments pour murs et cloisons des bâtiments<sup>12</sup> suivants :

- ▶ Briques pleines ou équivalentes pleines ;
- ▶ Briques perforées ;
- ▶ Briques des parements ;
- ▶ Briques creuses de moyen ou grand format ;
- ▶ Briques à rupture des joints ;
- ▶ Briques pour éléments préfabriqués ;
- ▶ Briques plâtrières.

### **II-2- BREF HISTORIQUE DE LA BRIQUE ARTISANALE EN TERRE CUITE**

Le besoin de se protéger de façon durable face aux intempéries oblige l'homme à trouver des matériaux durs et résistants. De ce fait, la brique apparaît entre le huitième et le septième millénaire avant Jésus Christ, notamment dans la région de Tigre et de l'Euphrate.

---

<sup>12</sup>Généralement utilisés pour les structures verticales

La cuisson de la brique artisanale en terre cuite est expérimentée en 2 500 avant Jésus Christ, en Mésopotamie<sup>13</sup>, plus précisément dans la Vallée d'Indus [Sandrine Banessy et Jean Jacques Germain dans leur ouvrage intitulé : « La brique, l'or rouge du Midi Touloussain », page 63]. Ce processus permet aux briques artisanales en terre cuite de réaliser des constructions plus imposantes. Alors, les premières maisons en briques ont été donc découvertes en Mésopotamie. Ceux-là furent l'extension de leurs usages rapidement dans tout le Moyen-Orient. Et aux Méditerranéens, l'argile, appelée aussi terre franche au XIX<sup>e</sup> siècle, constitue l'un des premiers matériaux des constructions utilisées.

En plus, la brique en terre cuite artisanale constitue la première pierre artificielle ou pierre factice, utilisée longtemps avant l'arrivée du béton en ciment.

Enfin, depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle, les chocs pétroliers à répétition ainsi que la prise de conscience écologique consécutive face au dérèglement climatique ont permis un grand essor dans la fabrication ainsi qu'à l'exploitation de ces matériaux. Cette grande décision de l'humanité a un effet important dans la réduction de la consommation énergétique ainsi qu'à l'impact environnemental lié aux productions des matériaux de construction.

## II-3 -L'ARRIVÉE DE LA BRIQUE EN TERRE CUITE À MADAGASCAR

### II-3-1- L'architecture malgache avant le XIX<sup>e</sup> siècle

Lorsque les premiers Portugais arrivèrent à Madagascar au XVI<sup>e</sup> siècle, ils ne découvrirent que l'architecture et des constructions réalisées avec des végétaux, illustrées par la photo 1 à gauche ci-dessous. Parce qu'auparavant, les bois étaient considérés comme matériaux précieux et réservés seulement pour l'aristocrate<sup>14</sup> de la population des hautes terres, comme renseigne la photo 1 à droite ci-après, surtout au début du XIX<sup>e</sup> siècle.



Photo 1 : Habitation en cage végétale des peuples et celle de l'aristocrate de Tananarive au début de XIX<sup>e</sup> siècle.

<sup>13</sup>Région historique située entre le Tigre et l'Euphrate, et correspondant à l'Irak et à la Syrie orientale actuels.

<sup>14</sup>Membre de la classe sociale constituée de personnes prééminentes par la naissance ou la fortune et exerçant un certain pouvoir (Dictionnaire Encarta)

Ainsi l'architecture de terre est donc un phénomène récent à Madagascar. Le premier procédé de construction en terre que l'on trouvait sur les hautes terres de l'Imerina est les modèles « torchis<sup>15</sup> » et « pisé<sup>16</sup> », comme illustrent les deux photos à gauche ci-dessous.

La méthode de construction en maçonnerie de briques de terre crue, de type « Adobe<sup>17</sup> », cf. la photo 2 à droite ci-après, a été amenée et diffusée par le missionnaire protestant James Cameron en 1826. Cette période est donc l'année de la première utilisation de la brique comme matériaux de construction des bâtiments à Madagascar.



Photo 2 : Évolution des matériaux utilisés pour la construction des bâtiments à Madagascar

### II-3-2- La première utilisation de la brique en argile cuite à Madagascar

Le premier four d'un modèle archaïque de type français a été installé à Madagascar par Jean Laborde en 1931. Cette installation a été suivie par la diffusion de la technique de cuisson des briques et des tuiles en matière argileuse. La première technique de cuisson fut la méthode hollandaise, méthode moins régulière, mais ayant de meilleurs rendements.

Depuis l'apparition de la brique en terre cuite au XIX<sup>e</sup> siècle, son utilisation va se reprendre très vite en tant que matériaux et élément essentiel d'originalité de l'architecture des hautes terres malgache. Par conséquent, elle commençait à entrer aussi dans la structure des bâtiments ou dans la composition architecturale de tous les éléments de l'habitation, comme : les murs, les piliers, les pignons, les linteaux, les encadrements des fenêtres, les porches, les arcs, etc. Comme illustre la photo 3 ci-contre.



Photo 3 : Type de maison habillé à l'aide des briques en terre cuite traditionnelle de la haute terre malgache

<sup>15</sup>Matériau de construction composé de terre argileuse et de paille hachée.

<sup>16</sup>Matériau de construction fait de terre argileuse délayée dans de la paille et comprimée.

<sup>17</sup>Brique en terre cuite au soleil

## II-4- LES DIFFÉRENTS PROCESSUS DE FABRICATION DES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY

Les briques artisanales en terre cuite malgache sont obtenues en suivant étape par étape les différents processus de fabrication, utilisées depuis plusieurs siècles, détaillées dans la sous-section ci-après.

### II-4-1- L'extraction d'argile

L'extraction est la première phase de la préparation de l'argile. Les matières premières pour la production des briques sont des argiles que l'on trouve dans la nature, notamment dans les rizières (cf. la photo 4 ci-contre). Leurs propriétés sont distinctes selon leur teneur en minéraux argileux, chaux, quartz, carbonate et oxyde de fer (qui détermine la couleur et la structure du produit fini). À Madagascar, l'extraction des glaises s'effectue manuellement à ciel ouvert à l'aide des outils locaux comme la pelle et la bêche.



Photo 4 : Argile destinée pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite

### II-4-2- La préparation

Les argiles provenant des couches ou des carrières différentes sont ensuite transportées à la briqueterie où elles sont mélangées, suivant un dosage bien déterminé, à pied nu. Puisque :

- Un laminage défectueux des matériaux argileux favorise la fissuration au cours du séchage et peut être la cause d'éclatement de la brique lors du processus de la cuisson ;
- Un réglage irrégulier de l'humidité entraîne un mauvais réglage de la mouleuse ou de l'aplatissoir et peut perturber ensuite le déroulement du séchage ;
- Une mauvaise homogénéisation du mélange de la matière première provoque de nombreux ennuis, tant au cours de la fabrication qu'en ce qui concerne la qualité du produit fini ;

En effet, les argiles extraites dans les carrières ne peuvent être utilisées tout de suite telles que pour former une pâte propre à la fabrication, elles doivent être travaillées et passées par les différents procédés suivants :

#### a- ÉLIMINATION DES IMPURETÉS

L'existence des impuretés dans les matériaux argileux impactera la qualité de la brique, notamment après la cuisson, puisque ces impuretés n'ont pas la même propriété thermique que l'argile. Ainsi, l'élimination des débris/déchets est très importante dans la phase de préparation de la pâte d'argile. Les impuretés

peuvent être de différentes natures, mais la plupart du temps, elles sont physiques, comme les cailloux, les racines, les déchets métalliques, les graines de calcaires, etc.

### **b- ÉMIETTAGE DE L'ARGILE**

Le but principal de l'émiettage est de diminuer les dimensions des mottes d'argile afin d'offrir une plus grande surface de contact aux différents constituants de la pâte.

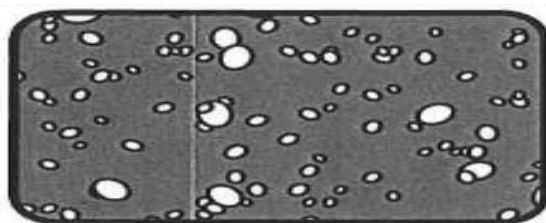
### **c- FORMATION DES MÉLANGES**

Cet éventuel processus d'opération est nécessaire pour :

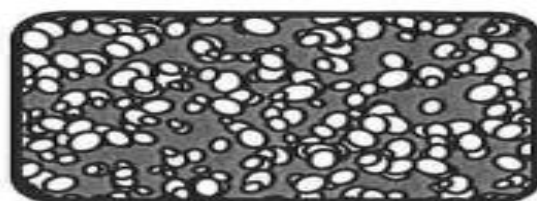
- ▶ Les argiles de qualités différentes ;
- ▶ Les argiles avec des dégraissants.

### **d- L'HOMOGENÉISATION ET HUMIDIFICATION**

Ce processus consiste à donner au produit une consistance la plus plastique à l'aide de l'humidification et chasser en partie l'air incorporé dans la pâte. Dans ce cas-là, c'est l'étape la plus importante dans la préparation de la pâte d'argile, car ce stade conditionne d'une part la suite de l'opération de la préparation, et d'autre part la qualité désirée des briques en terre cuite artisanale. Donc, conditionne bien attendu leurs caractéristiques thermophysiques. En effet, les particules lamellaires de l'argile crue sont ainsi gonflées d'eau d'imbibition au moment de la préparation de la pâte. La structure du mélange de la pâte d'argile dans ce stade est illustrée par la figure 14 ci- dessous :



Pâte d'argile crue avant la préparation



Argile après l'homogénéisation et humidification

Figure 14 : État des particules lamellaires de l'argile avant et après l'homogénéisation et humidification

### **II-4-3- Le moulage des argiles crues**

Lorsque le produit à mouler à la main est devenu une masse plastique, après le processus de la préparation su- développé, on peut se servir de la moule en bois dans laquelle on comprime la pâte et qui lui confère la forme<sup>18</sup> de la brique, selon la dimension voulue.

<sup>18</sup> Car, le cadre en bois a un vide intérieur correspondant à la forme de la brique à mouler

L'opération de moulage consiste, premièrement, à poser le cadre, préalablement mouillé, sur une table en bois renfermée par des sables<sup>19</sup>. Puis le mouleur prend une quantité de pâte en boule légèrement supérieure à celle qui est nécessaire et la lance dans la moule, comme montre la photo 5 ci-contre, faire refouler pour bien remplir les angles inférieurs, puis ras la partie supérieure de la pâte avec un racloir. Le démoulage se fait en soulevant le cadre et en pressant l'aide d'un aplatissoir dans le lieu de séchage.



Photo 5 : Processus de moulage de l'argile crue

#### II-4-4- Le séchage

Après le démoulage de la pâte d'argile avec la mouleuse en bois, la quantité d'eau dans la brique occupe de 25 à 30 % par rapport au poids de la matière sèche. Il est donc nécessaire d'évacuer cette accumulation d'eau afin de permettre de passer au stade suivant de la fabrication, qui est la cuisson. Les produits subissent ainsi une diminution de volume et acquièrent la dureté qui permet leur manutention. Cette déshumidification est conditionnée par les conditions climatiques ou atmosphériques du lieu de séchage. Il faut donc protéger les briques tant de l'action du soleil que de celles de la pluie et du vent. Les briquetiers empilent ensuite les briques sèches et utilisant des pailles de riz comme protection des produits finis au rayon du soleil en attendant la cuisson.



Photo 6 : Le mode de séchage des briques en argile à Madagascar

À Madagascar, les briquetiers procèdent au séchage naturel en plein air des briques artisanales, comme montre la photo 6 ci- contre. L'importance et la nécessité de la qualité du séchage des briques artisanales en terre cuite est résumé dans la figure 15 ci-après :

<sup>19</sup> Pour éviter le collage

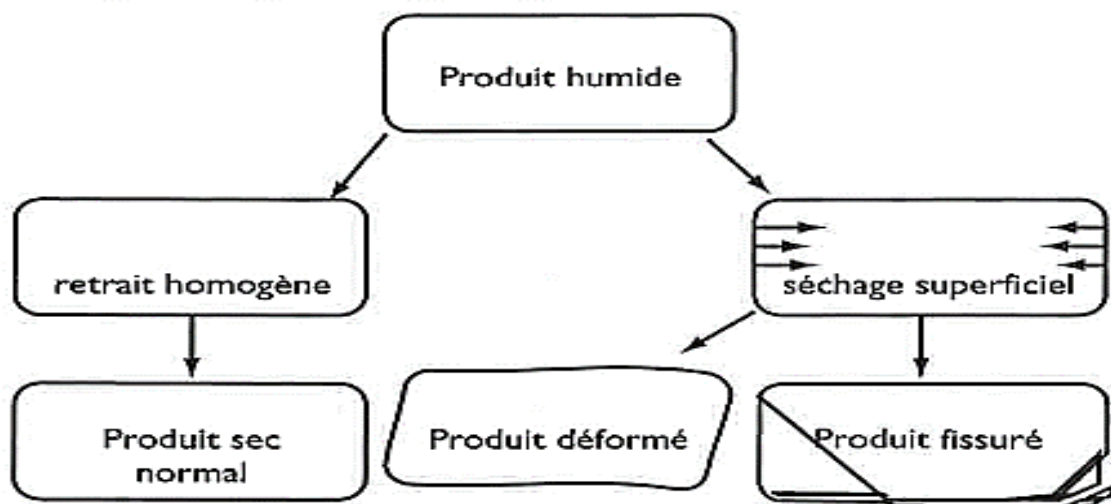
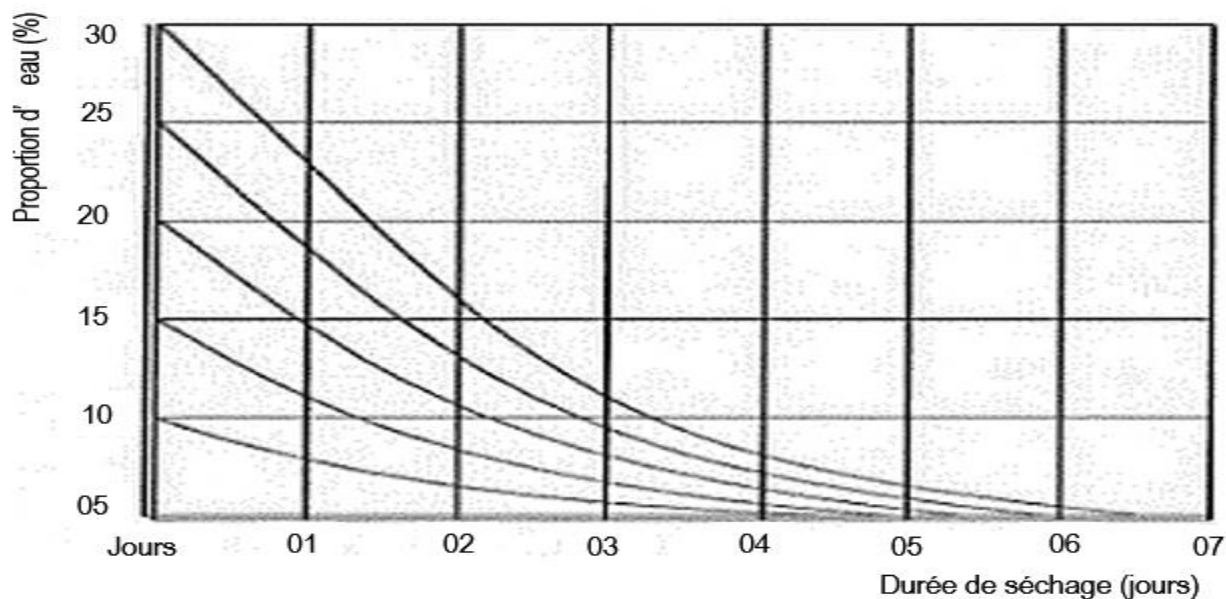


Figure 15 : L'importance et la nécessité de la qualité du séchage des briques artisanales

L'évaporation de l'eau d'imbibition des briques crues artisanales au moment de leur séchage se fait subir à la pièce en cours de dessiccation un retrait volumique homogène et proportionnel à la perte d'eau, en fonction de la période du séchage. Cette influence de la consistance est traduite par l'abaque du graphe 6 ci-dessous.



Graphe 6: Influence de la consistance sur la durée de séchage de la brique artisanale en terre cuite

Une brique artisanale normale ayant une proportion d'eau suffisante (25 % à 30 %) devrait être sèche dans une période de 07 jours. Dans cette condition la limite de retrait de l'argile constituant la brique est atteinte. La limite de retrait  $W_s$  (%) de l'argile d'Ambohitrimanjaka sera étudiée dans le deuxième chapitre de la deuxième partie, c'est-à-dire dans la partie expérimentale de la présente thèse.

## II-4-5- La cuisson

Après avoir séché, les briques artisanales doivent être cuites pour atteindre leurs caractéristiques de résistance mécanique et l'inaltérabilité aux intempéries. Dans cette opération, la brique crue perd sa faculté de redevenir encore une masse plastique en présence d'eau. À Madagascar, les briquetiers empilent les produits crus secs en elles-mêmes, en conservant des alvéoles pour mettre le feu de la cuisson (Cf. la photo 7 ci- dessous). Les combustibles utilisés pour la cuisson des briques artisanales à Madagascar sont souvent : des bois morts, la sciure de bois ou bien la balle de pailles de riz. La cuisson dure environ 48 heures, les produits restent toutefois au maximum pendant 10 heures en plein feu, selon les quantités à cuire. Et pendant cette période, le briquetier peut faire varier l'atmosphère du four :

- ▶ En cas d'oxydation, les métaux sont oxydés dans l'argile et on soutire la couleur de brique normale ;
- ▶ En cas d'atmosphère réductrice du four, on récolte des couleurs plus sombres (bleu - gris) ;
- ▶ En cas de réduction incomplète, on obtient des teintes fortement nuancées.



Photo 7 : Processus de cuisson de la brique artisanale en terre cuite malagasy

Les objectifs principaux de la cuisson des briques artisanales sont les suivants :

- ▶ Modifier d'abord les granulométries de leurs composants ; puis
- ▶ Augmenter leur résistance mécanique ; et de
- ▶ Diminuer par conséquent leur porosité.

Les différentes transformations subies par les structures de la brique s'opèrent en fonction du changement de la température de la cuisson. Cette évolution est résumée dans le tableau 4 qui suit :

Tableau 4 : Transformation des éléments constituant les briques en fonction de la température de la cuisson.

| Température            | Transformation                                                                                                                                             |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jusqu'à 200 °C :       | Évacuation de l'eau absorbée                                                                                                                               |
| De 200 à 450 °C :      | Décomposition des matières organiques                                                                                                                      |
| De 400 à 550 °C :      | Départ de l'eau de constitution des argiles                                                                                                                |
| Température > 750 °C : | Cristallisation de nouveaux composés et densification définitive                                                                                           |
| De 800 à 950 °C :      | - En fonction de la nature des argiles, formation de nouvelles phases telles que spinelle, hématite, corindon ;<br>- Décomposition du carbonate de calcium |
| De 970 à 1300 °C :     | Fusion progressive des minéraux antérieurs et cristallisation du mullite.                                                                                  |
| Refroidissement :      | Contractions thermiques plus ou moins régulières                                                                                                           |

On constate que la brique artisanale en argile commence à tarir à partir de 400 °C, et cuite vers 1000 °C par la transformation chimique et minéralogique engendrée par la cuisson.

## II-5- LA NORME GÉOMÉTRIQUE ET PHYSIQUE DES BRIQUES EN TERRE CUITE MALGACHE

Les dimensions courantes de fabrication (en cm) des briques artisanales en terre cuite utilisées à Madagascar, d'après le NOME malgache (N.M) 2- A-2 inscrit dans le TBM sont les suivantes :

Tableau 5 : Dimension standard de briques artisanales en terre cuite malgache

| Caractéristiques | Dimension intérieure du moule<br>(Standard) | Dimension de fabrication<br>(produit fini) |
|------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Épaisseur :      | 12                                          | 9                                          |
| Largeur :        | 12 (a)                                      | 10                                         |
| Longueur :       | 24                                          | 20,5                                       |

(a) – y compris l'épaisseur de la partie mobile pour le démoulage.

- Le poids d'une brique n'excédera pas de 2,5 kg ;
- La densité du tesson<sup>20</sup> des briques est de 1,50 kg/dm<sup>3</sup> ;
- La porosité<sup>21</sup> est de 45.

## II-6- LES PRINCIPAUX AVANTAGES DE L'UTILISATION DES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE

### II-6-1- Matière première naturelle inépuisable

La brique en terre cuite artisanale est un matériau d'origine de terres argileuses, qui sont extraites dans des argilières. Dans ce cas, les argiles sont omniprésentes dans le sous-sol malgache. L'activité d'extraction des argiles à Madagascar est temporaire ou bien saisonnière, suivant le calendrier culturel des paysans de la région. En effet dans la majorité des cas, le réaménagement des zones d'extraction d'argile crée de nouvelles zones agricoles, ce qui instaure un équilibre entre les zones destinées à l'extraction et les zones restituées pour l'agriculture. De plus, le ratio de matières premières extraites annuellement par rapport aux réserves existantes est très faible, ce qui permet de qualifier les ressources en argile du sous-sol malagasy comme étant inépuisables. Dès lors, l'existence de ressources pour les générations futures n'est jamais à craindre.

<sup>20</sup>Poids du tesson= Poids spécifique de l'argile cuite

<sup>21</sup> Pourcentage, rapport du volume des vides du sol par rapport au vide total

## **II-6-2- Matériaux flexibles pour la construction de murs d'un bâtiment**

Vis-à-vis de leur durabilité, ayant une résistance à la compression 05 à 08 MPa et une bonne résistance dans le temps, la brique en terre cuite malagasy peut être utilisée pour la réalisation de la structure porteuse ou non, mais aussi pour la construction des cloisons intérieures et murs accumulateurs de chaleur. Bien attendu, ces briques artisanales en terre cuite offrent de toutes nouvelles perspectives à l'architecture intérieure moderne. Lorsqu'elle est associée aux matériaux les plus modernes, elle permet de créer des maisons modernes qui offrent des espaces de vie et de travail attirants et fascinants d'un point de vue optique.

## **II-6-3- Chantier à faible nuisance<sup>22</sup>**

La construction d'un bâtiment en briques artisanales en terre cuite ne présente que de très faibles nuisances et ne requiert aucune mesure pour les personnes vivant à proximité du chantier. L'édification reste relativement faite à la main et ne nécessite pas d'utilisation de machine. Dans ce cas, les chantiers sont également peu bruyants, peu poussiéreux, inodores et peu générateurs de déchets. En effet, la brique en terre cuite est recyclable à 100 % en gravats ou en terre battue, donc peut être réutilisée en remblais. On en déduit que la construction en brique en terre cuite n'occasionne aucune pollution ni pour le sol ni pour l'atmosphère. Les briques artisanales en terre cuite sont ainsi devenues un produit tendance de l'habitat moderne respectueux de l'environnement et de la santé.

## **II-6-4 -Confort à vivre**

La brique en terre cuite est un régulateur d'humidité de l'air, parce qu'elle peut absorber, retenir et rediffuser rapidement l'humidité de l'air ambiant dans l'atmosphère, lorsque c'est nécessaire. Même si la sensation de confort est souvent aléatoire. Pourtant, les avis sont unanimes : la maçonnerie en brique en terre cuite fournit des conditions de vie et de confort intérieur inégalables grâce à ses bonnes propriétés thermiques et acoustiques. Celles-ci découlent ainsi un équilibre judicieux entre leur structure poreuse, qui lui confère le caractère d'isolant thermique, et leur masse qui apporte une résistance mécanique et isolation acoustique. Par ailleurs, les briques étant des matériaux inertes, ils ne libèrent pas de substances toxiques ou allergènes dans l'air ambiant. Enfin, les briques artisanales en terre cuite sont classées incombustibles, en cas d'incendie elles n'émettent pas de gaz toxique.

## **II-6-5- Ayant une durée de vie inégalée**

Nous constatons que les bâtiments anciens en brique sont omniprésents. Dans cette circonstance, les statistiques ainsi que les études montrent que plus de 30 % du parc immobilier de Madagascar datent

---

<sup>22</sup> Tout ce qui dans la vie urbaine et industrielle nuit à la santé physique ou mentale ou bien à l'environnement.

autour des années 1900. Si ces bâtiments sont aujourd'hui rénovés pour répondre aux normes de confort, comme le châssis, les cloisons intérieures, le système de chauffage, etc., ces rénovations n'affectent généralement pas la structure, car les briques en terre cuite ont une durée de vie largement supérieure à cent ans. Les briques artisanales en terre cuite sont ainsi des matériaux faits pour durer de génération en génération. D'innombrables exemples en témoignent. La construction durable en matériaux de terre cuite répond donc à nos besoins d'aujourd'hui tout en respectant ceux des générations futures. Par ailleurs, construire aujourd'hui en terre cuite, c'est aussi s'assurer qu'on transmettra un bien matériel précieux aux générations à venir.

## **II-6-6- Matériaux innovants**

Les briques artisanales en terre cuite est un matériau de construction ancestral au service d'une architecture d'intérieur moderne, donc elles sont toujours innovantes à cause de :

- ▶ L'existence de gammes de couleurs et de formats plus étendus ;
- ▶ La facilitation de leurs mises en œuvre ;
- ▶ Leur faible nuisance dans le chantier ;
- ▶ Leurs propriétés thermiques et acoustiques ;
- ▶ Leurs impacts réduits sur l'environnement ;
- ▶ L'expansion de leur construction.

Ces critères justifient ainsi le choix du thème de recherche, traité dans le présent ouvrage.

## **III - ANALYSE ET SUGGESTION**

### **III-1- ANALYSE**

On tire à partir des notions ci-dessus que l'argile, matière première utilisée pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, est un matériau naturel. De même, les travaux de construction ainsi que la démolition d'un bâtiment réalisé avec ces types de matériaux sont très flexibles du fait de leur faible nuisance. Ces hypothèses ont été confirmées par la Fédération Belge de la Brique, dans leur ouvrage intitulé : « La brique de terre cuite... le choix de la construction durable ».

Par ailleurs, la définition du terme « construction durable » étant « un ensemble qui durant les phases de construction, d'utilisation et de démolition d'un bâtiment occasionnera un impact minimal sur l'environnement ». Ainsi, il s'agit d'envisager le bâtiment tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire de sa conception à sa démolition, en passant par les phases d'extraction des matériaux, de construction, d'utilisation, et éventuellement de transformation et d'adaptation aux besoins des divers occupants qui s'y succèdent. La brique en terre cuite est donc parmi le matériau par excellence qui contribue à un environnement bâti sain, durable et performant en matière de confort intérieur.

Dans le processus de fabrication des briques artisanales en terre cuite, la plasticité est une des propriétés recherchées, car elle facilite la fabrication du point de vue de la cohésion en crue et définit ainsi les qualités des produits finis. Cette hypothèse fait appel aux suggestions géotechniques ci-dessous.

### III-2- SUGGESTIONS GÉOTECHNIQUES

L'appréciation de l'état de la maniabilité des matériaux argileux dans les processus de fabrication des briques artisanales en terre cuite malagasy dépend essentiellement des expériences des briquetiers. En effet, afin d'améliorer les qualités des produits finis, la présente thèse est l'une de l'occasion d'apporter des suggestions géotechniques pouvant aider les briquetiers (i) à identifier d'abord la présence d'argiles dans le terrain désiré à exploiter, (ii) de connaître la teneur en eau naturelle du matériau pour régler le taux d'humidification du mélange et (iii) de déterminer le comportement mécanique des sols argileux à l'état plastique, avant de les remanier : c'est la Limite d'Atterberg et l'Indice de plasticité. La connaissance et maîtrise de ces deux derniers essais aideront les briquetiers, à faire sortir une formule de dosages d'humidification des pâtes argileuses pendant la phase d'homogénéisation et amélioreront ainsi la qualité des produits finis.

Les processus de la réalisation des essais de laboratoire, relative à ces suggestions, ainsi que les résultats expérimentaux faits avec l'échantillon d'argiles d'Ambohitrimanjaka sont donnés dans le premier chapitre de la deuxième partie de cet ouvrage.

# CHAPITRE III – CONCEPT DU CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT

## I - INTRODUCTION

Le confort physiologique d'un individu dans l'habitat comporte cinq (5) composants [Thierry Joffroy, Arnaud Misse, Robert Celaire, Lalaina Rakotomalala. ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS AU SÉNÉGAL. 2017. hall- 02025559] bien distincts dont : Le confort hygrothermique, le confort visuel, le confort acoustique, le confort d'usage ainsi que le confort olfactif et la qualité de l'air. Il revêt ainsi la condition physiologique, physique, sociale et économique de l'être humain. Le confort hygrothermique ou simplement appelé « confort thermique », largement développé dans le présent chapitre et étudié pour localiser l'orientation optimale du modèle du bâtiment objet d'étude de la présente thèse, est donc un de ces besoins fondamentaux de bien-être de l'homme. Concernant ce type de confort, depuis la nuit des temps, de nombreux philosophes ont montré que la recherche du bonheur est la plus essentielle motivation d'un être humain. Le confort thermique est parmi les composantes de ce bonheur parce qu'il contribue au bien-être d'un individu avec leur environnement construit. En effet, la satisfaction des occupants par le bien-être thermique est parmi les objectifs de l'architecture, cela signifie que les concepteurs des bâtiments ont déjà bien réfléchi sur l'assurance d'une sensation de chaleur en hiver et la préservation des fortes chaleurs en été.

Le confort thermique d'un bâtiment, comme son nom l'indique, est donc le confort lié à la répartition de la température et le flux agréable, à l'intérieur d'un appartement, dans tout le corps d'un individu. Avant de le traiter à fond, nous essayerons d'abord de définir la chaleur et d'envisager le phénomène de la thermorégulation humaine.

## II - DÉFINITION DE LA CHALEUR

La chaleur est une grandeur physique, qui se présente sous forme d'énergie échangée entre deux corps. Leur transfert s'effectue sous forme d'énergie mécanique microscopique, correspondant au degré d'agitation des molécules. Ainsi, lorsqu'un corps reçoit une chaleur, l'agitation de ces molécules a tendance à s'intensifier. Ce phénomène traduit la plupart du temps une augmentation de la température de ce corps. Entre deux corps, la chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant donc généralement la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier. La chaleur ne se propage d'un corps froid vers un corps chaud qu'à condition de fournir un travail.

### III - LA THERMORÉGULATION HUMAINE

La thermorégulation du corps humain comporte deux dimensions, dont : comportementale et physiologique [Jacques Fradin]. Nous allons approfondir, ainsi, respectivement ci-dessous ces deux circonstances.

#### III-1- LE COMPORTEMENT

Comme tout animal, l'être humain sait naturellement régler sa température en adaptant ses comportements. Les réactions citées ci-dessous sont les preuves de cette thermorégulation comportementale d'un individu :

- En contexte chaud : il va rechercher l'ombre pour se rafraîchir, s'hydrater, se ventiler, réduire son activité ou même, parfois, la suspendre à l'aide d'une sieste au plus chaud de la journée, changer de posture afin d'augmenter ou diminuer la surface d'échange entre son corps et l'environnement ;
- Habituellement : il agit pour modifier son activité physique, de sa nourriture, des horaires de travail ou aussi des habitudes culturelles, etc. Donc varie volontairement son métabolisme ;
- Selon sa sensation corporelle : un individu peut modifier sa vêtue, ajouter ou retirer son vêtement pour faire varier son niveau d'isolation ;
- Dans un milieu urbain, il pourra alléger ou aérer son habillement, ou mettre des protections contre le rayonnement solaire, comme des chapeaux et des habits légers, etc. ;
- Dans un local bien déterminé : L'homme modifie son environnement en se déplaçant pour modifier la température de consigne du système de chauffage ou de refroidissement, en ouvrant une fenêtre, en allumant un ventilateur, etc.
- Pour se protéger du froid hivernal et/ou nocturne, l'homme a appris à créer des habitats artificiels, d'abord dispersés puis regroupés : hameaux, bourgs puis villes.

Donc, si on modère l'adaptation comportementale spontanée, tant spatiale<sup>23</sup> que temporelle<sup>24</sup>, les environnements et les modes de vie humaine imposent une adaptation physiologique, qui se révèle souvent pénible ou inconfortable.

#### III-2- LA PHYSIOLOGIE

De la nature, la peau d'un individu est un thermosenseur ou thermorécepteur. Elle est ainsi la porte d'entrée de la température de diverses parties du corps. L'information thermique cutanée est ensuite envoyée à l'hypothalamus par l'intermédiaire du système nerveux. Cette dernière joue dans ce cas un rôle de régulateur physiologique. La thermorégulation physiologique de l'homme porte donc sur la sensation physiologique, modifiant ainsi les échanges entre le corps et son environnement, à savoir :

---

<sup>23</sup> Poste de travail fixe, appartements non traversants, etc.

<sup>24</sup> Horaires de travail, rythmes sociaux...

- La vasodilatation ou vasoconstriction qui accroît ou diminue) le débit de la pression sanguine. Cette variation de débit favorise l'échange thermique entre le corps et son environnement ;
- Le frisson, qui est le résultat de la contraction des muscles en réaction au froid. Ces spasmes augmentent l'activité métabolique et produisent par conséquent une chaleur. Afin de limiter la dissipation de la chaleur stockée vers l'environnement, les frissons sont souvent associés à la piloérection<sup>25</sup>. Le redressement des poils créant ainsi une fine couche d'air isolante à la surface de la peau
- La sudation permet de refroidir la peau par humidification due à l'évaporation de la sueur produite : c'est un phénomène endothermique. La température du corps dépend fortement de son activité : un individu au repos produira moins de chaleur que celui qui travaille ou celui qui pratique une activité physique intense.

Cette régulation physiologique n'intervient qu'après dépassement ou inhibition de nos capacités de réponse comportementale. Donc :

- L'être humain est naturellement mieux équipé pour supporter le chaud que le froid, même s'il existe des différences psychologiques voire physiologiques inter- individuelles ;
- L'adaptation physiologique est coûteuse, car elle nous fait perdre de l'eau et des minéraux et ralentit les métabolismes énergétiques afin surtout de limiter la production de chaleur, elle est donc ressentie comme fatigante.

### III- 3- LES DIFFÉRENTS FACTEURS DE SENSATION THERMIQUE D'UN INDIVIDU

Comme nous avons vu précédemment, les principaux facteurs de sensation thermique d'un individu sont :

- D'ordre physique : Ce sont les composants physiques du milieu, comme la façade thermique, végétation, mobiliers, etc. ou variables dans le temps : élément de climat ;
- D'ordre physiologique : Qui représentent la faculté de l'individu à accepter en s'y adaptant ou à rejeter une situation en affichant des réflexes de régulation : sudation, frisson, etc. ;
- D'ordre psychologique : caractérisés par la façon dont on aperçoit et on évalue psychiquement son milieu et la situation dans laquelle on se trouve.

La connaissance des modes de transfert de chaleur, les thermiques du corps humain ainsi que les différents facteurs de sensation thermique avec l'environnement, traités ci-dessus, nous permettent ainsi d'orienter la recherche vers le confort thermique.

---

<sup>25</sup>Appelée aussi chair de poule dans le langage courant, elle est occasionnée sous l'action du froid.

## IV - LE CONFORT THERMIQUE DANS LE BÂTIMENT

### IV-1- BREF HISTORIQUE

À l'époque médiévale, le terme confort vient du mot latin « confortare », qui signifiait : « le renforcement et la fortification ». Puis au XVIII<sup>e</sup> siècle, la définition en anglais de ce terme devient « bien-être matériel ». À cette époque, ce vocabulaire ne concerne que les classes sociales de l'époque<sup>26</sup>. Ainsi, on peut dire que le premier confort atteint par l'humanité a été certainement la possibilité de disposer d'un endroit clos et couvert. La notion de confort est demeurée plus vaste et ne peut se limiter seule aux conditions physiques qui déterminent le confort de type hygrométrique<sup>27</sup>, sonore ou olfactif, mais s'étendent aussi aux paramètres esthétiques et psychologiques<sup>28</sup>.

Les premières études modernes sur le confort datent du début du XIX<sup>e</sup> siècle, quand ce vocabulaire fut introduit en France, et se poursuivent encore aujourd'hui. Elles visent la prévision du taux de satisfaction pour une ambiance donnée et la mise au point d'indicateurs permettant de la qualifier précisément. Le protocole consiste à recueillir l'impression de centaines de personnes soumises à des conditions climatiques maîtrisées. Un traitement statistique permet alors d'aboutir à des lois mathématiques de la prévision.

La condition de confort n'est pas figée dans le temps et dans l'espace, elle diffère ainsi :

- De la classe et le niveau social ;
- De la région et de la répartition géographique de la planète ;
- De la période et de l'histoire.

### IV-2- DÉFINITION DU CONFORT THERMIQUE

Assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur, c'est satisfaire les besoins d'occupants, donc assurer leur confort. Le confort thermique est donc défini comme une notion subjective qui résume tout un ensemble de sensation. Le confort thermique consiste à n'avoir ni très chaud ni très froid [CLAUDE- ALAIN ROULET, Mai 2008] dans lequel le confort aéraulique de l'air intérieur doit être acceptable ou mieux agréable. La notion de confort thermique est intimement liée à des adaptations ponctuelles de la régulation corporelle, à la fois globale et locale : aux extrémités du corps. La perception du froid et du chaud dépend de nombreux paramètres, comme : le sexe, l'âge, la constitution, la santé, la nourriture, les vêtements, l'activité auxquels s'ajoutent encore des paramètres psychologiques et même socioculturels.

---

<sup>26</sup> Ces sont les nobles, les Bourgeois ainsi que les ouvriers

<sup>27</sup> Température, humidité, etc.

<sup>28</sup> Comme la qualité de la lumière, les espaces verts, le paysage, la sécurité, le prestige, etc.

Le confort thermique engendre donc une interaction entre l'individu et l'espace qui l'entourent, offre ainsi une qualité de vie. D'après la norme ISO 7730, il y a situation de confort thermique si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- ✓ Le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ses mécanismes autorégulateurs ne soient pas trop sollicités ;
- ✓ Il n'existe pas d'inconfort local dû :
  - ▶ À la sensation de courant d'air ;
  - ▶ À l'asymétrie du rayonnement ;
  - ▶ Au gradient vertical de température ;
  - ▶ À la température du sol.



Figure 16: Définition du confort thermique

### IV-3- LES DIFFÉRENTS ENJEUX DU CONFORT THERMIQUE

#### IV-3-1- Satisfaction corporelle individuelle

Le sentiment de confort teste un mélange de sensations qui est en fonction de chaque personne, de son mode de vie ainsi que de ses habitudes. Une maison ou un logement confortable est donc un lieu où les occupants « ressentent » le confort. Ainsi, le confort est parmi les sources de la satisfaction corporelle individuelle.



Figure 17 : Le confort dans un local octroie une satisfaction individuelle

#### IV-3 2- L'économie

L'exploitation directe ou la non-maîtrise d'énergies dans un local a besoin d'un investissement des équipements de chauffage très important. De ce fait, le dimensionnement d'un équipement de chauffage nécessitera un niveau d'isolation très élevé. Choisir un équipement onéreux pour une maison non isolée peut causer un surdimensionnement, et voire même non adapté, donc révélera un lourd budget.



Figure 18 : La maîtrise du confort a un impact direct sur l'économie

### IV-3-3- La qualité de l'air

Une maison confortable, bien isolée, étanche à l'air, et ventilée garantira un air neuf et sain, sans excès de vapeur d'eau, donc sans risque de pathologie liée à une humidité ambiante mal contrôlée dans un local. Pour cela, le confort régularisera la qualité de l'air dans un local. Qui est la source de vitalité d'un individu.



Figure 19 : Le confort thermique a un impact sur la qualité de l'air d'un local

### IV-3-4 – La pérennité du bâti

Corollairement à l'isolation ainsi que la ventilation, le confort thermique durable apporte à un bâtiment une longévité qui lui évite tous les désagréments identifiés. Donc provoquera la pérennité du bâti. Par contre, l'humidité engendre des moisissures ainsi que des désordres souvent irréversibles comme le salpêtre sur les parois, la condensation sur les parties froides du bâtiment, les spores dans l'air intérieur, le pourrissement des bois de charpente, etc.



Figure 20 : Le confort thermique participe à la pérennité d'un bâtiment

## IV-4- LE MODE D'ÉCHANGE THERMIQUE DU CORPS HUMAIN AVEC LEUR ENVIRONNEMENT : LE MÉTABOLISME

Pour entretenir la vie, le corps humain doit :

- Transformer l'air ainsi que notre nourriture quotidienne en énergie ;
- Maintenir la température du corps en constante à  $37 \pm 0,8$  °C, celle de la peau est de l'ordre de 32 à 33 °C, et peut descendre jusqu'à 15 à 20 °C au niveau des pieds dans le cas où la température ambiante est faible. Dans ces conditions, le corps humain est un système ouvert, en interaction permanente avec son environnement via des échanges cutanés et respiratoires : C'est le métabolisme.

Le métabolisme<sup>29</sup> est une activité corporelle qui consiste à transformer la nourriture consommée, d'une part pour constituer le corps<sup>30</sup> et d'autre part en énergie. L'énergie ainsi produite nous permet de travailler<sup>31</sup>

<sup>29</sup> Le métabolisme est défini comme l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent dans le corps humain. À cause de la faible transformation de l'énergie produite en effort fourni par un individu, 75 à 99 % de cette dernière prend la forme de chaleur en effectuant un travail. Cependant, si l'être humain est au repos, la part d'énergie transformée en chaleur atteint 100%.

<sup>30</sup>Sous forme des protéines et tissus.

<sup>31</sup>Au sens physique du terme, donc à nous de mouvoir, à tirer et à pousser des objets

et de maintenir la température interne de notre corps au tour de 37 °C, pour que les réactions biochimiques nécessaires puissent se faire dans de bonnes conditions.

Ce processus de transformation nécessite de l'air, notamment de l'oxygène, génère du gaz carbonique, de l'eau ainsi que des déchets divers, comme montre la figure 21 ci- contre. Dans ce cas :

- La quantité d'air inspirée par un homme adulte sans activité est de 0, 5 m<sup>3</sup>/h, avec un maximum 9 m<sup>3</sup>/h pour un individu en activité physique ;
- Sa consommation en oxygène comprise entre 15 à 50 l/h suivant l'activité, l'air extérieur contient environ 21 % d'oxygène en volume et de 0,003 % de CO<sub>2</sub> ;
- Le rejet de CO<sub>2</sub> pour un individu au repos est estimé à 10 à 20 l/h ;
- La vapeur d'eau moyenne produite par individu est de 50 g/h, cette quantité peut atteindre 2,5 l/jour/personne, selon les activités ménagères.

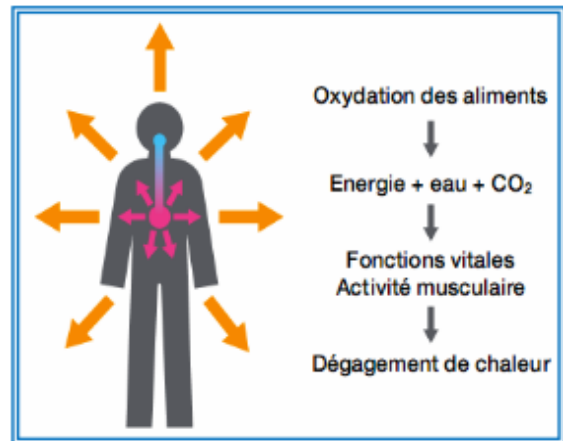


Figure 21 : Représentation schématique du métabolisme humain

L'activité métabolique<sup>32</sup>, notée M, d'un individu, s'exprime-en Met<sup>33</sup>, représente la quantité de chaleur produite par le corps humain, par heure et par mètre carré de la surface de corps au repos. L'activité métabolique vitale est évaluée à 0,7 Met<sup>34</sup>, mais cette valeur est en fonction des paramètres physiques, notamment le poids, la taille et le sexe du sujet.

On peut distinguer trois niveaux de métabolisme :

- Le métabolisme de base : Le métabolisme basal est la production de chaleur minimale d'une personne couchée au repos dans des conditions définies, nécessaires aux fonctions vitales de l'organisme. Il dépend du poids, de la taille, de l'âge et du sexe [AFNOR ,1990]. Pour une personne standard (1,70 m, 70 kg et 35 ans pour les hommes, et 1,60 m, 60 kg et 35 ans pour les femmes), le métabolisme basal est de 44 W/m<sup>2</sup> pour un homme, et de 41 W/m<sup>2</sup> pour les femmes ;
- Le métabolisme de repos : C'est la chaleur minimale produite dans des conditions pratiques de repos. Par exemple un individu en position assise, ce métabolisme est de l'ordre de 105 W/m<sup>2</sup> ;
- Le métabolisme de travail : Le métabolisme de travail d'un corps humain dépend de l'activité physique de l'individu. Dans le cas de travail de bureau, le métabolisme est estimé à 105 W/m<sup>2</sup> à 140 W/m<sup>2</sup>.

<sup>32</sup>Viens du mot métabolisme : Ensemble des processus de transformation des substances dans l'organisme et des phénomènes qui s'y rattachent.

<sup>33</sup>Met : correspond à l'activité métabolique d'un sujet au repos

<sup>34</sup>Métabolisme est une grandeur toujours positive ou nulle.

Les températures de confort correspondant à l'énergie dégagée pour chaque type d'activité métabolique d'un individu sont données par la figure ci-après :

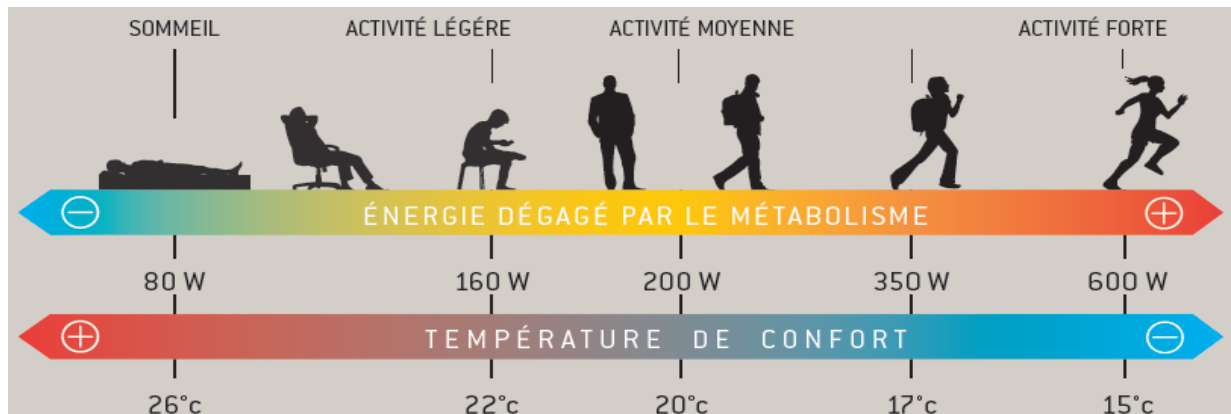


Figure 22 : Températures de confort correspondant à l'énergie dégagée pour chaque type d'activité métabolique d'un individu

La détermination du métabolisme d'un individu est classée ainsi en trois niveaux selon le degré de précision [ISO ,1996] ; AFNOR, 1990] :

- Le premier niveau, estimation du métabolisme à partir d'une classification par type d'activité et par profession ;
- Le deuxième niveau, estimation par les composantes d'activité ; et
- Le troisième niveau, détermination par mesure directe.

Le métabolisme d'un corps humain peut être obtenu ainsi analytiquement en additionnant les valeurs suivantes :

$$M = B_M + M_P + M_W + M_M \quad [1]$$

Avec :

- ❖  $B_M$  : métabolisme basal ( $W/m^2$ ) ;
- ❖  $M_P$  : composante posturale ( $W/m^2$ ) ;
- ❖  $M_W$  : composante d'activité ( $W/m^2$ ) ;
- ❖  $M_M$  : composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse ( $W/m^2$ ).

Le métabolisme est donc fourni par la puissance totale produite par le corps humain :

$$\text{Métabolisme} = \text{Puissance totale produite par le corps (Met)} \quad [2]$$

Le bilan thermique [ASHRAE ,2009] du corps humain pendant la réalisation de cette activité de transformation peut s'écrire ainsi :

$$S = M - W_k - E_{sk} - E_r - C - R - C_k \quad (W/m^2) \quad [3]$$

Avec :

- $M$  : L'activité ou la chaleur métabolique (W) ;
- $W_k$  : Le travail externe (W) ;
- $E_{sk}$  : Le flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau [ $W/m^2$ ] ;

- $E_r$  : Le flux de chaleur échangé par voie respiratoire [ $W/m^2$ ] ;
- $C$  : Le flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau [ $W/m^2$ ] ;
- $R$  : Le flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau [ $W/m^2$ ] ;
- $C_K$  : Le flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau [ $W/m^2$ ].

La surface de la peau ( $A_{Du}$ ), en  $m^2$ , se calcule en fonction du poids ( $P$ ) et de la taille ( $H$ ) de l'individu, tel que :

$$A_{Du} = 0,203 \cdot P^{0,425} \cdot H^{0,725} \quad [4]$$

La production de l'énergie métabolique traduit la vie cellulaire, qui est le résultat de la consommation d'oxygène et du dégagement de gaz carbonique. Une partie de ce métabolisme est utilisée par les muscles pour le travail externe ( $W$ ) d'un individu, défini en fonction d'un facteur  $n$ , appelé rendement mécanique, tel que :  $W = n \cdot M$  [5], ( $n$  n'excède pas 20 % et pour les activités classiques de bureau, il est pratiquement nul).

La production de chaleur métabolique produite dans le corps est mise en profit d'une élévation de la température interne, c'est-à-dire dissipée à l'extérieur suivant différents modes d'échanges : principalement par convection, par rayonnement, par évaporation et respiration. Comme illustre la figure 23 ci-contre. Nous allons voir ci-dessous ces différents modes d'échange métabolique.

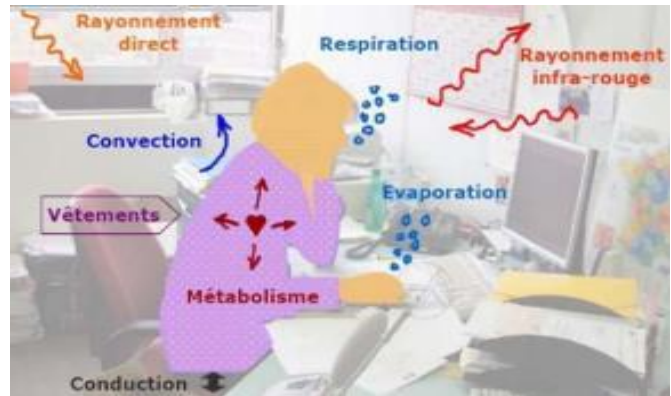


Figure 23 : Interaction thermique entre le corps humain et son environnement.

#### IV-4-1- L'échange de chaleur par convection

La convection est le transfert de chaleur entre le corps et l'air ambiant<sup>35</sup>. Pour cela, l'échange convectif dépend de la différence entre la température de l'enveloppe corporelle ainsi que le mouvement de l'air qui l'entoure. Si l'air est plus froid, le corps se refroidit par le mouvement de l'air, qui se réchauffe au contact du corps et s'élève pour former un contour de panache au-dessus de la tête avant d'être dissipé dans l'environnement [Nicol ,1993]. Et quand l'air est plus chaud que la surface en contact, la convection résulte un réchauffement du corps. En cas de certaines activités comme la marche, course, etc., le mouvement relatif de l'air par rapport au corps s'ajoute au mouvement effectif de l'air.

Ce type d'échange thermique peut calculer par l'expression suivante [ASHRAE ,1997] :

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad [6]$$

<sup>35</sup>Ou l'eau lorsque nous sommes immergés

Avec :

- $C$  : le flux de chaleur convectif ( $W/m^2$ ) ;
- $f_{cl}$  : le facteur d'habillement ;
- $h_c$  : le coefficient d'échange convectif ( $W/m^2 \cdot K$ ) ;
- $t_{cl}$  : la température de la surface externe du vêtement ( $^{\circ}C$ ) ;
- $t_a$  : la température d'air ( $^{\circ}C$ ).

Le facteur  $f_{cl}$  est le rapport de la surface vêtue du corps à la surface corporelle, il est égal à 1 pour un sujet nu. Le coefficient d'échange convectif  $h_c$  dépend du mouvement de l'air effectif autour du corps. L'ASHRAE [1997] propose plusieurs expressions empiriques pour calculer  $h_c$ , selon différentes configurations (personne assise, debout, en marche dans un air calme ou en mouvement), avec les limites d'application exprimées en termes de vitesse d'air.

#### IV-4-2- L'échange de chaleur par rayonnement

C'est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par onde électromagnétique. Dans ce fait, le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température cutanée et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse. Le flux radiatif échangé par le corps correspond ainsi à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement [Thellier, 1989].

Le calcul du flux radiatif est conditionné par l'homogénéisation thermique ainsi que la moyenne pondérée des températures de surface des parois du local en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au sujet. Ainsi, l'équation du flux radiatif peut s'écrire :

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - \bar{t}_r) \quad [7]$$

Où

$$h_r = 4 \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot f_{eff} \cdot \left[ 273,2 + \frac{t_{cl} + \bar{t}_r}{2} \right]^3 \quad [8]$$

Avec :

- $R$  : Flux de chaleur radiatif ( $W/m^2$ ) ;
- $f_{cl}$  : Facteur d'habillement ;
- $h_r$  : Coefficient d'échange radiatif linéarisé ( $W/m^2 \cdot K$ ) ;
- $t_{cl}$  : Température de la surface externe du vêtement ( $^{\circ}C$ ) ;
- $\bar{t}_r$  : Température radiante moyenne ( $^{\circ}C$ ) ;
- $\epsilon$  : Émissivité moyenne du corps ;

- $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ) ;
- $f_{\text{eff}}$  : Coefficient effectif de surface rayonnante.

Le coefficient  $f_{\text{eff}}$  est le rapport entre la surface du corps qui rayonne et la surface corporelle totale. Il joue le rôle d'un facteur de forme et dépend de la posture (0,70 pour une personne assise et 0,73 pour une personne debout). Quant à l'émissivité, elle est typiquement proche de l'unité [ASHRAE ,1997].

Si l'environnement radiatif est fortement hétérogène (large baie vitrée, panneaux rayonnants), la température moyenne de rayonnement est insuffisante, dans ce cas il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement.

Les équations du flux convectif et du flux radiatif sont souvent combinées pour exprimer l'échange total de chaleur sensible en fonction de la température opérative  $t_o$  et le coefficient d'échange de chaleur sensible  $h$ . Cette équation d'échange total peut s'écrire ainsi :

$$(C+R) = f_{cl} \cdot h \cdot (t_{cl} - t_o) \quad [9]$$

Avec :

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c} \quad [10]$$

Et :

- $(C+R)$  : L'échange de chaleur sensible cutané ( $\text{W/m}^2$ ) ;
- $t_o$  : La température opérative ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;
- $h$  : le coefficient d'échange de chaleur sensible ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

En considérant le vêtement comme une seule couche, ainsi les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température  $t_{sk}(^{\circ}\text{C})$  et celle de la surface du tissu à température  $t_{cl}(^{\circ}\text{C})$ , les transferts de chaleur sensible peuvent être alors écrits de la manière suivante :

$$(C + R) = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R_{cl}} \quad [11]$$

$R_{cl}$  étant la résistance thermique vestimentaire ( $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ).

#### IV-4-3- L'échange de chaleur latente ou évaporation

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau dans la surface de la peau. Il existe deux types d'évaporation cutanée, à savoir : la perspiration et la transpiration. (i) La perspiration est un phénomène d'évaporation diffusive continue liée à la présence permanente d'eau sur la peau. La quantité d'eau évaporée par perspiration est ainsi en fonction des conditions hygrométriques de l'air ambiant, voisinant de 11 g/h par mètre carré de la peau ; (ii) La transpiration<sup>36</sup>, qui est le processus

<sup>36</sup>Appelée aussi sudation

de régulation qui se déclenche dès que le corps humain n'est plus en équilibre thermique. L'évapotranspiration nous permet ainsi d'évacuer la chaleur même si l'air ou les surfaces environnantes sont plus chauds que notre peau.

Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps. Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface cutanée, l'air environnant ainsi que la mouillure cutanée. L'échange de chaleur évaporatoire cutanée est donné par la relation :

$$E_{sk} = \frac{W (P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + 1/(f_{cl} h_e)} \quad [12]$$

Avec :

- ☞  $E_{sk}$  : L'échange de chaleur évaporatoire cutanée (W/m<sup>2</sup>) ;
- ☞  $P_a$  : la pression de vapeur d'air (kPa) ;
- ☞  $P_{sk,s}$  : La pression de vapeur à la surface de la peau (considérée saturée) (kPa) ;
- ☞  $R_{e,cl}$  : La résistance vestimentaire à l'évaporation (similaire à  $R_{cl}$ ) (m<sup>2</sup>. KPa/W) ;
- ☞  $h_e$  : Le coefficient d'échange de chaleur par évaporation (similaire à  $h$ ) [W/ (m<sup>2</sup>. KPa)] ;
- ☞  $f_{cl}$  : Facteur d'habillement ;
- ☞  $W$  : La mouillure cutanée.

Le coefficient d'évaporation  $h_e$  peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif  $h_c$  moyennant la relation de Lewis :  $h_e/h_c = L_R$  [13], où  $L_R$  est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,5 °C/kPa pour des conditions intérieures typiques [ASHRAE ,1997].

La mouillure cutanée est le rapport entre l'évaporation actuelle  $E_{sk}$  et l'évaporation maximale possible  $E_{max}$  (obtenu en remplaçant  $W$  par 1). Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour  $W=1$ , la peau est complètement mouillée) [Thellier,1989]. La mouillure cutanée dépend donc de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. D'ailleurs, elle n'est jamais nulle, il y a toujours une diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées. Il s'agit de perspiration insensible, elle vaut 6 % de l'évaporation maximale.

La perte de chaleur est de l'ordre de 120 W dans des conditions de températures de 18 à 30 °C, pour un individu au repos, en air calme, et peut aller jusqu'à 500 W dans des conditions d'activités physiques soutenues.

Il faut toutefois que l'air ne soit pas plus humide, car l'évaporation devient alors impossible. Ce phénomène rend le climat tropical pénible<sup>37</sup> à supporter. Si le point de rosée dépasse la température de la peau, c'est la vapeur qui s'y condense, en chauffant la peau<sup>38</sup>.

#### IV-4-4- L'échange de chaleur par respiration

Pendant la respiration, le corps d'un individu échange de la chaleur sensible et latente, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. À la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps, et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges respiratoires dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire. L'équation suivante permet de calculer les échanges de chaleur respiratoires [ASHRAE ,1997] :

$$C_{res} + E_{rs} = 0,0014 \cdot M \cdot (t_{exp} - t_a) + 0,0173 \cdot M \cdot (P_{exp} - P_a) \quad [14]$$

Avec :

- $C_{res}$  : Le flux de chaleur par convection respiratoire (W/m<sup>2</sup>) ;
- $E_{rs}$  : Le flux de chaleur par évaporation respiratoire (W/m<sup>2</sup>) ;
- $M$  : La production de Chaleur métabolique (W/m<sup>2</sup>) ;
- $t_{exp}$  : La température de l'air expiré (~34 °C) (°C) ;
- $t_a$  : La température de l'air ambiant (°C) ;
- $P_{exp}$  : La pression de vapeur d'eau dans l'air expiré (5,87 kPa à 34 °C) (kPa) ;
- $P_a$  : La pression de vapeur d'eau dans l'air (kPa).

La figure 24 ci-contre illustre et résume l'interdépendance entre les variables physiques de l'environnement et les différents modes d'échange de chaleur sensibles (la conduction, la convection et le rayonnement) du corps humain :

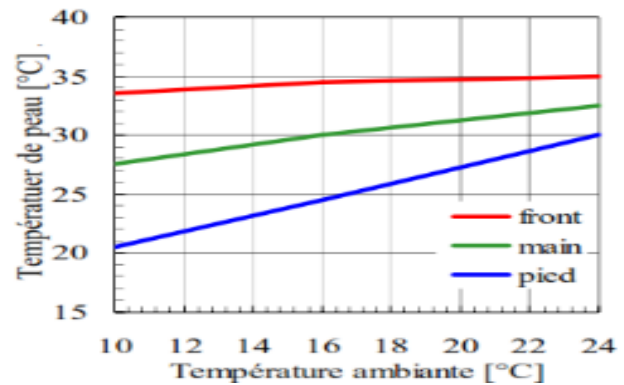


Figure 24 : Relation entre les paramètres de confort et les modes d'échange de chaleur

<sup>37</sup>Puisqu'exigent beaucoup d'efforts causant une grande fatigue désagréable.

<sup>38</sup>C'est ce qui arrive notamment dans le sauna ou le bain turc

Ces différentes manières d'échanges thermiques du corps humain avec l'environnement extérieur nous permettent de dire que, la température du corps a tendance à rester très stable et la température de la peau varie en fonction des circonstances, comme expose le graphe 7 ci-contre. La sensation thermique est donc le résultat de plusieurs facteurs dont leur harmonisation conduit à l'équilibre thermique ou neutralité thermique<sup>39</sup> d'un individu pour exprimer finalement son bien-être.



Graph 7: Température de la peau en fonction de la température ambiante

#### IV-5- BILAN DES ÉCHANGES THERMIQUES DU CORPS HUMAIN

Grâce à l'équilibre opposant la production de chaleur endogène<sup>40</sup> et aux pertes de chaleur vers l'environnement extérieur<sup>41</sup>, l'homme assure sa stabilité thermique corporelle<sup>42</sup> dans laquelle dérive l'ambiance confortable. Néanmoins, s'il y a un déséquilibre au profit de la thermolyse, c'est l'ambiance froide que nous éprouvons. Dans le cas contraire, c'est une ambiance chaude qui s'enracine, exhortée par une thermogenèse grandissante. L'organisme dispose deux voies pour effectuer ces échanges avec le milieu extérieur, à savoir : la peau et la voie respiratoire. Ainsi l'équation d'équilibre entre le corps et l'ambiance interne [Victor CANDAS], s'écrit comme suit :

$$C_{res} + E_{res} + K + C + R + E + H = 0 \quad [15]$$

☞ H : étant la production de la chaleur interne du corps (en Watt).

Au repos  $H = M$  [16], [M le métabolisme (en Watt)] et au travail :  $H = M - W$  [17] [W étant le travail métabolique (en Watt)]. Le sens des échanges thermiques est ainsi en fonction de la différence de température<sup>43</sup>.

☞  $C_{res}$  : L'échange de chaleur au niveau des voies respiratoires par convection<sup>44</sup> (W/m<sup>2</sup>) ;

☞  $E_{res}$  : L'échange de chaleur au niveau des voies respiratoires par évaporation<sup>45</sup> (W/m<sup>2</sup>) ;

<sup>39</sup>Constance de la température corporelle

<sup>40</sup>Appelé aussi Thermogenèse : Métabolisme de base et activité Physique

<sup>41</sup>Dites Thermolyse

<sup>42</sup>Ou Homéotherme

<sup>43</sup>Le signe est négatif si la température opérative est inférieure à la température cutanée, sinon des gains thermiques (positif) qui s'ajoutent à l'être humain rendu échauffé par l'ambiance qui l'entourent.

<sup>44</sup>En fonction des débits ventilatoires est de la différence de la température entre l'air inspiré et l'air expiré.

<sup>45</sup>En fonction de l'écart entre la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air inspiré et l'air expiré et du débit ventilatoire.

- ☞ K : L'échange de chaleur au niveau de la peau par conduction (en  $W/m^2$ ) est observé entre cette dernière et les vêtements serrés, les chaussures ainsi que les points d'appui. Il est conditionné par la température moyenne de la peau et des matériaux en contact ainsi que le coefficient d'échange par conduction (conductibilité thermique du matériau)<sup>46</sup>. Pratiquement pour un homme debout, la plante des pieds est considérée comme le seul endroit susceptible de lui faire échanger un peu de chaleur avec le sol (1 % seulement : voir la figure 30 ci-dessous).
- ☞ C : L'échange de chaleur au niveau de la peau par convection (en  $W/m^2$ ) à travers le contact de cette dernière avec l'air ambiant ou l'air confiné sous le vêtement. Les échanges se maximisent en fonction de la grandeur de la surface de peau en contact avec l'air<sup>47</sup>, mais quand on se replie, la convection devient alors minimale. Ce phénomène s'amplifie par la vitesse du vent. En ambiance chaude, il faut se méfier de la température de l'air quand elle est supérieure à la température cutanée<sup>48</sup>, car au lieu qu'elle joue un rôle refroidisseur, la convection va participer à l'élévation de la température corporelle.
- ☞ R : L'échange de chaleur au niveau de la peau par rayonnement (en  $W/m^2$ ), qui est dépendant de la différence de températures entre le corps humain, les surfaces environnantes et la distance qui les sépare, le pouvoir d'absorption et l'émission de rayonnement électromagnétique. Autrement dit, une résultante proportionnellement à : (i) l'émission et à la réception du corps, (ii) à la température cutanée et la température opérative. Si cette dernière est supérieure à 35 °C, un échauffement par l'ambiance est inévitable.
- ☞ E : L'échange de chaleur au niveau de la peau par évaporation (en  $W/m^2$ ) à l'aide de la sueur<sup>49</sup>, considéré comme le moyen le plus performant pour céder la chaleur du corps humain, il est en fonction de (i) la température moyenne de la peau, (ii) l'humidité<sup>50</sup> et la vitesse de l'air ; (iii) la surface mouillée du corps ; (iiii) la perméabilité du vêtement ainsi que (iiiiii) l'eau corporelle disponible.

---

<sup>46</sup>En général, ces échanges sont considérés comme négligeables

<sup>47</sup>Membre écarté et étendu

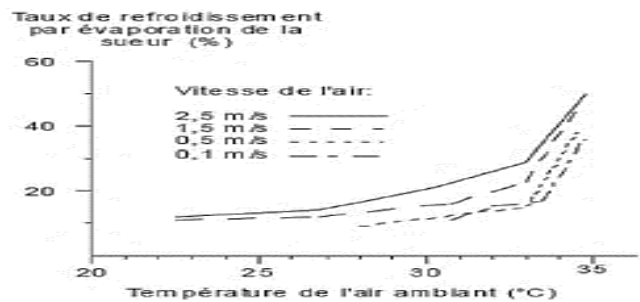
<sup>48</sup>Température opérative  $\geq 35$  °C

<sup>49</sup> La sudation est l'élément clef de la lutte contre la chaleur de l'espèce humaine (Un gramme de sueur consomme environ 2,4 KJ d'énergie humaine). Dans des conditions neutres ou froides, le débit sudoral est nul.

Quant aux glandes sudoripares, elles couvrent la totalité du corps, mais d'une façon inégale (D'après Melle Hamel Khalissa, on trouve 620 cm<sup>2</sup> sur la plante du pied, 180 cm<sup>2</sup> sur le front, et 64 cm<sup>2</sup> sur le dos, etc.)

<sup>50</sup> Pour un air saturé d'humidité, l'évaporation est impossible

Le vêtement imperméable empêche l'évaporation de la sudation. L'évaporation est ainsi favorisée par la circulation de l'air, comme montre le graphe 8 ci-contre, même si l'ambiance conserve une température et une humidité stable. Les ratios des échanges thermiques engendrés par le milieu conditionnant le confort d'un individu sont donnés par la figure 25 ci-dessous.



Graphe 8: Influence de la vitesse de l'air et de la température ambiante sur le taux de refroidissement par évaporation de sueur

- Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau) ;
- Les échanges par rayonnement à la surface de la peau présentent jusqu'à 34 % du bilan, alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %).

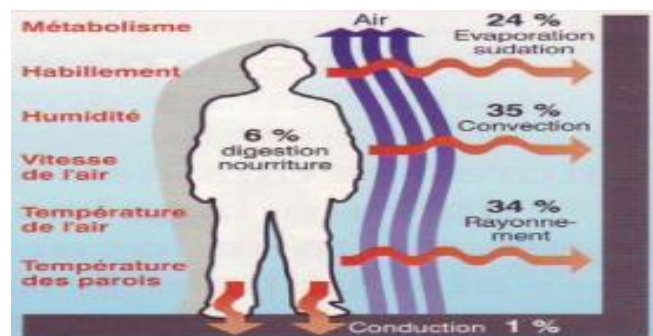


Figure 25 : Bilan des échanges thermiques entre l'homme et son environnement

Cette importance de nos échanges par rayonnement explique que nous sommes très sensibles à la température des parois qui nous environnent [Melle Hamel Khalissa, dans son cours de CONFORT THERMIQUE n° 02].

- Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

#### IV- 6- LES DIFFÉRENTS CRITÈRES DE CONFORT THERMIQUE

À part les conditions propres à l'individu, telles que : son métabolisme, son activité, son habillement et sa santé qui jouent un rôle primordial sur la perception de confort, les paramètres suivants peuvent avoir aussi des influences dans le confort :

- Les conditions thermiques : La température de l'air et des surfaces environnantes, les différentes sources de rayonnement comme les radiateurs, les poêles, le soleil, etc., les perméabilités thermiques des surfaces en contact avec le corps ;
- La qualité de l'air telle que : sa vitesse relative par rapport au sujet, son l'humidité relative, sa pureté ou sa pollution ainsi que leurs odeurs ;

Aussi, le bien-être des occupants d'un espace ne dépend pas seulement des conditions thermiques et aérauliques. Les paramètres suivants entrent aussi en vigueur :

- ✚ Le volume de l'espace, les proportions spatiales, formes des limites ;

- ✚ L'aménagement intérieur ainsi que la présence et la disposition des mobiliers ;
- ✚ La densité d'occupation des espaces ;
- ✚ L'ambiance sociale et les relations avec les autres occupants.

De plus, qu'il n'est pas exclu, mais pas scientifiquement prouvé non plus que certains phénomènes ont une influence encore mal connue sur le bien-être des occupants, tels que les champs électromagnétiques de faible intensité, l'ionisation de l'air, voire des influences encore mal définies scientifiquement, mais elles sont souvent tenues compte [CLAUDE- ALAIN ROULET dans son ouvrage intitulé « CONDITION DE CONFORT ET DE LOGEMENT SAIN », page 2].

Les sensations de confort physiologique et psychosensoriel d'un individu relèvent des phénomènes objectifs et subjectifs, résumés dans le tableau 06 ci-après :

Tableau 6 : Les phénomènes objectifs et subjectifs de la sensation de confort

| Phénomènes objectifs                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Phénomènes subjectifs <sup>51</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Température de l'air : 25 °C ;</li> <li>✓ Absence de courant d'air ;</li> <li>✓ Humidité relative de 40 % ;</li> <li>✓ Activité de détente ;</li> <li>✓ Habillement léger ;</li> <li>✓ Soleil du printemps ;</li> <li>✓ 350 ppm de CO<sub>2</sub> ;</li> <li>✓ Éclairage naturel suffisant ;</li> <li>✓ Absence d'éblouissement visuel.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ambiance d'un jardin ;</li> <li>✓ Présence d'un plan d'eau ;</li> <li>✓ Qualité architecturale du lieu ;</li> <li>✓ Protection visuelle du monde extérieur ;</li> <li>✓ Protection acoustique des bruits extérieurs ;</li> <li>✓ Couleurs chaudes ;</li> <li>✓ Odeurs des plantes et des fleurs ;</li> <li>✓ Odeurs de la cuisine ;</li> <li>✓ Qualités des mets ;</li> <li>✓ Compagnie agréable ;</li> <li>✓ Propriétés des lieux.</li> </ul> |

#### IV-7- LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES AFFECTANT LE CONFORT THERMIQUE D'UN LOCAL

La sensation de confort thermique dans un local est en fonction de plusieurs paramètres, à savoir :

- Les paramètres liés à l'individu : l'activité et la vêteure ;
- Les paramètres physiques d'ambiance : la température de l'air ambiant, la température des parois, la vitesse de l'air, et l'humidité relative de l'air ;
- Les gains thermiques, générés dans l'espace par des sources externes et internes autres que le système de chauffage, tels que : les apports externes, appareils électriques, les occupants, l'éclairage, etc.

Nous allons ausculter successivement ces différents paramètres dans la suite de la présente partie :

<sup>51</sup>Qui concerne l'esprit, le sujet pensant (par opposition à objectif)

## IV-7 1- Les facteurs liés à l'individu

### a- L'ACTIVITÉ

L'activité est un des paramètres essentiels affectant la sensation de confort thermique d'un individu dans un local par l'intermédiaire direct de son métabolisme, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite par le corps humain, et qui lui permet de maintenir celui-ci autour de 37 °C. Les températures dissipées dues au métabolisme de travail correspondant à une activité particulière ainsi qu'au métabolisme de base du corps au repos dissémine dans le local où se situe l'individu. En effet, dans le cas de très forte activité, elle peut être le responsable de sensation d'inconfort chaud, même en présence de condition de météorologique très favorable. Dans le cas d'une activité classique de bureau, les plages de variation du métabolisme demeurent limitées. La norme ISO donne, dans le tableau 07 ci-dessous, les taux moyens des chaleurs dégagées correspondantes aux types d'activités d'un individu dans un local :

Tableau 7 : Évaluation du niveau d'activité d'un individu

| Activités                                              | Dégagement de chaleur |            |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|------------|
|                                                        | W/m <sup>2</sup>      | W/personne |
| Couché, inactif, sommeil                               | 46,00                 | 83,00      |
| Assis, inactif                                         | 58,00                 | 104,00     |
| Activité sédentaire (bureau, lecture, études)          | 70,00                 | 126,00     |
| Debout, inactif                                        | 70,00                 | 126,00     |
| Activité légère, debout (magasin, établi, laboratoire) | 93,00                 | 167,00     |
| Travail debout (ménage, atelier)                       | 116,00                | 209,00     |
| Marche (4 km/h)                                        | 162,00                | 292,00     |
| Travail intensif (mécanique lourde)                    | 174,00                | 313,00     |
| Marche (5 km/h)                                        | 197,00                | 354,00     |
| Marche (10 km/h)                                       | 464,00                | 834,00     |

### b- L'HABILLEMENT

Les vêtements par ses caractéristiques d'isolement, de sa faculté de réfléchir le rayonnement incident et de sa possibilité d'extraire la sueur produite par la peau, afin de la dégager vers l'extérieur, favorisent ou gênent la thermorégulation humaine dans un local. Dans ce fait, ils permettent à un individu de créer un microclimat, à travers leurs résistances thermiques, ainsi qu'aux échanges de chaleur entre la peau et l'habillement.

Sous cette couche vestimentaire apparaît une zone tampon de ce microclimat ayant sa propre température, d'humidité ainsi que de vitesse de vent tout à fait différente des conditions climatiques

externes, mais qui reste en fonction de la ventilation naturelle<sup>52</sup> prise par cette couche. L'habillement représente donc une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est, dans ce cas, de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables en été comme en hiver.

Les échanges en permanence de l'habillement avec l'environnement se font suivant trois mécanismes bien distincts, comme illustre la figure 26 ci-dessous :

- Par conduction : Échange thermique qui a lieu quand le corps est en contact avec une surface. Ces échanges sont limités en importance ;
- Par convection : Échange de chaleur lié au mouvement de l'air autour du corps. Ils sont d'autant plus intenses quand la vitesse de l'air est importante et que l'écart de températures entre l'air et le corps est grand ;

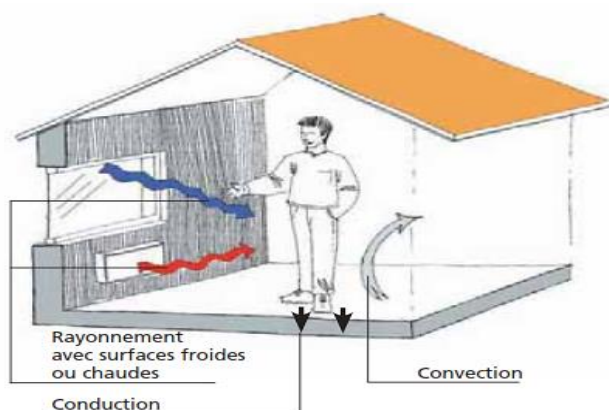


Figure 26 : Échanges des chaleurs liés à l'habillement d'un individu

- Par rayonnement : Échange de rayonnement infrarouge avec les parois qui peuvent être chaudes ou froides. La recherche d'une ambiance de confort d'un point de vue thermique consiste à trouver un équilibre entre tous ces processus d'échange thermique de manière à ce que les occupants des pièces de logement n'aient ni trop chaud ni trop froid.

Le rôle de l'habit est pris en compte à travers la définition des indices de vêtue, exprimés en clo<sup>53</sup>, caractérisant la résistance d'un vêtement. Le tableau 08 ci-dessous, extrait de la norme ISO 1993 donne les valeurs de ces indices pour quelques types d'habillement portés par les individus :

Tableau 8 : Estimation du niveau d'habillement

| Tenue vestimentaire                                                                                                         | Habillement |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------|
|                                                                                                                             | Clo         | m <sup>2</sup> . K/W |
| Nu, debout                                                                                                                  | 0,00        | 0,00                 |
| Short, costume de bain                                                                                                      | 0,10        | 0,015                |
| Tenue tropicale : slip, chemise courte à col ouvert, short, chaussettes légères et sandales                                 | 0,30        | 0,045                |
| Tenue d'été : slip, chemise courte à col ouvert, pantalon long léger et jupe, chaussette légère et chaussure.               | 0,50        | 0,08                 |
| Tenue de travail légère : sous vêtement léger, chemise courte à col ouvert, pantalon de travail, chaussettes et chaussures. | 0,70        | 0,11                 |

<sup>52</sup> Par effet de pompage

<sup>53</sup>Clo : Unité d'isolement vestimentaire, 1 clo correspond à 1.155 m<sup>2</sup> °C/W

|                                                                                                                                                          |      |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| Tenue d'intérieur pour hiver : sous-vêtement, chemise à manche longue, pullover, pantalon ou robe, chaussettes et chaussures.                            | 1,00 | 0,15 |
| Tenue de ville : sous-vêtement à manche et jambes longues, chemise à manche longue, pantalon ou gilet ou robe, veste, chaussettes épaisses et chaussures | 1,50 | 0,45 |
| Tenu d'hiver fourré                                                                                                                                      | 3,00 | 0,45 |

La nature du tissu ainsi que les coupes des vêtements influent aussi ces échanges thermiques avec l'environnement [Thellier Françoise dans son ouvrage intitulé « L'homme et son environnement thermique-Modélisation », page 65].

#### IV-7- 2- Les paramètres physiques

##### a- LA MASSE VOLUMIQUE ( $\rho$ ) OU LA DENSITÉ (KG/M<sup>3</sup>) DES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES PAROIS

Cette valeur permet de connaître la masse d'un matériau par unité de volume. En effet, elle permet d'évaluer le comportement d'un matériau face à la propagation de chaleur. Pour cela, plus cette valeur est élevée plus le matériau sera capable d'emmagasinier la chaleur et donc de la retenir. Par ailleurs, cette information permet de choisir les matériaux convenables pour la construction d'un bâtiment. Pour garantir la durabilité d'un complexe d'isolation en accroche verticale ou en extérieur, il est préférable de choisir un matériau à la fois isolant et ayant une haute densité pour une meilleure stabilité de la température interne d'un bâtiment.

##### b- LES TEMPÉRATURES

##### b-1- La température ambiante de l'air ( $T_a$ ) du local

La température de l'air d'un local, appelée température ambiante ( $T_a$ ), est en général déclenchée par leurs [gains thermiques](#) (externes et internes), développés amplement dans le sous-paragraphe IV-7-3- du présent chapitre. Elle intervient dans le bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. La température ambiante de l'air est largement utilisée comme indice de confort dans le cas d'un contrôle peu strict du confort thermique [Cordier, N. Thèse de doctorat intitulé : « Développement et évaluation de stratégies de contrôle de ventilation appliquées aux locaux de grandes dimensions ». 2007. page 61]. Elle est donc utilisée pour définir les consignes de température références pour les installations de chauffage en période hivernale et climatisation en période estivale d'un bâtiment climatisé.

Le Règlement Général pour la Protection du Travail (RGPT), dans son article 64 du titre II, impose des températures ambiantes de l'air minimum et maximum en fonction du travail effectué, c'est-à-dire du

métabolisme, pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %, données par le tableau 09 ci-dessous, de référence des températures ambiantes de l'air suivant le type/destination d'un local.

Tableau 9 : Valeur de référence de température de l'air

| Type de local                                                                                                                                                                        | Température de l'air |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Locaux ou des gens normalement au repos ou exerçant une activité physique très légère. Par exemple : bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence. | 21,00 °C             |
| Locaux ou des gens peu ou pas habillés au repos ou exerçant une activité physique très légère. Par exemple : salles d'examen ou soins médicaux, vestiaire.                           | 23,00 à 25,00 °C     |
| Locaux où des gens habillés exercent une activité physique très légère. Par exemple : ateliers, laboratoires, cuisines                                                               | 17,00 °C             |
| Locaux où des gens habillés exercent une grande activité physique. Par exemple : salles de gymnastique, Salles de sport                                                              | 17,00 °C             |
| Locaux qui servent que de passage pour les gens habillés normalement. Par exemple : corridors, cages d'escalier, vestiaire, sanitaire.                                               | 17,00 °C             |
| Locaux qui gardent uniquement à l'abri du gel. Par exemple : garages, archives.                                                                                                      | 5,00 °C              |

Ces températures de l'air ont été calculées pour une valeur moyenne de surface de parois inférieure à 2 °C. Ainsi, elles sont acceptées dans certains cas comme température de confort dans le cadre d'une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie.

Pour mesurer manuellement la température ambiante de l'air, on peut utiliser :

- Les thermomètres à dilatation de liquides (mercure, alcool) ;
- Les thermomètres électriques ou électroniques<sup>54</sup> (à résistance ou à semi-conducteur).

Illustrés par la photo 8 ci-contre.



Photo 8 : Types de thermomètre pour mesurer la température ambiante de l'air.

## b-2- La température des parois (appelée aussi température radiante)

Lorsqu'une paroi est plus chaude que le corps, elle rayonne vers lui, produisant une sensation de chaleur. Inversement, une paroi froide (comme un vitrage simple en hiver) absorbe le rayonnement chaud du corps et produit une sensation de froid. Cette température est très importante dans la sensation de confort ou

<sup>54</sup>Ces thermomètres sont très précis et très sensibles par rapport thermomètre à dilatation.

d'inconfort thermiques, aussi bien en été qu'en hiver. Une paroi mal isolée présente une température trop inférieure par rapport à la température de l'air ambiant. Ce qui conduit souvent à ressentir un inconfort local dû à la différence de températures en question. Comme explique Melle Hamel Khalissa, dans son cours de Sciences pour l'Architecture : « Ce phénomène ressemble à l'ambiance interne d'une tente implantée dans une région froide en plein hiver. Ainsi dans ces conditions, même si l'on dispose d'un instrument de chauffage, on sent toujours le froid dans le dos ». L'expérience réalisée au Massachusetts Institute of Technologies, montré par la figure 27 ci- dessous, confirme le raisonnement d'Hamel :

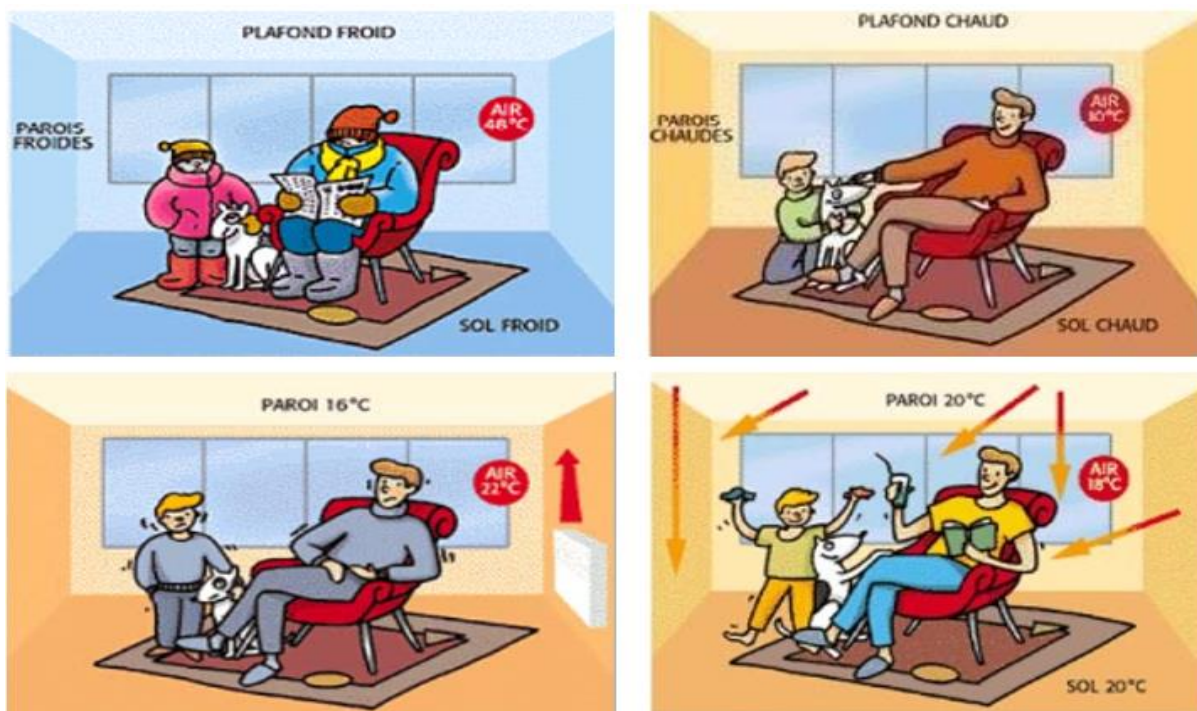


Figure 27 : Expérience sur l'importance de la température d'une paroi

Dans les pratiques, les diverses surfaces délimitant une chambre n'ont pas toujours la même température. Dans ce cas, la température radiante moyenne en un endroit d'une pièce est la température homogène qu'aurait une pièce imaginaire dans laquelle le rayonnement reçu à cet endroit est le même que celui dans la pièce réelle.

Dans la pratique, les quantités de la chaleur accumulées dans une paroi peuvent s'obtenir en utilisant le thermomètre de contact (illustré ci-contre) conçu pour mesurer les températures des surfaces. L'opération de mesure consiste à placer la sonde thermométrique au contact de la surface à mesurer<sup>55</sup> suivie par une lecture et terminée par l'interprétation des résultats.



Photo 9 : Thermomètre de contact pour mesurer la température de la paroi

<sup>55</sup> Il est important d'avoir un bon contact entre la sonde et la paroi, mettre une goutte d'huile, au besoin, pour parfaire la mesure.

### b-3- La température opérative (ou température sèche)

La température opérative est un indice de confort thermique intégrant les deux paramètres thermiques développés ci-dessus, dont : la température de l'air ambiant ( $T_a$ ) et la température moyenne des parois ( $T_{\text{moyenne de parois}}$ ). Il s'agit donc de l'indicateur, des effets convectifs et radiatifs, du confort de l'individu. Cette catégorie de température, appelée « température opérative » ( $T_{op}$ ) ou « température sèche », ressentie par la surface cutanée d'un individu dans un local est donc la moyenne pondérée de la température de l'air ambiant et la température des parois. La norme ISO 7730 fixe la méthode de calcul de la température opérative d'un local, telle que :

$$T_{op} = aT_a + (1-a) T_{\text{moyenne de parois}} \text{ où } a = 0,5 + 0,25v \quad [18]$$

$v$  étant la vitesse relative de l'air (m/s).

Dans le cas où il n'y a pas de courant d'air, cette vitesse sera nulle ou négligeable. Ainsi la température opérative ( $T_{op}$ ) de l'air est la moyenne arithmétique de la température de l'air et la température radiante, ainsi :

$$T_{op} = 0,5 (T_a + T_{\text{moyenne de parois}}) \quad [19]$$

Et si la vitesse de l'air vaut 2 m/s ou plus, la température de l'air et la surface environnante n'ont plus d'effet sensible. La figure 28 ci-après illustre ce phénomène :

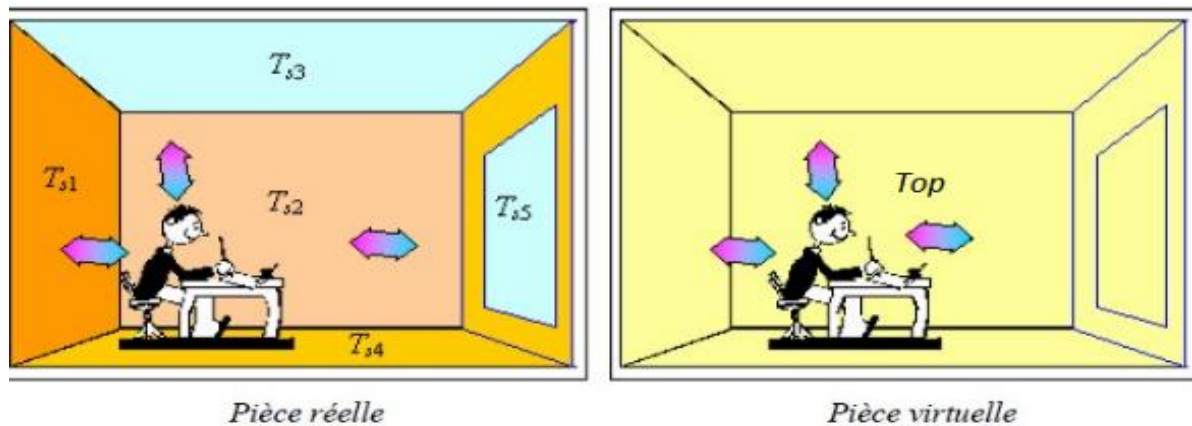


Figure 28 : Définition de la température opérative

On en conclut que la température ressentie par le corps humain n'est pas la température ambiante de l'air, mais la moyenne entre la température de l'air et celle des parois qui entourent la personne, c'est-à-dire la « température opérative ».

Pour évaluer la température opérative d'un local, un nouvel indice intégrant l'effet des paramètres de base de confort thermique, et applicable dans des conditions transitoires chaudes, modérées ou froides appelées « SET » (température effective standard) a été mis en place [ASHRAE, 1997]. Le SET représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêtue standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait

la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve [Bassam MOUJALLED, thèse de doctorat intitulé : « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés », 2007, page 43]. La sensation thermique d'un individu occupant un bâtiment naturellement ventilé peut-être ainsi déduite à partir des différentes valeurs de SET, donnée par le tableau 10 ci-après, par rapport à leur métabolisme, dans laquelle les températures de confort viable dans le local considéré devraient osciller entre 17,50 °C et 30 °C :

Tableau 10 : Relation entre SET et sensation corporelle

| SET (°C).     | Sensation                                 | État physiologique d'une personne sédentaire |
|---------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| > 37,50       | Extrêmement chaud                         | Échec de la régulation                       |
| 34,50 – 37,50 | Très chaud, très inacceptable             | Sudation profuse                             |
| 30,00 – 34,50 | Chaud, inconfortable, inacceptable        | Sudation                                     |
| 25,60 – 30,00 | Légèrement chaud, légèrement inacceptable | Sudation légère, vasodilatation              |
| 22,20 – 25,60 | Confortable et acceptable                 | Neutralité                                   |
| 17,50 – 22,20 | Légèrement froid, légèrement inacceptable | Vasoconstriction                             |
| 14,50 – 17,50 | Froid et inacceptable                     | Refroidissement ralenti du corps             |
| <14,50        | Très froid, très inacceptable             | Frissons                                     |

### C- L'HUMIDITÉ DE L'AIR

Le bon niveau des taux d'humidités internes avec les températures internes d'un bâtiment sont les points cruciaux pour leur confort. En effet, des études montrent que le corps humain est beaucoup moins sensible à l'hygrométrie qu'à la température et celle-ci peut être comprise sans gêne entre 40 % et 60 %. Le taux d'humidité d'un local affecte directement la surface de la peau de l'occupant ainsi qu'à l'enveloppe du bâtiment, soit sur sa face intérieure, soit en traversant les murs eux-mêmes. Des dégâts peuvent apparaître ainsi dans les pièces trop humides et froides. Car, il en résulte des traces de poussières ou des spectres de moisissure plus rapides à ces endroits.

Le climaticien estime le confort à l'aide du couple température sèche de l'air et hygrométrie qu'il place sur le diagramme de l'air humide. Il peut alors rapidement évaluer la qualité de l'ambiance en se basant sur les polygones de confort. Ceux-ci sont établis sur la base des études statistiques menées en laboratoire. Les résultats ainsi obtenus sont variés suivant la source ainsi que les modèles retenus (cf. le sous-paragraphe IV-11 relatif aux [différents modèles de confort thermique](#) ici-bas)

L'[humidité relative](#) ainsi que l'[humidité spécifique](#) sont les plus ressenties par l'enveloppe humaine dans un local. Avant d'entrer dans le vif du sujet de ces deux types d'humidité, nous allons voir d'abord les différentes sources, ainsi que les différents types de transfert d'humidité.

## c-1- Les différentes sources d'humidité d'un local

Les causes d'humidité dans une construction sont multiples, dont :

- ▶ Venant de l'extérieur comme la pluie ;
- ▶ Venant de l'intérieur comme la production de vapeur d'eau due à la température issue de l'activité des usagers du local ;
- ▶ Venant à la fois de l'extérieur et de l'intérieur comme les fuites et courants d'air dans les joints et fissures des murs.

## c-2- Les différents types de transfert d'humidité

Il existe plusieurs types d'humidité, dont les plus présents dans le bâtiment sont définis et illustrés ci-dessous :

☞ L'humidité ascensionnelle : appelée aussi humidité par capillarité, est principalement liée à une coupure d'étanchéité inadéquate, détériorée ou tout simplement inexistante. Dans certains cas, l'absence de coupure de capillarité des murs permet à l'humidité de monter jusqu'à 1,5 m de hauteur.

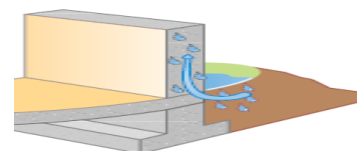


Figure 29 : L'humidité ascensionnelle

☞ L'humidité traversante : Constitue un autre problème important, parce que l'eau pénètre à travers les murs le long des joints de la construction, surtout sur les façades exposées à la pluie. En effet, les murs sont humides en permanence par l'intermédiaire du mortier de liaison ou élément homogène qui les traversant, l'eau s'infiltre inexorablement et finit par apparaître sur le mur intérieur.

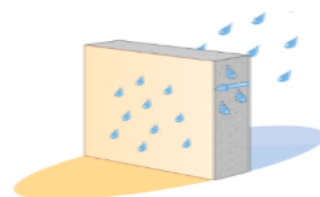


Figure 30 : L'humidité traversante

☞ L'humidité pendant la construction/réhabilitation : Une construction à peine terminée/réhabilitée peut contenir jusqu'à plusieurs dizaines de litres d'eau (mortier, plafonnage, briques, chape...). Ainsi, avant d'entamer les travaux de finition/réhabilitation (peinture, pose du plancher...), il faut d'abord bien aérer et chauffer les lieux jusqu'à ce que la majeure partie de l'humidité de construction se soit évaporée.

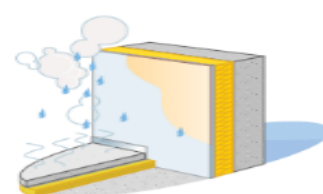


Figure 31 : L'humidité pendant la construction/réhabilitation

☞ L'humidité interne de l'habitation : Dans ce cas, les occupants émettent eux-mêmes ou par leurs occupations de l'humidité : transpiration, respiration, vapeur dans la salle de bains, ménage, cuisine... Ainsi, Il est nécessaire de veiller à toujours maintenir une ventilation suffisante dans un local.



Figure 32 : L'humidité interne à l'habitation

☞ L'humidité accidentelle : Une infiltration accidentelle peut se produire, par exemple à travers la toiture. Elle est souvent causée par des tuiles instables ou de défauts de recouvrement. Même des toitures éclaboussant fréquemment un mur, en roulant dans une flaque d'eau, constituent une source d'infiltration d'eau accidentelle.

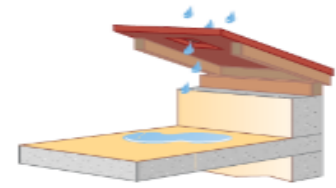


Figure 33 : L'humidité accidentelle

### c-3- Les types d'humidité

#### c-3-1- L'humidité relative

L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, couramment noté  $H_r$ , est le rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions, telle que :

$$H_r = \frac{m \text{ Vapeur}}{m \text{ Vapeur saturante}} \times 100 \quad [20]$$

Ce rapport changera donc si on change la température ou la pression, bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changé. Pour cela, quand il y a 50 % d'humidité dans l'air, cela signifie que dans un volume d'air d'un mètre cube, la masse de vapeur d'eau contenue dans cet air est à la moitié de celle qui pourrait être contenue à la pression de vapeur d'eau saturante. Et, quand la quantité de vapeur d'eau dans l'air reste constante, mais que la température baisse, l'humidité relative atteint à un certain moment le taux de 100 %. C'est ce que l'on appelle la « saturation ». Si la température continue à baisser, la vapeur se transforme en gouttelettes. Celles-ci se condensent tout d'abord sur les surfaces les plus froides d'une pièce comme les fenêtres, mais aussi sur un mur intérieur plus froid que le reste de la pièce.

#### c-3-2- L'humidité spécifique

Par définition, l'humidité spécifique ou absolue est le rapport entre la masse d'eau dans l'air et la masse d'air humide. Lorsque l'humidité spécifique de l'air est maximale ou en état de saturation, elle est appelée humidité spécifique à saturation.

Contrairement à l'humidité relative, l'humidité spécifique se conserve, quelle que soit d'altitude ou la température de la masse d'air du site de la construction, tant qu'il n'y a ni condensation ni évaporation. La raison est qu'un kilogramme d'air ou de vapeur reste invariable, indépendamment de la pression ou de la température de l'air. Ainsi lorsque l'on détermine l'humidité spécifique, l'altitude de la parcelle d'air n'a pas d'importance. Ceci reste valable tant que la quantité de vapeur reste constante.

Malgré cet avantage, la mesure de l'humidité spécifique de l'air est difficile et doit être effectuée dans un laboratoire. Pour cela, les formules empiriques de Nadeau et Puiggali ci-dessous donnent l'expression de l'humidité spécifique, exprimée en fonction de l'humidité relative, telles que :

$$H_s = \frac{0,622 p_{\text{sat}}(\theta) H_R}{101,325 - p_{\text{sat}}(\theta) H_R} \quad [21]$$

Avec

$$p_{\text{sat}}(\theta) = \exp \left[ 23,3265 - \frac{3802,7}{\theta + 273,18} - \left( \frac{472,68}{\theta + 273,18} \right)^2 \right] \quad [22]$$

Où :

$H_R$  : l'humidité relative (entre 0 et 1) de l'air ;

$H_s$  : l'humidité spécifique (en  $\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air hum}}$ ) ;

$\theta$  : la température (en  $^{\circ}\text{C}$ ) (comprise entre 0 et  $45^{\circ}\text{C}$ ) ;

$P_{\text{sat}}(\theta)$  : la pression de vapeur saturante (en Pa).

#### c-4- Les normes liées à humidité de l'air dans un local

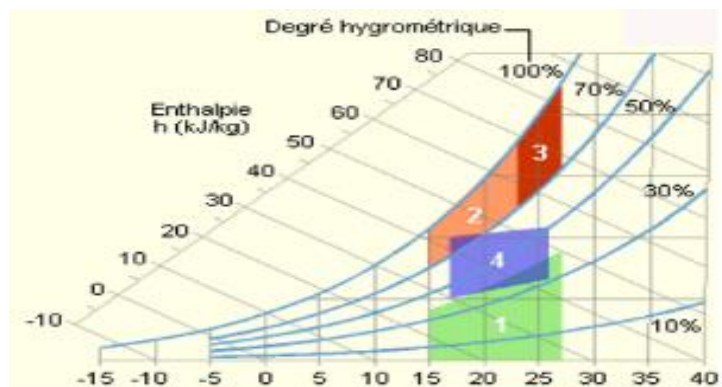
Les normes ci-après imposent les valeurs acceptables des corrélations du couple température – hygrométrie d'un local.

##### c-4-1- Pour l'humidité relative

- **Norme européenne NBN EN 13 779 (2007)** : Dans la plage de température de  $20^{\circ}\text{C}$  -  $26^{\circ}\text{C}$ , la norme préconise une plage d'humidité relative de 30 % à 70 %.

Le graphe 9 ci-dessous [extrait de l'Article de R. Fauconnier : « L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires parus dans le numéro 10/1992 de la revue Chauffage Ventilation Conditionnement »] illustre la plage confort hygrothermique énoncée dans la norme suscitée, en fonction de l'humidité spécifique ainsi que la température ambiante du local considéré :

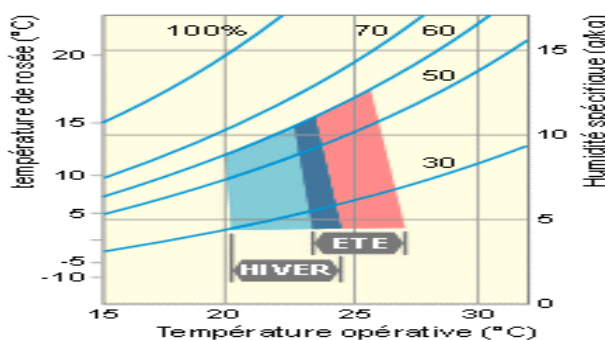
1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse ;
2. et 3 : Zones à éviter vis-à-vis du développement de bactéries et de microchampignons ;
3. Zone à éviter vis-à-vis du développement d'acariens ;
4. Polygone de confort hygrothermique.



Graphe 9: Plage de confort hygrothermique [Source : énergie plus 2012]

### c-4-2-Pour l'humidité spécifique

La norme **ASHRAE 55- 1992** définit l'humidité spécifique d'un local entre 5 ( $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air hum}}$ ) et 60 ( $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air hum}}$ ), comme indiqué sur le diagramme du graphe 10 ci-contre. En effet, pour une humidité spécifique de 30  $\text{g}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air hum}}$ , les températures opératives recommandées pour l'hiver sont de 20 °C à 24 °C, et pour l'été de 23 °C à 26 °C.



Graphe 10: Le taux d'humidité spécifique suivant la norme ASHRAE

Dans cette condition, la température opérative est égale à la moyenne arithmétique de la température de l'air et de la température des parois.

### c-5- Les effets indésirables de l'existence d'humidité dans un local

Le non-respect de l'une des normes suscitées, c'est-à-dire la non-maîtrise d'humidité d'un local, provoque divers phénomènes hygrothermiques et mécaniques qui nuisent à la fois à la santé de l'occupant ainsi qu'à la durabilité des murs existants dudit bâtiment. Les risques majeurs ci-dessous sont les plus identifiés, dans cette situation.

#### c-5-1- La condensation superficielle et le risque de moisissure

Outre les déperditions thermiques, les ponts thermiques entraînent des problèmes de condensation superficielle. En effet, les déperditions de chaleur plus importantes provoquent une diminution de la température de la surface intérieure au droit des ponts thermiques. Si cette température descend sous la température de rosée, une condensation superficielle va apparaître dans cette zone. L'accumulation d'humidité combinée à d'autres conditions risque d'amener une formation de moisissures.



Photo 10 : Moisissures dues à un pont thermique.

#### c-5-2- La condensation interne par diffusion

Les différences de climat entre les enveloppes intérieure et l'extérieure d'une paroi de bâtiment entraînent des transferts de vapeur. En hiver, ces transferts se font globalement de l'intérieur (plus chaud et plus humide) vers l'extérieur, et vice versa en été, comme illustrent les figures ci-contre. Dans ce cas, l'air chargé de vapeur d'eau se déplace dans les parois par diffusion au sein des matériaux. Si en un point de la paroi, la

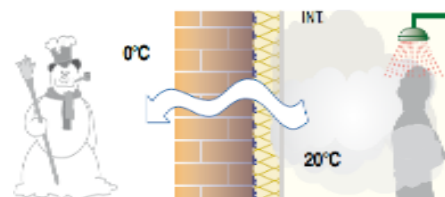


Figure 34 : Diffusion d'humidité interne d'une paroi en hiver

température de rosée est atteinte, l'air va se condenser et charger le mur en humidité. Ce qui peut causer une accumulation de mouillure dans les matériaux. L'eau cumulée ainsi peut dégrader les matériaux et avoir des conséquences directes sur la durabilité de la paroi et de ses performances ainsi que sur le confort et la santé des occupants.

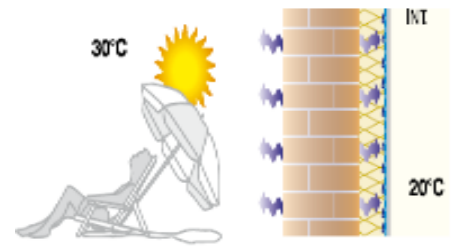


Figure 35 : Diffusion d'humidité interne d'une paroi en été

### c-5-3- La condensation interne par convection

L'air est un fluide, donc sa surpression à l'intérieur d'une enceinte fermée la pousse à chercher toutes les issues possibles pour rejoindre l'extérieur. Dans le cas où la face intérieure de l'enveloppe d'un bâtiment engendre des transferts de vapeur d'eau par convection, l'air qui transite emporte avec lui une grande quantité de vapeur d'eau. À nouveau, une condensation interne est possible si, en un point de la paroi, cet air atteint la température de rosée. Les dégâts probables sont d'autant plus importants que la quantité de vapeur d'eau qui est concentrée en des points particuliers.

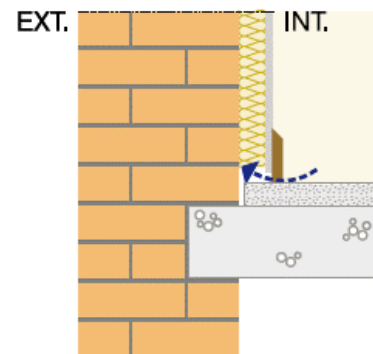


Figure 36 : Condensation interne de l'humidité d'un local

### c-5-4- Les dégradations dues au gel ou aux dilatations de maçonnerie

L'humidification du mur en brique réduit son potentiel de séchage. D'une part, si l'eau présente dans le mur ne parvient plus à s'évaporer en temps froid, elle risque de geler. Ce phénomène provoque des dégradations mécaniques importantes, comme illustre la photo 12 ci-contre. D'autre part, si la paroi externe d'un bâtiment subit davantage des variations de température et d'humidité du climat extérieur, celle-ci engendrera des déformations mécaniques au sein du mur.



Photo 11 : Briques gélives soumises au gel

### c-5-5- Les efflorescences de sels

Les efflorescences, illustrées par la photo 13 ci-contre, sont dues à la cristallisation de sels présents initialement dans les matériaux ou issus d'une source extérieure. Dans le cas d'un mur contenant des ions de sel, les modifications de température et d'humidité peuvent influencer la quantité de sels dissous. Si celle-ci augmente, la quantité de sels qui cristallisera augmentera également, entraînant des conséquences plus marquées au niveau esthétique et parfois au niveau structurel.



Photo 12 : Efflorescences de sels dans un mur

Les efflorescences de surface n'entraînent aucun dommage au niveau des matériaux, mais provoquent des effets esthétiques indésirables. Mais leur apparition dans la structure de la brique provoque une dégradation prématurée de celle-ci.

### d- LA VITESSE DE L'AIR

La variation de la vitesse de l'air dans un local engendre un changement de la température ambiante. La vitesse de l'air joue, dans ce cas, un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires de la surface de la peau. La vitesse intervient, notamment, dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s. Toutefois, à l'intérieur du bâtiment, ces vitesses demeurent limitées, et ne dépassent pas généralement cette limite, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconfort, lié à la présence de courant d'air froid ou chaud localisé. Pour les températures des locaux comprises entre 21 et 22 °C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités. Mais, lorsqu'on fournit un travail musculaire dans des endroits chauds, des vitesses d'air de 1,25 à 2,25 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement. On produit parfois des vitesses plus élevées lorsque des hommes sont soumis pour de courtes périodes à une chaleur rayonnante intense. Ce mouvement d'air sera obtenu à l'aide de ventilateurs. Dans les conditions moyennes d'humidité et d'habillement, le « Guide pratique de ventilation – Woods », donne les valeurs (cf. le tableau 11 ci-après) de refroidissement équivalent de la paroi, en fonction de la vitesse de l'air dans un local.

Tableau 11 : Refroidissement équivalent de la paroi en fonction de la vitesse de l'air

| Vitesse de l'air (m/s) | Refroidissement équivalent (°C) |
|------------------------|---------------------------------|
| 0,1                    | 0,0                             |
| 0,3                    | 1,0                             |

|     |     |
|-----|-----|
| 0,7 | 2,0 |
| 1,0 | 3,0 |
| 1,6 | 4,0 |
| 2,2 | 5,0 |
| 3,0 | 6,0 |
| 4,5 | 7,0 |
| 6,5 | 8,0 |

## e- LES NORMES LIÉES AUX TEMPÉRATURES INTERNES ET LES VITESSES DE L'AIR DANS UN LOCAL

- **RGPT** : le Règlement Général pour la Protection du Travail (RGPT) impose une vitesse d'un local de travail inférieure à 0,5 m/s ;

- **DIN 1946** : la norme DIN 1946 propose une variation des vitesses maximales en fonction de la température intérieure, telle que :

Tableau 12 : Variation des vitesses de l'air en fonction de la température

| T ° local | 20 à 22 °C | 23 °C | 24 °C | 25 °C | 26 °C | 27 °C |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V [m/s]   | 0,18       | 0,20  | 0,22  | 0,24  | 0,27  | 0,32  |

En matière de sensation de confort thermique liée à la vitesse de l'air, un mouvement d'air n'est en moyenne ressenti par une personne que si sa vitesse est supérieure à 0,2 m/s en hiver et 0,25 m/s en été : à ce moment, il est considéré comme un courant d'air.

- **La norme européenne NBN EN 13 779 (2007)**, propose une plage de variation de vitesse avec une valeur par défaut en fonction de la température intérieure, comme suit :

Tableau 13 : Plage de variation de vitesse de l'air en fonction de la température intérieure

| Paramètres             | Situation                        | Plage type  | Valeur par défaut |
|------------------------|----------------------------------|-------------|-------------------|
| Vitesse de l'air [m/s] | Température d'air locale = 20 °C | 0,1 à 0,16  | < 0,13            |
|                        | Température d'air locale = 21 °C | 0,1 à 0,17  | < 0,14            |
|                        | Température d'air locale = 22 °C | 0,11 à 0,18 | < 0,15            |
|                        | Température d'air locale = 24 °C | 0,13 à 0,21 | < 0,17            |
|                        | Température d'air locale = 26 °C | 0,15 à 0,25 | < 0,20            |

On remarque que les vitesses de l'air dans un local fixé par les normes citées ci-dessus sont réservées pour les bâtiments climatisés. C'est pourquoi GIVONI actualisait cette valeur jusqu'à 1,5 m/s en effectuant une expérience, et a établi en effet un modèle destiné pour l'étude de confort thermique de bâtiment naturellement ventilé (cf. le sous-paragraphe IV-11-6 relatif au [modèle de Givoni](#), du présent chapitre, ci-dessous).

Pour mesurer à la main la vitesse de l'air dans un local, on peut utiliser :

- ▶ L'anémomètre à fil chaud<sup>56</sup> ;
- ▶ Et l'anémomètre à palette ou ailette<sup>57</sup>.
- ▶ Etc.

Illustrés par la photo 13 ci- après :



Photo 13 : Les appareils des mesures de la vitesse de l'air.

## f- LES PARAMÈTRES PHYSICOTHERMIQUES

### f-1-Pour les parois opaques

#### f-1-1- La chaleur spécifique ou capacité thermique ( $C_p$ ) d'un matériau

La chaleur spécifique d'un matériau, exprimé en  $[J/ (kg. K)]$ , est la capacité du matériau à emmagasiner par rapport à son poids. Elle est définie par la quantité de chaleur à apporter à 1 kg du matériau pour élever sa température de 1 °C.

La chaleur spécifique d'un matériau, aussi appelée capacité thermique massique ou chaleur massique, dépend de la structure moléculaire et de l'état de la substance considérée.

Dans les bâtiments, la capacité thermique donne une estimation de la qualité isolante des matériaux constituant les parois. Elle représente la quantité de chaleur que ceux-ci emmagasinent lorsque la température extérieure augmente de 1 °C, et donc leur faculté à empêcher la chaleur de les traverser. Les matériaux de construction lourds et denses (béton, brique, pierre...) offrent une capacité thermique intérieure élevée : ils absorbent et stockent la chaleur, et la transmettent petit à petit. Pour assurer un confort thermique optimum dans un bâtiment, il convient donc d'utiliser des matériaux pesants, à forte capacité thermique. Cela permet d'éviter la variation brusque de la sensation de la température interne et de participer ainsi à la bonne inertie thermique de l'ensemble du bâti, parce que :

<sup>56</sup>Il faut mesurer d'abord la quantité d'électricité nécessaire pour que le fil reste à la même température pendant l'opération de prélèvement. Ce matériel est valable seulement pour une vitesse de 0,05 à 1 m/s, au-delà de ces valeurs, des erreurs peuvent être produites.

<sup>57</sup> Utilisable seulement pour les vitesses élevées, c'est-à-dire, supérieur à 1 m/s. Cet appareil a une grande inertie et est très directionnel. Ainsi, éviter de l'utiliser en cas de courant d'air tourbillonnant.

- En hiver, ils mettent beaucoup de temps à monter la température, mais une fois chauffés, ils gardent très longtemps les calories et les restituent sur plusieurs jours, limitant ainsi les besoins de chauffage ;
- En été, ils gardent la fraîcheur plus longtemps et lissent les fluctuations de la température intérieure par rapport à la température extérieure.

La capacité thermique peut être calculée par rapport à un volume donné, on parle alors de capacité thermique volumique, ou par rapport à un poids donné, on parle alors de capacité thermique massique. L'équation de la chaleur spécifique d'un matériau peut s'écrire comme suit :

|                                         |               |
|-----------------------------------------|---------------|
| <b><math>C_p = Q/m. \Delta T</math></b> | <b>[ 23 ]</b> |
|-----------------------------------------|---------------|

Cette formule peut également calculer la variation de la quantité de chaleur, en développant l'expression :

|                                                 |             |
|-------------------------------------------------|-------------|
| <b><math>\Delta Q = m. C_p. \Delta T</math></b> | <b>[24]</b> |
|-------------------------------------------------|-------------|

Avec,

- $\Delta$  : le changement de la valeur d'une variable ;
- m : la masse d'un échantillon (kg) ;
- Q : la quantité de chaleur exprimée en joules (J) ;
- T : la température d'une substance (K) ; et
- $C_p$  : la chaleur spécifique du matériau (J/kg. K).

On en déduit que, plus le matériau est dense, plus sa chaleur spécifique est élevée. Le tableau de l'[annexe 1](#) donne les valeurs usuelles des capacités thermiques des matériaux utilisés dans la construction d'un bâtiment, issu de la réglementation et extrait de l'AGW du 17 avril 2008, Annexe A de l'Annexe VII) [Consultable sur le site d'Energyplus : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348> ]

### f-1-2- Le flux thermique ( $\varphi$ )

Tous les matériaux constituant les parois d'un bâtiment sont composés de particules élémentaires en perpétuel mouvement. L'apport de chaleur ou d'énergie dans ces parois augmente l'agitation interne de leurs molécules. Et le refroidissement de ce même matériau diminue en conséquence cette agitation moléculaire accompagnée d'une restitution d'énergie.

Quand la température extérieure et la température intérieure de la paroi sont inégales, la différence entre ces deux niveaux de température crée un mouvement de la chaleur. Ce déplacement d'énergie ou de chaleur est appelé flux thermique symbolisé par  $\varphi$ (phi), illustré par la figure 37 ci-contre. Ce flux augmente quand l'écart de température augmente lui aussi. Pour une même paroi, de nature et d'épaisseur identiques, et pour un écart de température deux fois plus grand, la migration de chaleur se traduit par un effet double.

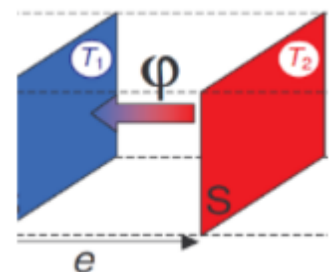


Figure 37 : Le flux thermique traversant une paroi du bâtiment

Le flux de chaleur, appelé aussi puissance thermique, est la quantité d'énergie ou de chaleur passant au travers d'une surface (S) de 1 m<sup>2</sup> de paroi pendant une seconde.

La loi fondamentale de Fourier, régissant le flux de chaleur  $\varphi$  dans une paroi homogène, s'exprime par la formule :

$$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad [25]$$

Où :

- $\varphi$  : flux thermique [W/m<sup>2</sup>] ;
- $\lambda$  : conductivité thermique [W/ (m.K)] ;
- $\frac{dT}{dx}$  : dérivée de la température par rapport à x ;

En régime permanent, la densité de flux thermique est constante, il est donc facile d'intégrer la loi de Fourier, telle que :

$$dT = -\frac{\varphi}{\lambda} dx \Leftrightarrow \int_{T_1}^{T_2} d\theta = -\frac{\varphi}{\lambda} \int_0^e dx \Leftrightarrow T_1 - T_2 = -\frac{\varphi}{e}$$

Ainsi :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} \cdot \Delta T \cdot S \quad [26]$$

Où :

- $\varphi$  : Le flux de chaleur (W), appelé aussi puissance thermique ;
- $\lambda$  : La conductivité thermique (W/ (m.k)) ;
- $\Delta T$  : L'écart de la température de part et d'autre d'une paroi (°C) ;
- $e$  : L'épaisseur de parois (m) ;
- $S$  : la surface de la paroi (m<sup>2</sup>).

Pour une paroi composite, la densité de flux thermique est constante dans toute la paroi. Dans ce cas-là :

$$\varphi = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i}} \quad [27]$$

Avec :

- $T_{int}$  : la température interne du local considéré (K) ;
- $T_{ext}$  : la température externe de la paroi composite considérée (K) ;
- $e_i$  : L'épaisseur de chaque couche constituant la paroi composite (m) ;
- $\lambda_i$  : La conductivité thermique de chaque couche constituant la paroi composite [W/ (m.k)] considérée ;
- $h_e$  et  $h_i$  étant les coefficients d'échanges globaux de convection sur le mur, dont leurs valeurs usuelles sont données dans le tableau 14 ci-après :

Tableau 14 : Coefficient d'échange thermique superficiel d'une paroi [Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, dans son ouvrage intitulé « EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE LA CLIMATISATION EN RÉGION TROPICALE, Tome 01 : CONCEPTION DES NOUVEAUX BÂTIMENTS », page 08].

| Coefficient de convention | Parois en contact avec l'extérieur |          |           | Parois en contact avec un autre local, un comble ou un vide sanitaire |          |           | Paroi vitrée |
|---------------------------|------------------------------------|----------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|----------|-----------|--------------|
|                           | Murs                               | Plafonds | Planchers | Murs                                                                  | Plafonds | Planchers |              |
| $h_e$                     | 16,70                              | 20,00    | 20        | 9,00                                                                  | 20,00    | 5,90      | 16.70        |
| $h_i$                     | 9,00                               | 11,10    | 5,9       | 9,00                                                                  | 20,00    | 5,90      | 9,00         |

Si on connaît préalablement le flux thermique traversant le matériau homogène, par l'intermédiaire de la puissance réelle de la source de chaleur, il est possible de mesurer la conductivité thermique ainsi que la résistance thermique d'un matériau et d'en déduire ensuite le coefficient de résistance thermique, le facteur solaire ainsi que la perméabilité à l'air de l'enveloppe en exploitant respectivement leur expression développée dans les sous-parties qui suivent.

### f-1-3- La conductivité thermique ( $\lambda$ )

La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps/matériaux à conduire la chaleur. La conduction thermique définit donc le mode de transfert de chaleur associé à cette grandeur. La conduction ou conductivité thermique ( $\lambda$ ) représente la quantité d'énergie traversant une surface de 1 m<sup>2</sup> de paroi pour un mètre d'épaisseur de matériau et pour une différence de température de 1 K entre les deux faces, pendant l'unité de temps.

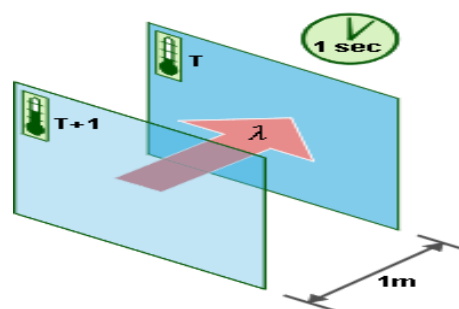


Figure 38 : La conductivité thermique d'un matériau

La conductivité thermique des matériaux se mesure en laboratoire. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin [W/ (m. K)].

La conductivité thermique est une caractéristique constante, qui dépend principalement de la nature et de la température du matériau, mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également.

On résout la conductivité thermique d'un matériau à partir de la relation 26 ci-dessus, telle que :

$$\lambda = \frac{\varphi \cdot e}{S \cdot \Delta T} \quad [28]$$

Avec :

- $\lambda$  : la conductivité thermique [W/ (m. K)] ;
- $\varphi$  : le flux de chaleur traversant la paroi (W/m<sup>2</sup>) ;
- $e$  : L'épaisseur de parois (m) ;
- $\Delta T$  : le gradient ou variation de la température (°C) ;

- S : la surface considérée (m²).

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. En général, la conductivité thermique va de pair avec la conductivité électrique. Par exemple les métaux, bons conducteurs d'électricité et sont aussi de bons conducteurs thermiques. Il y a toutefois des exceptions, le diamant, par exemple, a une conductivité thermique élevée, entre 1000 et 2600 [W/(m.K)], alors que sa conductivité électrique est basse.

Identique à la capacité thermique, l'[annexe 1](#) donne les conductivités thermiques des matériaux de construction utilisés dans la construction d'un nouveau, selon (la toujours) la proposition de l'EnergyPlus.

Les valeurs  $\lambda_{U,e}$  et  $\lambda_{U,i}$  de ce tableau dépendent des conditions d'utilisation du matériau, telles que :

- $\lambda_{U,i}$  : est la conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi intérieure ou dans une paroi extérieure, à condition que ce matériau soit protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation ;
- $\lambda_{U,e}$  : Conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi extérieure qui n'est pas protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation.

#### f-1-4- La résistance thermique (R)

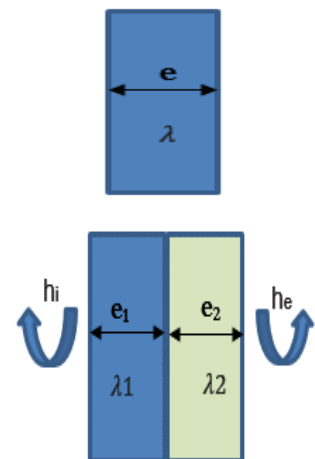
La résistance thermique est un critère d'évaluation de la performance d'un mur. Elle caractérise ainsi sa capacité à ralentir le transfert de chaleur par conduction. Cette résistance dépend de la conductivité thermique  $\lambda$  et de l'épaisseur  $e$  du matériau. Plus l'épaisseur  $e$  d'un matériau isolant est importante et plus son coefficient de conductivité est faible, plus sa résistance thermique sera élevée. La résistance thermique (R) d'une paroi homogène est définie par la relation :

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{\Delta T \cdot S}{\phi} \quad [29]$$

Avec :

- R : La résistance thermique (m². K/W) ;
- e : L'épaisseur de paroi (m) ;
- $\lambda$  : La conductivité thermique W/ (m.k).

Pour un mur composé de plusieurs matériaux, sa résistance thermique globale est la somme des résistances des différentes épaisseurs à laquelle s'ajoute les résistances d'échanges superficiels internes et externes  $1/h_i$  et  $1/h_e$  (les coefficients  $h_i$  et  $h_e$  étant dus à la convection respectivement interne et externe, de part et d'autre de la paroi), soit :



$$R = 1/h_i + 1/h_e + \sum e/\lambda \quad [30]$$

-  $h_e$  et  $h_i$ , en [W/m². °C], étant les coefficients globaux de convection sur le mur donné dans le tableau 17 ci-dessus, relative au coefficient d'échange thermique superficiel d'une paroi ci-haut.

### f-1-5- Le coefficient de transmission thermique (U)

Le coefficient de transmission thermique, noté U, est utilisé pour évaluer la perte de chaleur subie par l'enveloppe d'un bâti, à savoir le mur, le toit, le plancher, ainsi que les ouvertures. Il décrit la quantité de chaleur transmise en une seconde à travers une surface de 1 m<sup>2</sup> dès qu'il y a une différence de température de 1 °C entre l'intérieur et l'extérieur.

Plus le coefficient U d'une paroi est faible, moins il y a de déperditions ; plus la paroi est performante thermiquement. La valeur U, en (W/m<sup>2</sup>. K), d'une couche de matériau dépend aussi de sa conductivité thermique  $\lambda$  et de son épaisseur, telle que :

$$U = \lambda / e \quad [31]$$

C'est l'inverse de la résistance thermique d'un matériau, donc cette relation peut s'écrire aussi comme suit :

$$U = 1/R \quad [32]$$

R étant la résistance thermique [(m<sup>2</sup>. K) /W] du matériau.

Pour un mur constitué par plusieurs couches de matériaux et de conductivités thermiques différentes, ces deux formules peuvent s'écrire respectivement comme suit :

$$\frac{1}{U} = \sum \frac{1}{\lambda} + \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad [33]$$

Ou bien :

$$\frac{1}{U} = \sum R + \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad [34]$$

Avec :

- U : le coefficient de transmission thermique (W/m<sup>2</sup>. °C) ;
- 1/ $\lambda$  : représente la somme des apports de conductivités thermiques des différentes couches ;
- 1/ $h_i$  et 1/ $h_e$  : résistance thermique d'échanges superficiels intérieurs et extérieurs respectifs des matériaux (m<sup>2</sup> °C/W), les valeurs usuelles de  $h_i$  et  $h_e$  sont données dans le tableau 14 ci-haut ;
- R : la résistance thermique du ou de chaque matériau (m<sup>2</sup> °C/W).
- e : épaisseur du ou de chaque matériau (m) ;
- T<sub>1</sub> : la température intérieure du local chauffé (°C) ;
- T<sub>2</sub> : la température extérieure (°C) ;
- T<sub>w1</sub> et T<sub>w2</sub> : les températures des contacts sur la paroi à l'intérieur et à l'extérieur du local (°C).

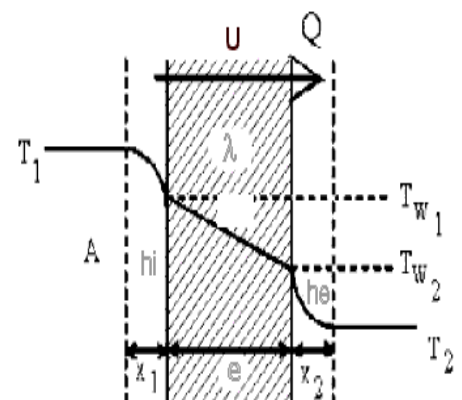


Figure 39 : coefficient de transmission thermique des murs composés par plusieurs couches des matériaux

systèmes. En fonction de la configuration du projet, le calcul du U est réalisé au cas par cas, principalement par des bureaux d'études thermiques.

Dans le cadre de la réglementation thermique, les valeurs utilisées pour les calculs thermiques d'un bâtiment sont déterminées comme suit :

- ☞ S'il existe une valeur U certifiée du système, la valeur est utilisée telle qu'elle ;
- ☞ Si la valeur est déclarée, la valeur utilisée est minorée, ainsi :

$$U_{\text{p utilisé}} = 1,15 \times U_{\text{p déclaré}} \quad [35]$$

Selon l'une des méthodes développées par l'ASHRAE, l'apport solaire par la partie opaque d'une paroi à une heure donnée est constitué d'une part convective directe et d'autre part radiative. L'énergie convective directe est tout droit transmise au local. La part radiative décrit la restitution progressive de la chaleur accumulée par la paroi pendant les 24 heures qui précèdent. En effet, pour le calcul de U, cette association a défini un vecteur de conduction CTS<sup>58</sup>, qui décrit le processus de restitution de la chaleur en fonction du type de paroi. Cependant, en éliminant les valeurs particulières de transmission thermique relatives à chaque type de matériaux de construction, l'ASHRAE constatait qu'on peut faire dépendre directement la masse surfacique d'un mur en place avec leur coefficient de transmission thermique (U), comme informe le tableau ci-après :

Tableau 15 : Coefficient de transmission thermique des matériaux de construction par rapport à leur masse surfacique

| Masse surfacique du mur (kg/m <sup>2</sup> ) | U correspondant (W/ (K. m <sup>2</sup> )) |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 0 à 26                                       | 0,429                                     |
| 26 à 34                                      | 0,428                                     |
| 34 à 52                                      | 0,668                                     |
| 52 à 88                                      | 0,413                                     |
| 88 à 120                                     | 0,335                                     |
| 120 à 150                                    | 0,524                                     |
| 150 à 222                                    | 0,689 <sup>(1)</sup>                      |
| 222 à 323                                    | 0,387                                     |
| 323 à 430                                    | 0,628                                     |
| 430 à 577                                    | 0,467 <sup>(2)</sup>                      |
| 577 à 779                                    | 0,389 <sup>(3)</sup>                      |
| 779 et plus                                  | 0,581                                     |

<sup>58</sup> Conduction Time Series

- (1) Mur en maçonnerie de briques 11 cm d'épaisseur ;  
 (2) Mur en maçonnerie de briques 25 cm d'épaisseur ;  
 (3) Mur en maçonnerie de briques 35 cm d'épaisseur.

### f-1-6- L'absorbance ou le facteur solaire d'une paroi (F )

L'enveloppe d'un bâtiment retransmet une portion de l'énergie incidente sur le mur à l'intérieur de la maison. Dans cette condition, le rayonnement incise pénètre directement à travers la paroi et entraîne un réchauffement, puis réémis d'infrarouge à l'intérieur du local. L'enveloppe du bâtiment subit ainsi une conduction de la chaleur engendrée par les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur d'un local. Le facteur solaire d'une paroi est donc le rapport entre l'énergie due au rayonnement solaire transmis et l'énergie reçue par la paroi, tel que :

$$\phi = \frac{\phi_{\text{transmis}}}{\phi_{\text{entrant}}} = \frac{dQ}{dtQ} = \text{énergie entrante} \quad [36]$$

Où :

$\phi$  : le rayonnement solaire ; et

Q : l'énergie reçue par la paroi.

Les flux thermiques dans une paroi opaque sont considérés comme en régime stationnaire. Ainsi l'absorbance solaire (en %) par unité de surface, pour une différence de température d'un kelvin entre les milieux situés de part et d'autre d'un système est obtenue en fonction du coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), de la résistance thermique (R) ainsi que du coefficient de transmission thermique (U) de la paroi, telle que :

$$F = \alpha \cdot R \cdot U \quad [37]$$

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  est en fonction des couleurs ainsi que de la nature des parois considérées, et est défini dans le tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16 : Coefficient d'absorption «  $\alpha$  » pour murs, toits et fenêtres

| Couleurs et nature de la surface |                                                                                                      | A   |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Surfaces très claires            | Pierre blanche - surface blanche, claire ou crème ciment très clair                                  | 0,4 |
| Surfaces foncées                 | Fibrociment – bois non peint – Pierre brun – brique rouge – ciment foncé - staff rouge, vert ou gris | 0,7 |
| Surfaces très foncées            | Toitures en ardoises foncées - cartons bitumés très sombres                                          | 0,9 |

### f-1-7- La perméabilité a l'air (ou infiltration) de l'enveloppe

Assurer un bon niveau d'étanchéité à l'air d'un bâtiment, c'est de maîtriser les flux d'air qui circulent à travers des orifices volontaires (bouches de ventilation et entrées d'air) et limiter les flux incontrôlés, qui peuvent être sources de pathologies, d'inconfort, et de gaspillage d'énergie. Il ne s'agit en aucun cas de

confiner les occupants dans un « sac plastique », mais au contraire de leur procurer de l'air de qualité en quantité suffisante, mais sans excès. Les principaux enjeux liés à l'étanchéité de l'air d'un bâtiment sont les suivants :

- ☞ L'hygiène et la santé : la qualité de l'air intérieur ;
- ☞ Le confort thermique et acoustique des occupants ;
- ☞ La facture énergétique ;
- ☞ La conservation du bâti ;
- ☞ La sécurité des personnes à proximité de sites industriels.

La mesure de l'étanchéité à l'air de la paroi quantifie le débit de fuite traversant l'enveloppe d'un bâtiment, exprimée en  $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ , sous un écart de pression de 4 Pascal.

Elle concerne toute l'enveloppe du bâtiment, assurant ainsi le clos et couvert, telle que les murs, les liaisons, la toiture et le plancher, les trappes, les passages de câbles, et bien évidemment les parois vitrées, les fenêtres et façades rideaux.

L'étanchéité à l'air d'une paroi est exprimée par :

$$Q_{4\text{Pa}} = \frac{\text{Débit de fuite à 4 Pa}}{\text{Surface parois déperditives}} \quad [38]$$

Dans la pratique, le débit de fuite d'un bâtiment est mesuré par des essais in situ, suivant la norme NF EN 13 829 et son guide d'application GA P50-784. Toutefois, le label Effinergie, le RT 2005 ainsi que le RT 2012 fixent la valeur, fournie par le tableau 17 ci-dessous, la perméabilité à l'air de l'ensemble des parois d'un bâtiment.

Tableau 17 : Valeur de perméabilité à l'air de l'ensemble des parois d'un bâtiment

| Usage                                                                                       | RT 2005 – Valeur de référence en ( $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ ) | Label Effinergie                                  | RT 2012                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                             |                                                                | Valeurs obligatoires en $\text{m}^3/\text{h.m}^2$ |                                      |
| Logement individuel                                                                         | 0,80                                                           | Maximum 0,60                                      | Maximum 0,60                         |
| Logement collectif                                                                          | 1,20                                                           | Maximum 1,00                                      | Maximum 1,00                         |
| Bureaux, hôtels, restauration, enseignement, petits commerces, et Établissements sanitaires | 1,20                                                           | Par défaut en l'absence d'une mesure              | Par défaut en l'absence d'une mesure |
| Autres usages                                                                               | 2,50                                                           | Par défaut en l'absence d'une mesure              | Par défaut en l'absence d'une mesure |

On déduit à partir de ces paramètres de flux thermiques sus-énoncés que les parois/l'enveloppe pleines d'un bâtiment doivent avoir les quatre qualités suivantes :

- Performante thermiquement pour conserver la chaleur ou la fraîcheur acquise passivement à l'intérieur de l'habitation ;
- Homogène en faisant la chasse aux ponts thermiques dus aux défauts d'isolation (liaisons sol-mur et mur-toit, châssis de fenêtre, fondations) pour éviter les déperditions thermiques ;
- Perméable à la vapeur d'eau afin de garantir un échange hygrométrique avec l'extérieur ;
- Saine grâce à des matériaux ne créant ni pollution ni problèmes pour la santé humaine.

## f-2- Pour les parois vitrées

### f-2-1- Le coefficient de transmission thermique (U)

Le coefficient thermique (U) d'un vitrage se décline en trois « sous-coefficients », dont :  $U_g$ ,  $U_f$  et  $U_w$ , détaillés ci-dessous, dans lesquels :

- ❖ Le coefficient  $U_g$  (g : glass) mesure la qualité de l'isolation du vitrage ;
- ❖ Le coefficient  $U_f$  (f : frame) mesure la performance du cadre (bâti) ;
- ❖ Et  $U_w$  (w : window) permet d'évaluer la performance thermique de l'ensemble châssis + vitrage d'une fenêtre, soit de la fenêtre dans son intégralité.

Le coefficient de transmission surfacique moyen de la fenêtre, porte ou porte-fenêtre s'obtient soit par calcul conformément à la norme NF EN ISO 10077 parties 1 et 2, soit par mesure à la boîte chaude selon la norme NF EN ISO 12567-1 dans la limite de l'éprouvette testée. Plus le coefficient U, exprimé en  $[W/(m^2 \cdot K)]$ , est proche de 0 donc bas, plus la performance de l'isolation thermique contre le froid est élevée.

#### ☞ Le coefficient de transmission thermique du vitrage ( $U_g$ )

Le coefficient de transmission thermique ( $U_g$ ), exprimé en  $[W/(m^2 \cdot K)]$ , symbolise la performance d'isolation thermique des vitrages. Il caractérise la quantité de chaleur s'échappant dans une surface de  $1 m^2$  de vitrage pour un différentiel de 1 degré.

Le coefficient de transmission thermique  $U_g$  d'un vitrage est décrit dans la norme NF EN 673, et se calcule en fonction des résistances thermiques :

- ☞ Des différentes couches constituant le vitrage (dont les verres de faibles émissivités) ;
- ☞ De la lame d'air ou de gaz (Argon, etc.) ; ainsi que
- ☞ Leurs résistances superficielles.

Tel que :

$$U_g = \frac{1}{\sum \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum R_{s,k} + R_{se} + R_{si}} \quad [39]$$

Avec :

- $d_j$  : L'épaisseur du verre ou de la couche du matériau j (à l'exception de l'air ou du gaz (m) ;

- $\lambda_j$  : La conductivité thermique du verre ou de la couche de matériau j [W/ (m.k)] ;
- $R_{se}$  et  $R_{si}$  : La résistance thermique superficielle [(m². K) /W] ;
- $R_{s, k}$  : La résistance thermique de la lame d'air ou du gaz [(m². K) /W], définie par la relation :

$$R_{s,k} = \frac{1}{h_r + h_g} \quad [40]$$

Où :

- $h_r$  est la conductance thermique radiative de la lame de gaz, en W/ (m². K), telle que :

$$h_r = 4 \sigma \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1} T_m^3 \quad [41]$$

Avec :

- $\sigma$  : La constante de Stefan-Boltzmann (W/ (m². K⁴)) ;
- $T_m$  : La température moyenne absolue de la lame de gaz (K) ;
- $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont respectivement les émissivités corrigées à la température  $T_m$ . Leurs valeurs sont obtenues en multipliant l'émissivité normale par le rapport figurant dans le tableau 18 ci-dessous :

Tableau 18 : Émissivité corrigée

| Émissivité normale $\varepsilon_n$ | Rapport $\varepsilon/\varepsilon_n$ |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,03                               | 1,22                                |
| 0,05                               | 1,18                                |
| 0,10                               | 1,14                                |
| 0,20                               | 1,10                                |
| 0,30                               | 1,06                                |
| 0,40                               | 1,03                                |
| 0,50                               | 1,00                                |
| 0,60                               | 0,98                                |
| 0,70                               | 0,96                                |
| 0,80                               | 0,95                                |
| 0,89                               | 0,94                                |

Note : des valeurs intermédiaires peuvent être obtenues avec une précision suffisante par interpolation linéaire.

- $h_g$  est la conductance thermique du gaz, en [W/ (m². K)], définie par :

$$h_g = N_u \cdot \frac{\lambda}{s} \quad [42]$$

Où :

- $s$  : L'épaisseur de la lame (m) ;
- $\lambda$  : La conductivité thermique du gaz [W/ (m.K)] ;
- $Nu$  : Le nombre de Nusselt (dans le cas ou  $Nu < 1$ , on doit prendre  $Nu = 1$ ), avec :

$$Nu = A (Gr \cdot Pr)^n \quad [43]$$

Dans laquelle :

- A est une constante qui dépend de l'inclinaison du vitrage ;
- n est un exposant qui dépend de l'inclinaison du vitrage ;
- Gr et Pr sont respectivement les nombres de Grashof et de Prandtl, définis par les relations 50 et 51 ci-après :

$$Gr = \frac{9,81 S^3 \Delta T \rho^2}{T_m \mu^2} \quad [44] \quad \text{et} \quad Pr = \frac{\mu c}{\lambda} \quad [45]$$

Où :

- +  $\Delta T$  : La différence de température entre les surfaces situées de part et d'autre de la lame de gaz (K) ;
- +  $\rho$  : La masse volumique du gaz (kg/m<sup>3</sup>) ;
- +  $\mu$  : est la viscosité dynamique du gaz [kg/ (m.s)] ;
- +  $c$  : La capacité thermique massique du gaz [J/ (kg. K)] ;
- +  $T_m$  : La température moyenne absolue du gaz (K).

Les propriétés de gaz utilisé dans le vitrage d'une maison sont données par l'[annexe 6](#).

Dans le cas où le vitrage comporte N lames de gaz avec  $N > 2$ , plusieurs itérations sont nécessaires pour le calcul des résistances  $R_{s,k}$ . Ces itérations se font en fonction d'un seul paramètre ( $\Delta T$ ) et avec l'hypothèse d'une température moyenne constante  $T_m = 283$  K. Dans ces cas-là, la valeur de départ de  $\Delta T$  est  $15/N$ , où N étant le nombre de lames.

Plus le coefficient  $U_g$  est faible, moins il y a de déperditions, plus le vitrage est performant thermiquement. L'[annexe 3](#) donne les valeurs usuelles de  $U_g$  des vitrages.

### ☞ Le coefficient de transmission thermique de l'encadrement ( $U_f$ )

Le coefficient moyen de transmission thermique d'un cadre de fenêtre est désigné par l'abréviation  $U_f$ . Il peut être déterminé :

- ☞ Soit par calcul numérique, conformément aux normes NF EN ISO 10211 (parties 1 et 2) et NF EN ISO 10077-2, selon la formule suivante :

$$U_f = \frac{\sum U_{fi} \cdot A_{fi}}{A_f} \quad [46]$$

Où :

- $U_{fi}$  : le coefficient surfacique<sup>59</sup> du montant ou de la traverse numéro « i » ;

<sup>59</sup>En absence des valeurs calculées ou mesurées selon ces normes, les valeurs de  $U_f$  peuvent être obtenues par des méthodes simplifiées décrites dans l'annexe informative D de la norme NF EN ISO 10077.

- $A_{fi}$  : l'aire projetée<sup>60</sup> correspondante de la menuiserie ;
- $A_f$  : l'aire de l'encadrement.

☞ Soit par mesure directe conformément à la norme NF EN ISO 12412- 2.

La valeur de  $U_f$ , donnée dans le tableau 19 ci-après, selon la norme SIA D0176, dépend du type du matériau qui le compose et de la conception du profil.

Tableau 19 : Valeurs de calcul de  $U_f$  pour cadres

| Matériau du cadre       | $U_f$ (W/m²K) |
|-------------------------|---------------|
| Bois/bois métal         | 1,8           |
| Plastique               | 2,2           |
| Profil de liaison isolé | 2,8           |

### ☞ Le coefficient de transmission thermique des fenêtres ( $U_w$ )

Le coefficient de transmission thermique est le coefficient utilisé pour juger la performance d'isolation d'une fenêtre. Il caractérise ainsi la déperdition énergétique d'une fenêtre en prenant compte le vitrage ( $U_g$ ), le cadre ( $U_f$ ) et les ponts thermiques intégrés de la liaison vitrage/cadre  $\Psi_g$  rapportée à la surface totale de la fenêtre, tel que :



Figure 40 : coefficient de transmission thermique d'une baie vitrée

$$U_w = \frac{(U_g \times \text{surface vitrage}) + (U_f \times \text{surface cadre}) + (\Psi_g \times \text{perimetre vitrage})}{\text{Surface totale fenetre}} \quad [47]$$

Avec :

- $U_g$  : le coefficient de transmission thermique au centre du vitrage [W/ (m². K)] ;
- $U_f$  : le coefficient de transmission thermique moyen du cadre de la fenêtre [W/ (m². K)] ;
- $\Psi_g$  : Le coefficient de transmission linéique de liaison vitrage/cadre de la fenêtre qui combine les déperditions de l'intercalaire à la périphérie du vitrage et du profilé, défini par la relation :

$$\Psi_g = \frac{\Phi_T}{\Delta T} - U_f b_f - U_g b_g \quad [48]$$

Avec :

- $U_f$  : le coefficient surfacique de la menuiserie [W/ (m². K)] ;
- $\Phi_T$  : le flux total à travers la section, obtenu par calcul numérique (W/m) ;
- $b_g$  : la largeur visible du vitrage (m) ;

<sup>60</sup>La largeur des montants en partie courante est supposée se prolonger sur toute la hauteur de la fenêtre

- $b_f$  : la largeur projetée de la menuiserie (m) ;
- $\Delta_T$  : la différence de température (K) ;
- $U_g$  : le coefficient surfacique en partie centrale du vitrage [ $W / (m^2 \cdot K)$ ].

Plus le coefficient  $U_w$  est faible, moins il y a de déperditions et plus la fenêtre est performante thermiquement, comme illustre la figure 40 ci-après :

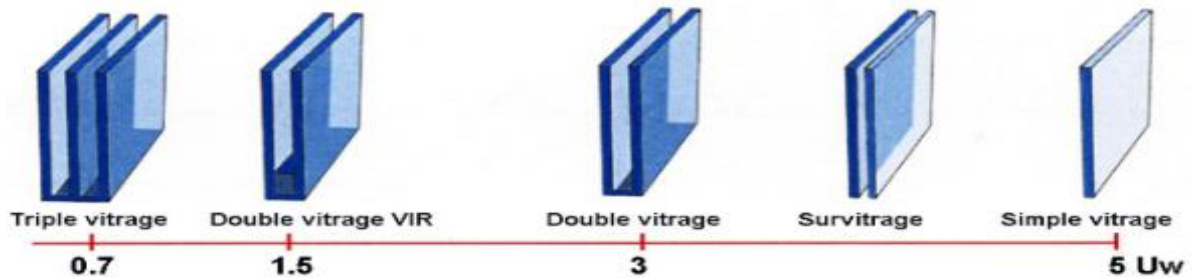


Figure 41 : coefficient de transmission thermique des fenêtres

### f-2-2- Le facteur solaire d'une baie vitrée ( $S$ )

Le facteur solaire d'une baie vitrée traduit la capacité d'une fenêtre à transmettre la chaleur émanant du soleil, comme illustre la figure 42 ci-contre. C'est le rapport entre l'énergie totale transmise à travers la baie, et l'énergie solaire incidente. En général, le facteur solaire d'une baie vitrée est compris entre 0 et 1.



Figure 42 : Le facteur solaire d'une baie vitrée

Plus le facteur solaire d'une baie est élevé, plus les apports de chaleur transmis sont importants : en hiver, cela permettra de minimiser les consommations de chauffage par les apports solaires gratuits. En été, il conviendra au contraire que le facteur solaire soit faible, afin de limiter l'entrée de chaleur par les baies, limitant ainsi la température intérieure (et l'usage éventuel de climatisation).

Le facteur solaire d'une baie vitrée, avec ou sans protection solaire, est désigné respectivement par  $S_w$  et  $S_f$ , tels que :

$$S_w = \frac{S_g A_g + S_f A_f}{A_g + A_f} \quad [49] \quad \text{et} \quad S_f = \frac{\alpha U_f}{h_e} \quad [50]$$

Avec :

- $S_w$  : le facteur solaire de la fenêtre ;
- $S_f$  : le facteur solaire de la menuiserie ;
- $S_g$  : le facteur solaire du vitrage, donné par le tableau de l'[annexe 3](#);
- $\alpha$  : le coefficient d'absorption de la menuiserie selon leur couleur, donnée par le tableau 19 ci-haut ;
- $h_e$  : le coefficient d'échange superficiel, donné dans tableau 17 plus-haut ;

- $U_f$  : le coefficient surfacique moyen de la menuiserie en  $[W / (m^2 \cdot K)]$  ;
- $A_g$  : La surface (en  $m^2$ ) du vitrage ;
- $A_f$  : La surface (en  $m^2$ ) de la menuiserie.

### f-2-3- La perméabilité à l'air (ou infiltration) (Q) pour une pression de référence 100 MPa

Plusieurs documents révèlent que depuis longtemps, de divers essais ont été réalisés par les fabricants des vitres ou des fenêtres, pour déterminer leurs classes de performance d'étanchéité à l'air (de même que pour l'étanchéité à l'eau et la résistance au vent) : c'est le classement  $A^*E^*V^*$ . Cela montre bien que l'étude de la perméabilité à l'air d'une fenêtre n'est pas un nouveau sujet à aborder dans la présente thèse. Le classement est établi pour 1  $m^2$  de la fenêtre/baie vitrée et une pression de référence de 100 Pa. Pour déterminer la perméabilité à l'air d'une ouverture d'un bâtiment, la norme prévoit d'exploiter la formule suivante :

$$Q = Q_{100} \cdot \left( \frac{P}{100} \right)^{2/3} \quad [51]$$

Les valeurs usuelles des perméabilités à l'air des fenêtres/baies sont données en fonction de leur classe d'étanchéité, dans le tableau 20 ci- après :

Tableau 20 : Les perméabilités à l'air des fenêtres/baies

| Classe d'étanchéité | $m^3 / (h.m^2)$ sous 100 Pa |
|---------------------|-----------------------------|
| A*1                 | < 50                        |
| A*2                 | < 27                        |
| A*3                 | < 9                         |
| A*4                 | < 3                         |

Le maintien des performances d'étanchéité à l'air des fenêtres ainsi que les façades rideaux est conditionné donc par leurs conceptions et leurs poses, notamment des liaisons et calfeutrements.

Le DTU 36.5 pour les fenêtres, et le DTU 33.1 pour les façades rideaux détaillent les exigences des fixations, liaisons et calfeutrements avec la structure (conception, matériaux, montage).

### IV-7-3- Les gains thermiques

Le gain thermique d'un local dérive de deux sources bien distinctes : externe et interne. Le gain externe vient en général de la température générée par les différents types de rayonnement solaire. Tandis que les apports internes comprennent toutes les quantités de chaleur générées dans l'espace par l'intermédiaire des différentes sources internes (cf. la figure 43 ci-dessous) autres que le système de chauffage.

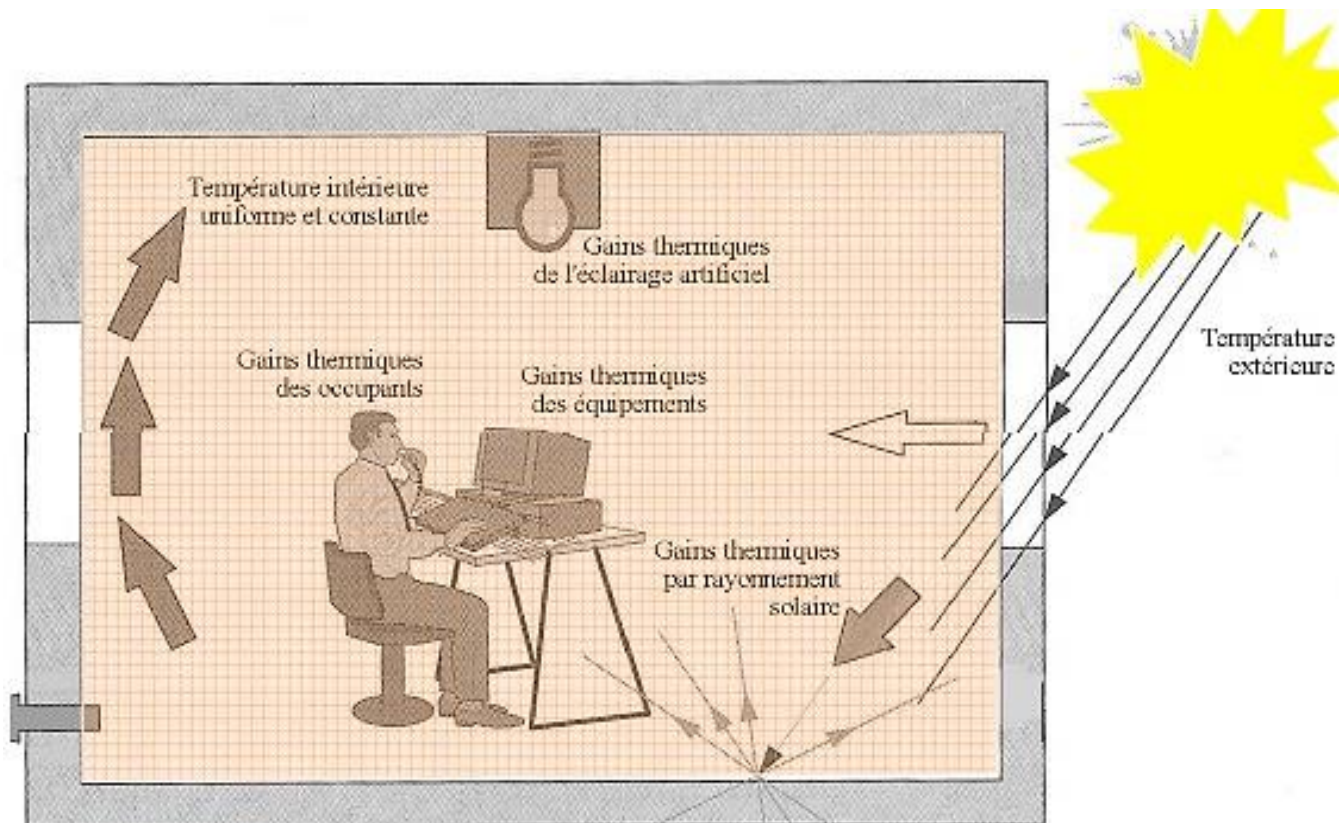


Figure 43 : Gain thermique d'un espace

Nous allons examiner dans la sous-partie ci-dessous les apports sus-mentionnés, engendrés par ces différentes sources dans un local.

## a- LES APPORTS EXTERNES

### a-1- Le rayonnement solaire

En tant que source d'énergie, le rayonnement solaire est un des facteurs climatiques dont on a besoin de tirer leur avantage (de manière passive, via les ouvertures vitrées, et/ou de manière active pour produire de l'énergie), mais dont on a aussi parfois besoin de se protéger pour éviter les surchauffes, surtout en été. La maîtrise de l'énergie solaire nécessite de connaître la position correcte du soleil, comme la hauteur, l'azimut ainsi que l'intensité du rayonnement à tout moment.

Le rayonnement solaire est une énergie renouvelable, inépuisable à l'échelle humaine, parce que le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années. Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace. Dans ce cas-là, sa puissance est estimée à 63 500 kW/m<sup>2</sup>.



Les radiations solaires s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace avec une vitesse constante de 300 000 km/s, appelée vitesse de la lumière. Après avoir parcouru une distance

d'environ 150 millions de km, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ 1 353 W/m². C'est ce qu'on appelle « la constante solaire ».

Par rapport au soleil, la terre est une petite boule, elle intercepte une partie faible de l'énergie radiante du soleil. Ces rayons du soleil ainsi cumulés apparaissent sous forme d'un faisceau parallèle.

L'énergie solaire est la plus abondante sur Terre, il est le premier responsable du cycle de l'eau, de la photosynthèse, ainsi que la formation des énergies fossiles. C'est l'ensemble de la vie sur Terre qui dépend donc de cette source énergétique.

Théoriquement, le rayonnement solaire est assimilable à une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'onde auxquelles correspond une énergie spécifique décrite par la relation suivante :

$$E [J] = h.v = h. c/\lambda \quad [52]$$

Avec,

$\lambda$  : longueur d'onde (m) ;

$\nu$  : fréquence (Hz) ;

$c$  : vitesse de la lumière (m/s).

### a-1-1- Le différent type du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire recouvre à la fois les aspects lumineux (éclairage lumineux) et énergétiques (rayonnement solaire) comme : l'Ultra-Violet (U. V), Infra rouge (I. R). Dans la surface de la Terre, le rayonnement solaire inclut : 40 % de lumière visible, 5 % d'U. V. et 55 % d'I.R, est un porteur essentiel d'énergie thermique (illustré dans la figure 44 à gauche ci- dessous). Une fois émis par le soleil, ce rayonnement atteint la surface de la Terre et subit, suivant les propriétés de surface, une certaine transformation.

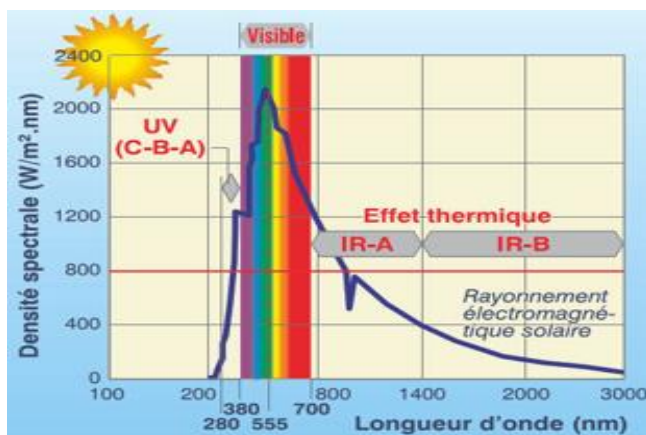


Figure 44 : Le rayonnement solaire

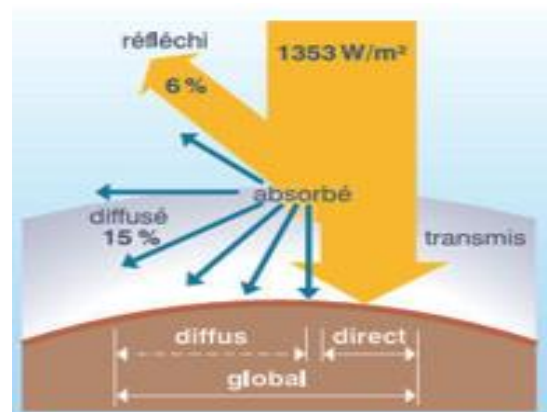


Figure 45 : Le flux solaire

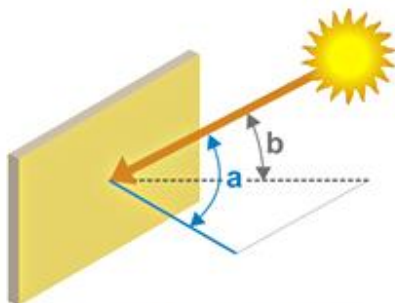
Le rayonnement total reçu sur la surface de la Terre, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique globale), est défini par la somme des composantes suivantes : l'irradiation directe,

l'irradiation diffuse, l'irradiation réfléchie ainsi que l'irradiation absorbée (illustré dans la figure 45 à droite ci-dessus) que nous allons approfondir une à une ci-dessous, suivant les caractéristiques de surface de la paroi notamment : sa réflectivité, son absorptivité, sa réflexivité, et sa transmittivité.

### ☞ Le rayonnement direct (transmis)

Ce type de rayonnement provient directement du Soleil. L'angle que font les rayons du Soleil avec une surface détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. Puisque le rayonnement solaire arrive sur la Terre sous forme d'un faisceau parallèle, une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte ainsi la densité maximale d'énergie. Et si l'on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclairage diminue. Cette composante s'annule donc si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle. Le rayonnement direct correspond donc au flux solaire qui atteint directement la paroi, quand celle-ci est exposée au soleil, il dépend dans ce cas de l'orientation de la paroi par rapport au rayonnement solaire influe sur l'énergie incidente. Le tableau 21 ci-après donne les pourcentages de rayonnement intercepté par une surface en fonction de l'incidence du soleil :

Tableau 21 : Pourcentage du rayonnement intercepté par une paroi

| Angle d'incidence (°) | Rayonnement intercepté (%) | Illustration                                                                                                                                               |
|-----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0                     | 100,0                      |  <p><b>a : angle d'incidence</b><br/><b>b : hauteur angulaire</b></p> |
| 5                     | 99,6                       |                                                                                                                                                            |
| 10                    | 98,5                       |                                                                                                                                                            |
| 15                    | 96,5                       |                                                                                                                                                            |
| 20                    | 94,0                       |                                                                                                                                                            |
| 25                    | 90,6                       |                                                                                                                                                            |
| 30                    | 86,6                       |                                                                                                                                                            |
| 35                    | 81,9                       |                                                                                                                                                            |
| 40                    | 76,6                       |                                                                                                                                                            |
| 45                    | 70,7                       |                                                                                                                                                            |
| 50                    | 64,3                       |                                                                                                                                                            |
| 55                    | 57,4                       |                                                                                                                                                            |
| 60                    | 50,0                       |                                                                                                                                                            |
| 65                    | 42,3                       |                                                                                                                                                            |
| 70                    | 34,2                       |                                                                                                                                                            |
| 75                    | 25,8                       |                                                                                                                                                            |
| 80                    | 17,4                       |                                                                                                                                                            |
| 85                    | 8,7                        |                                                                                                                                                            |
| 90                    | 0,0                        |                                                                                                                                                            |

Dans le cas des matériaux transparents, la part du flux transmis suit sa course vers les parois intérieures des bâtiments. En conséquence, la part visible de ce rayonnement assure l'éclairage naturel dans le bâtiment tandis que la part I.R est absorbée et traverse la paroi sous forme de flux de chaleur, approfondis dans le paragraphe ci-dessous.

### Le rayonnement réfléchi

L'irradiation solaire réfléchi par l'environnement extérieur (en particulier le sol) constitue environ 5 % du rayonnement solaire. Elle se rapporte sur le facteur de réflexion solaire de la surface ou matériau constituant le mur externe. Cette composante est donc essentiellement liée à la couleur ainsi que le type de matériaux constituant la surface externe de la paroi d'un bâtiment exposée au rayonnement solaire. Le facteur de réflexion des matériaux courants ainsi que les différentes couleurs usuelles sont donnés dans le tableau 22 ci-dessous :

Tableau 22 : Le facteur de réflexion des matériaux et des couleurs usuelles

| Peintures :                            |             | Autres matériaux de construction : |             |
|----------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| Blanc                                  | 0,70 à 0,80 | Plâtre blanc                       | 0,7 à 0,80  |
| Jaune                                  | 0,50 à 0,70 | Marbre blanc propre                | 0,80 à 0,85 |
| Vert                                   | 0,30 à 0,60 | Brique blanche propre              | 0,62        |
| Gris                                   | 0,35 à 0,60 | Brique rouge                       | 0,10 à 0,20 |
| Brun                                   | 0,25 à 0,50 | Brique rouge usagée                | 0,05 à 0,15 |
| Bleu                                   | 0,20 à 0,50 | Aluminium poli                     | 0,6 à 0,75  |
| Rouge                                  | 0,20 à 0,35 | Aluminium mat                      | 0,55 à 0,60 |
| Noir                                   | 0,04        | Email blanc                        | 0,65 à 0,75 |
| Bois :                                 |             | Vitrages                           | 0,08 à 0,40 |
| Bouleau clair, érable                  | 0,55 à 0,65 | Crépils blancs neufs               | 0,70 à 0,80 |
| Chêne verni clair                      | 0,40 à 0,50 | Crépils blancs usagés              | 0,30 à 0,60 |
| Chêne verni foncé                      | 0,15 à 0,40 | Béton neuf                         | 0,40 à 0,50 |
| Acajou, noyer                          | 0,15 à 0,40 | Béton ancien                       | 0,05 à 0,15 |
| Papiers peints :                       |             |                                    |             |
| Très clairs (blanc, crème)             | 0,65 à 0,75 |                                    |             |
| Clairs (gris, jaune, bleu)             | 0,45 à 0,60 |                                    |             |
| Foncés (noir, bleu, gris, vert, rouge) | 0,05 à 0,36 |                                    |             |

La norme EN 12464-1 préconise, dans le tableau 23 ci-dessous, les plages utiles pour les principales parois d'un local :

Tableau 23 : Plages utiles de coefficient de réflexion

| Parois     | Coefficient de réflexion |
|------------|--------------------------|
| Plafond    | 0,6 à 0,9                |
| Murs       | 0,3 à 0,8                |
| Plan utile | 0,2 à 0,6                |
| Sol        | 0,1 à 0,5                |

Et dans la pratique, on recommandera les valeurs par défaut suivantes :

Tableau 24 : Valeur recommandée de coefficient de réflexion

| Parois     | Coefficient de réflexion |
|------------|--------------------------|
| Plafond    | 0,7                      |
| Murs       | 0,5                      |
| Sol        | 0,3                      |
| Plan utile | 0,2 à 0,6                |

Dans ce cas, l'application de la couleur claire sur une façade est un moyen très efficace pour réduire la température intérieure et participe donc à la protection solaire d'un bâti, surtout pendant la période chaude [Cheng V].

### ☞ Le rayonnement diffus

L'irradiation diffuse correspond au rayonnement reçu de la voute céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre et peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.

### ☞ Le rayonnement absorbé

Ce type de rayonnement prisonnier dans la paroi, se transforme en chaleur et augmente la température interne de la paroi. La paroi effectue ainsi avec son environnement les trois modes fondamentaux d'échanges : par conduction à l'intérieur de la paroi elle-même, par convection avec l'air environnant, et par rayonnement avec les parois voisines.

## a-1-2- Les apports dus aux rayonnements solaires

### ☞ Pour le mur opaque

La chaleur fournie par le mur  $Q_M$  (en Watt) peut être déterminée par l'équation qui résume l'interaction de la structure du bâtiment avec les radiations solaires ci-après :

$$Q_M = \alpha \cdot F \cdot S \cdot R_M \quad [53]$$

Où

➤  $Q_M$  : Apports de chaleur par radiations, en Watt ;

- $\alpha$  : coefficient d'absorption de la paroi recevant le rayonnement en fonction de la couleur et de la nature du mur, données par le tableau 19 plus haut ;
- $S$  : surface de la paroi considérée [ $m^2$ ] ;
- $F$  : facteur de rayonnement solaire, part absorbée par la surface et transmise vers l'intérieur du local : fourni par la relation 37 ci-dessus ;
- $R_M$  : rayonnement solaire incident sur la surface du mur, en  $W/m^2$  et fourni par les données météorologiques, qui dépend :
  - ✓ De la latitude sous laquelle le local se trouve ;
  - ✓ De l'orientation du mur ;
  - ✓ De l'heure à laquelle le calcul sera effectué.

### ☞ Pour la baie vitrée

Pour une baie vitrée, la quantité de chaleur dont elle a mis à la disposition de  $Q_v$  (en Watt) est :

$$Q_v = \alpha \cdot g \cdot S \cdot R_v \quad [54]$$

Où :

☞  $\alpha$  : le coefficient d'absorption du vitrage (sans dimension), donné par le tableau 25 ci-dessous ;

Tableau 25 : coefficient d'absorption d'un vitrage

| Verres (fenêtres ou lanterneaux) | $\alpha$ |
|----------------------------------|----------|
| Vitrage simple                   | 1        |
| Vitrage double                   | 0,9      |
| Vitrage triple                   | 0,8      |

☞  $g$  : le facteur de réduction qui varie en fonction du mode de protection de la fenêtre contre le rayonnement solaire (extérieur, intérieur, vitre teintée, etc.), défini par le tableau 26 ci-dessous ;

Tableau 26 : Facteur de réduction «  $g$  » pour fenêtres protégées

| Fenêtres protégées                                         | Couleurs       | $g$  |
|------------------------------------------------------------|----------------|------|
| Stores extérieurs en toile                                 | Écru           | 0,28 |
| Stores extérieurs en toile                                 | Aluminium      | 0,22 |
| Stores intérieurs entièrement baissés                      | Aluminium      | 0,45 |
| Stores intérieurs à moitié baissés                         | Blanc ou crème | 0,63 |
| Persiennes entièrement baissées à l'intérieur des fenêtres | Aluminium      | 0,58 |
| Persiennes entièrement baissées à l'extérieur des fenêtres | Aluminium      | 0,22 |

☞  $S$  : la surface vitrée ( $m^2$ ) ;

☞  $R_v$  : L'intensité du rayonnement solaire sur les vitrages ( $W/m^2$ ), définie de la même façon que  $R_M$ .

## a-2- Le renouvellement d'air

### a-2-1- Les principaux objectifs du renouvellement d'air

La ventilation d'un bâtiment est définie dans sa composante la plus basique, comme le processus par lequel l'air intérieur est remplacé par un air plus sain provenant de l'extérieur ou d'une source propre. Ce processus est continu et ayant de nombreux objectifs, parmi lesquels :

- ▶ L'approvisionnement en l'oxygène et l'extraction de dioxyde de carbone<sup>61</sup> provenant de la respiration des occupants ;
- ▶ Le contrôle de l'humidité dans une optique de confort ou de conditionnement des matériaux ;
- ▶ La maîtrise de la vitesse de circulation de l'air ;
- ▶ L'extraction des pollutions telles que les odeurs, les micro-organismes, les mites, etc. ;
- ▶ L'enlèvement des :
  - ✓ Vapeurs d'eau pour éviter la condensation ;
  - ✓ Particules telles que fumées et poussières ;
  - ✓ Composés organiques volatils provenant des tapis ou des meubles ;
  - ✓ Produits de combustion, notamment liés à la cuisine ;
  - ✓ Gaz d'ozone liés à l'utilisation des appareils électriques ;
  - ✓ Méthanes et des produits de désintégration provenant des sols.

Le renouvellement d'air de l'environnement intérieur est donc nécessaire pour :

- ☞ Maintenir les niveaux requis de qualité de l'air dans un espace ; et de
- ☞ Contrôler les apports excessifs d'humidité, de chaleur et d'atteindre des objectifs de confort.

Les différentes fonctions de la ventilation naturelle varieront en fonction du débit, de simple fonction hygiénique à l'évacuation des apports thermiques et à une vitesse d'air nécessaire au confort hygrométrique et olfactif des occupants (illustrés dans la figure 45 ci-après).

---

<sup>61</sup>Dans un bâtiment d'habitation, L'IEPF (2006), dans la page 144, recommande de maintenir un taux d'oxygène à 20,70 % et un taux de gaz carboniques à 0,03 dans l'air.

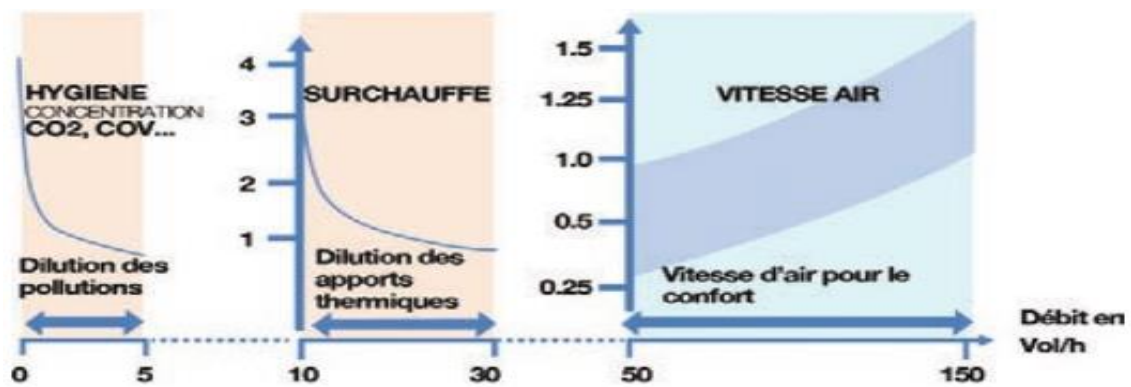


Figure 46 : Les trois dimensions de la ventilation naturelle

En outre, le renouvellement d'air dans un local est fondamental pour l'hygiène et la santé des occupants de même pour la pérennité du bâti. Il agit notamment sur la régulation des flux de chaleur entre le corps et le milieu ambiant.

## a-2 2- Les avantages du renouvellement d'air naturel

L'utilisation de processus de renouvellement par ventilation naturelle présente de nombreux atouts tant sur le plan économique que sur celui de l'environnement ainsi que pour le confort des occupants. C'est pourquoi nous avons choisi ce type de ventilation pour l'étude de confort du bâtiment étudié dans le présent ouvrage.

### 👉 Économique

Au niveau économique, l'intégration de la stratégie de ventilation naturelle dès la conception du bâtiment permet de réduire les coûts de construction, comme la réduction des besoins en systèmes mécaniques de ventilation. Ces économies sont évaluées aux environs de 10 à 15 %<sup>62</sup> du coût total des bâtiments, par rapport à des constructions disposant d'air conditionné. Elle amènera parallèlement une plus grande consistance du bâtiment, une réduction des frais d'entretien et de réparation des systèmes de ventilation parfois très complexes.

### 👉 Confort

Le système de ventilation naturelle accroît le confort intérieur du bâtiment, car il offre des conditions intérieures plus proches de celles de l'extérieur et évite ainsi les méfaits éventuels des chocs thermiques liés à l'usage d'air conditionné. La ventilation naturelle offre aussi plus de flexibilité et de contrôle aux occupants, parce que ceux-ci modifient la quantité de l'aération<sup>63</sup> nécessaire en fonction des besoins ponctuels. Ce contrôle accru est bénéfique en termes de santé et de productivité. De plus, la ventilation

<sup>62</sup>Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales de l'OIF, page 62

<sup>63</sup>En ouvrant ou fermant une fenêtre par exemple

naturelle joue un rôle important dans la modération de l'humidité et les températures des espaces intérieurs.

## 👉 Environnementaux

La réduction de la charge en climatisation et en air conditionné, associée aux économies d'équipements amènera une baisse des émissions de gaz à effet de serre associé aux activités du bâtiment. Parmi les avantages figurent également la réduction de la pollution liée à l'utilisation de produits d'entretien des systèmes de ventilation mécanique.

Ouvrir le bâtiment pour une ventilation naturelle peut néanmoins le rendre plus vulnérable à des nuisances telles que les vents, les pluies, les bruits extérieurs et les poussières, ou encore aux risques d'intrusion. D'où l'importance de sa prise en considération dans la conception d'une ventilation naturelle d'un bâtiment.

### a-2-3- La démarche de la ventilation naturelle

Avant d'entreprendre le système de ventilation naturelle, les différents paramètres suivants doivent être envisagés :

- ▶ Les caractéristiques des vents, en tenant compte du microclimat local, des obstructions ainsi que des sources d'air et des pollutions éventuelles ;
- ▶ Les possibilités de traitements de l'air (retrait de chaleur, des polluants) ;
- ▶ Le trajet pour obtenir la qualité de l'air et de confort thermique voulu. Cela implique les critères de choix des types de fenêtre et d'ouverture ainsi que la possibilité d'utiliser des brasseurs d'air en complément si nécessaire ;
- ▶ La limite des risques de courants d'air, d'apports thermiques ainsi que la désorganisation du confort visuel pour les occupants ;
- ▶ L'orientation du bâtiment pour avoir une exposition maximale aux vents, angle de 0 à 30°, en tenant compte néanmoins des objectifs du confort.

### a-2-4- Les principaux types de ventilation naturelle

La ventilation naturelle d'un bâtiment est basée sur deux principes distincts et complémentaires, dont :

- ▶ L'effet de cheminée, qui se repose sur les gradients de température entre l'extérieur et l'intérieur ainsi que la dilatation de l'air sous l'effet de la chaleur ;
- ▶ La ventilation Transversale, qui repose sur la circulation de l'air provoqué par les vents externes pénétrant dans le bâtiment et l'évacuation de l'air vicié.

Les principes de fonctionnement ainsi que les différents paramètres à considérer pour maîtriser la ventilation naturelle d'un bâtiment sont énumérés dans les sections ci-dessous.

## ☞ La ventilation par effet de cheminée

La ventilation par effet de cheminée se manifeste lorsque l'exposition aux vents externes du bâtiment a une contrainte sur la forte urbanisation ou des obstacles naturels. Ce type de ventilation (appelé aussi tirage thermique) dépend de la circulation de l'air créée par des gradients de température entre l'extérieur et intérieur : l'air plus chaud se dilate et remonte sous l'effet de la gravité, la densité de l'air au niveau du sol diminue et ce différentiel de pression amène un mouvement de l'air, comme illustre l'esquisse de la figure 47 ci-contre :

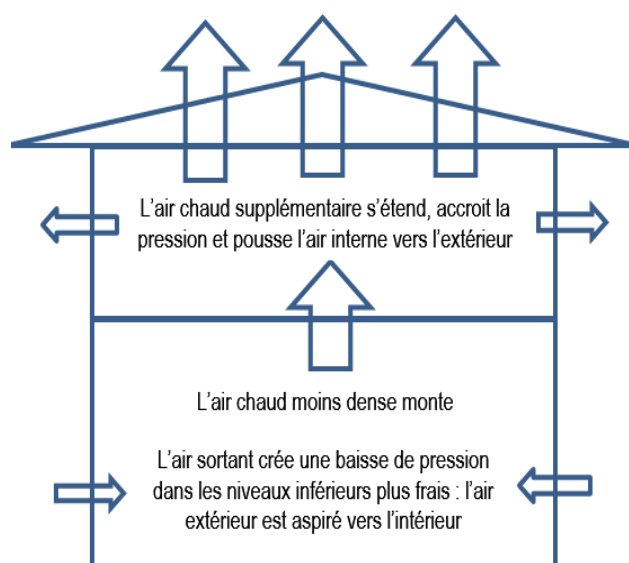


Figure 47: Effet de cheminée

L'effet de cheminée repose donc sur un minimum de deux ouvertures (fenêtres ou autres) dans les parois, l'une située en hauteur pour l'évacuation de l'air chaud, l'autre à un niveau bas pour l'entrée d'air frais. La vélocité de la circulation de l'air sous l'effet de cheminée peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$Q = CS \sqrt{2gh \frac{T_i - T_0}{T_i}} \quad [55]$$

Où :

- Q : Vitesse de circulation de l'air (m<sup>3</sup>/s) ;
- S : Surface du flux (m<sup>2</sup>), correspondant à la surface de l'ouverture la plus étroite ;
- C : Coefficient de décharge de l'orifice le plus étroit, variable en fonction de ses caractéristiques (généralement autour de 0,65) ;
- g : Accélération liée à la pesanteur, soit 9,81 m/s<sup>2</sup> ;
- h : Différence de hauteur entre les deux ouvertures (m) ; et
- T<sub>0</sub> – T<sub>i</sub> est la différence entre les températures extérieures et intérieures (K).

En partant de cette équation, la vitesse du flux d'air par effet de cheminée augmentera donc en fonction de :

- La taille de la plus étroite des ouvertures et de son coefficient de décharge. Plus cette taille s'accroît, plus la vitesse de circulation de l'air augmente ;
- La hauteur entre les ouvertures : plus cette hauteur est grande, plus la vitesse s'accroît ;
- La différence de température entre extérieur et intérieur.

Dans le cas où, la température intérieure est inférieure à celle de l'extérieur (différentiel  $T_o-T_i$  négatif), le processus décrit ci-dessus peut s'inverser : l'air plus frais est évacué à travers l'ouverture inférieure et l'air extérieur entre par l'ouverture supérieure. Cette entrée d'air chaud, voire humide, engendre un problème qu'on doit résoudre dans l'étude du système de ventilation d'un bâtiment. L'ouverture supérieure<sup>64</sup> devra notamment être protégée du soleil et si possible localisée légèrement en intérieur afin de limiter le niveau des apports thermiques.

Une bonne planification de la taille et de l'emplacement des ouvertures est donc une étape importante du processus de l'étude du confort thermique d'un bâtiment. Une taille similaire d'ouverture de chaque étage va créer un équilibre de pression de l'air entrant par les ouvertures. Le changement de cet équilibre est bénéfique dans certaines périodes : en journée, agrandir la taille de l'ouverture du bas ou rétrécir celle du haut peut amener un rabaissement de la ligne d'équilibre et une circulation d'air plus turbulente pouvant être utilisée dans des stratégies de rafraîchissement de chaleur latente.

### ☞ La ventilation transversale

La ventilation transversale repose sur : la circulation des vents extérieurs, la bonne orientation du bâtiment ainsi que des ouvertures, telles que représentées schématiquement par la figure 48 ci-contre. L'étude des vents dominants est donc la primordiale dans la prise en compte de la ventilation transversale lors de la conception d'un bâtiment. D'où l'importance de l'étude de l'orientation optimale d'un bâtiment.

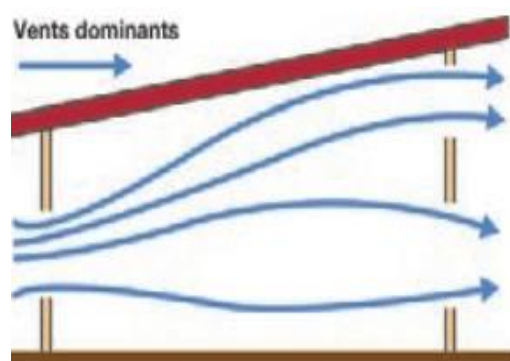


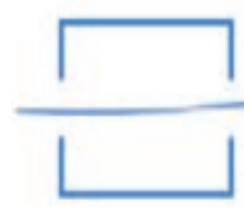
Figure 48 : La ventilation transversale

Les éléments topographiques comme les collines et montagnes ainsi que les obstacles aux alentours ont un rôle important dans l'orientation de la direction et la force des vents. Sur les versants exposés, la circulation de l'air peut accélérer, tandis que les vents sont ralentis et leurs directions seront modifiées sur les versants abrités. Aussi, les domaines aux alentours du site ainsi que les différents éléments naturels qui le composent jouent également un rôle important et influent sur la vitesse des vents et l'évolution des gradients en fonction de leurs auteurs.

Les différents cas possibles de systèmes de ventilation transversale dans un local sont résumés dans le tableau 27 ci-dessous :

<sup>64</sup>Ouvertures sous avant-toit

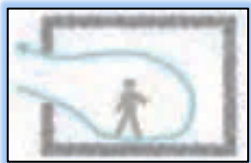
Tableau 27 : Les différents types de systèmes de ventilation transversale d'un local

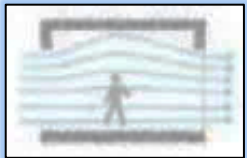
| Une ouverture                                                                     | Deux ouvertures sur la même paroi                                                 | Deux ouvertures sur des parois adjacentes                                          | Deux ouvertures sur parois opposées                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |

Contrairement à l'effet de cheminée, il est possible d'instaurer une ventilation transversale avec une seule ouverture, même si l'efficacité d'un tel système reste relativement faible à cause du risque d'accumulation de l'air vicié au fond de la pièce. Une seconde ouverture sur la même façade présente le même risque, particulièrement si la force des vents est assez élevée. Les deux premiers types de ventilation sont appelés aussi « Ventilation par une seule façade ». La conception idéale est donc d'opter pour deux ouvertures sur des murs parallèles et inscrits dans la ligne de la direction des vents.

Le niveau de renouvellement d'air en fonction des différents dispositifs des ouvertures ainsi que l'effet recherché de l'occupant sont récapitulés dans le tableau 28 ci-après :

Tableau 28 : Récapitulatif des différents dispositifs et de l'effet recherché

| Niveau de renouvellement d'air                                                                       | Effet recherché                                                                                | Vitesse en proportion des vents extérieurs, avec hauteur des ouvertures = 1/3 de celle de la paroi |                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                                                                                      |                                                                                                | Largeur des fenêtres = 1/3 de celle de la paroi                                                    | Largeur des fenêtres = celle de la paroi |
| 0,5 à 5 Vol/h<br> | <b>Santé</b> : Débit hygiénique pour diminuer les pollutions, conformément à la réglementation | NA                                                                                                 |                                          |
| 3 à 5 Vol/h<br>   | <b>Confort hygrométrique</b> : Abaissement partiel des Températures                            | 12-14 %                                                                                            | 12-14 %<br>(23 % si doubles ouvertures)  |

|                                                                                                          |                                                                                                                                        |                                                                  |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 15 à 30 Vol/h<br>       | <b>Confort</b> : Abaissement efficace des températures et atteinte sur durée partielle du minimum de vitesse de l'air                  | <b>35-42 %</b> (Jusqu'à 45 % pour ouvertures sur murs adjacents) | <b>47-65 %</b><br>(Limitée à 51 % pour ouvertures sur murs adjacents) |
| 50 Vol/h et au-delà<br> | <b>Confort</b> : Abaissement très efficace des températures et atteinte de vitesse de l'air suffisante dans la majeure partie du temps |                                                                  |                                                                       |

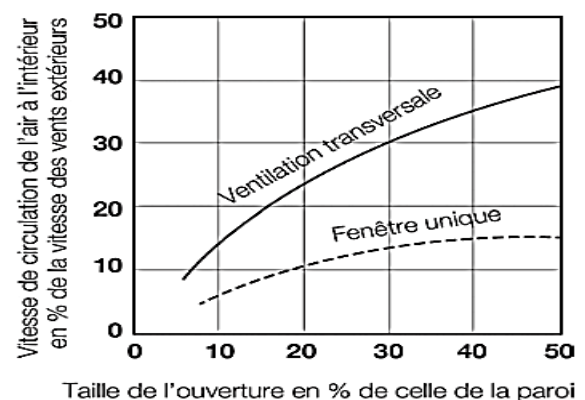
À part l'étude de l'emplacement des ouvertures, la maîtrise du renouvellement d'air nécessite un pré-dimensionnement et une localisation adaptée des entrées d'air, des orifices des sorties d'air ainsi que les performances de l'enveloppe du bâtiment. L'équation suivante permet de déterminer le niveau de débit de renouvellement d'air, par ventilation transversale, dans un local donné :

$$Q = C_d \cdot A \cdot [2 (P_t - P_s) / d]^{1/2} \quad [56]$$

Où :

- Q : Le niveau de débit d'air (m<sup>3</sup>/s) ;
- C<sub>d</sub> : le coefficient de décharge de l'ouverture ;
- A : la taille (m<sup>2</sup>) de l'ouverture ;
- P<sub>t</sub> : la pression totale à travers l'ouverture (Pa) ;
- P<sub>s</sub> : la pression de l'espace en aval de l'ouverture (Pa) ; et
- d : la masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>).

Plus la taille de l'ouverture sera grande, plus la circulation d'air à travers cette ouverture sera élevée. Par conséquent, la surface totale des ouvertures (fenêtres ou autres) liée à la surface de la façade extérieure est aussi un facteur non négligeable. La relation entre la vitesse de la circulation d'air à l'intérieur en pourcentage de la vitesse des vents extérieurs en fonction de la taille d'ouverture de la paroi est donnée par l'abaque du graphe 11 ci- contre :



Graphe 11: Relation entre vents intérieurs (en pourcentage des vents extérieurs)

### a-2-5- Les ouvertures de la ventilation naturelle

Il existe plusieurs types d'ouverture pour maîtriser la ventilation naturelle d'un local, comme les fenêtres. Ces ouvrants peuvent se classer en différents types, selon la manière de les ouvrir, comme illustre la photo 14 ci-dessous.

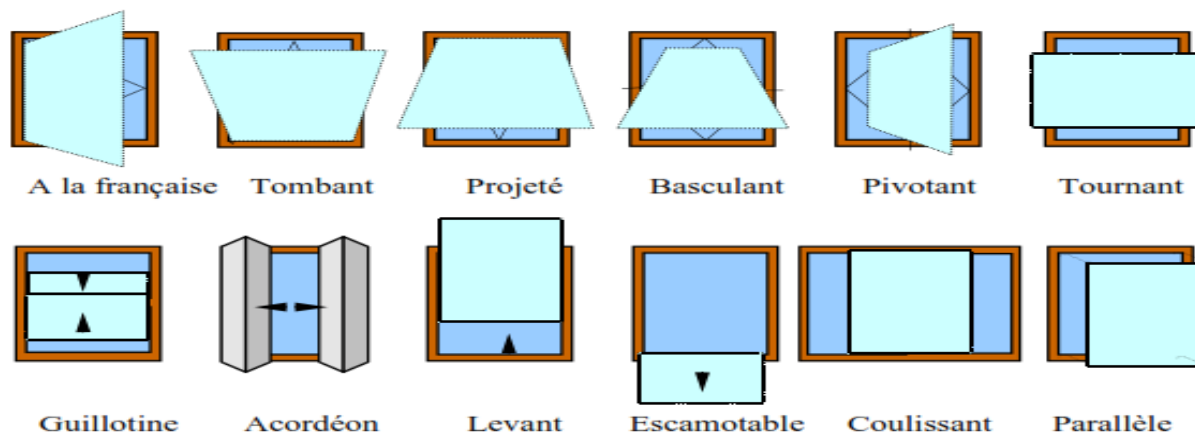


Photo 14 : Types d'ouvrants, classés selon la manière de les ouvrir

- L'ouvrant à la française tourne autour d'un axe vertical, en général vers l'intérieur, mais parfois aussi vers l'extérieur, comme le cas du bâtiment objet de l'étude de la présente thèse ;
- Les châssis tombants ont leur axe de rotation à la traverse inférieure et s'ouvrent vers l'intérieur. Tandis que, les ouvrants projetant s'articulent sur l'axe horizontal supérieur. Et ils s'ouvrent vers l'extérieur ;
- L'axe de l'ouvrant basculant est horizontal, alors que celui de la pivotante tourne autour d'un axe vertical. Les axes de ces deux types de fenêtre se trouvent au centre de l'ouvrant ;
- Les fenêtres à guillotine comprennent un châssis supérieur et un châssis inférieur qui coulissent l'un devant l'autre et, grâce aux contre poids latéraux, peuvent se maintenir en n'importe quelle position. On peut obtenir une ventilation naturelle suffisante dans bien des cas en n'ouvrant que fort peu en haut et en bas.

Les ouvrants peuvent être combinés dans une composition présentant plusieurs types, comme montre les photos suivantes.

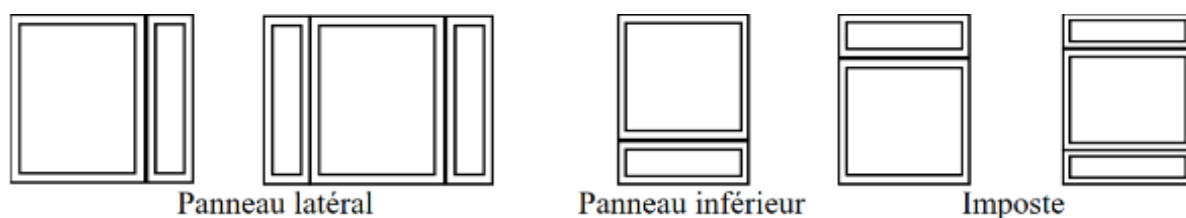


Photo 15 : Combinaisons d'ouvrants

L'industrie du bâtiment offre plusieurs types d'ouverture spécialement destinés à la ventilation naturelle. La photo 16 ci-après présente quelques exemples. Ces ouvertures sont étudiées pour assurer un débit réduit au strict nécessaire pour assurer une qualité d'air correcte en hiver.

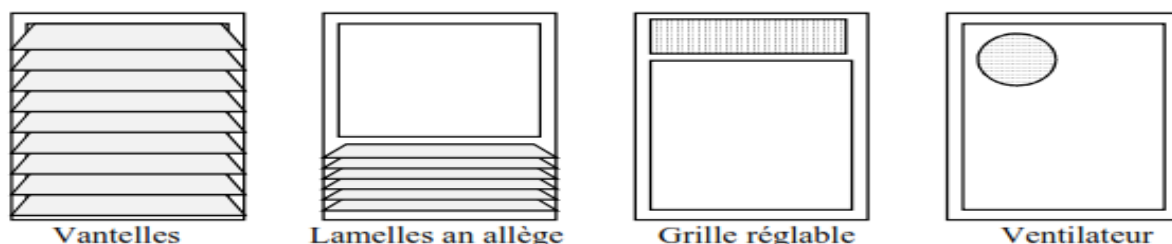


Photo 16 : Ouvertures de ventilation

Mais le renouvellement d'air naturel de notre bâtiment traité dans la présente thèse ne fait aucun objet de combinaison avec ces derniers types de ventilation.

### ☞ Le taux d'ouverture externe de la ventilation naturelle

La Fiche d'application -Thermique « RTAA<sup>65</sup> DOM 2016 », définit que « le taux d'ouverture d'une pièce principale est égal au rapport entre la surface d'ouverture libre des baies donnant sur l'extérieur sur la façade à considérer et la surface de cette façade. Afin de valoriser la présence d'autres baies de la pièce donnant sur l'extérieur, il est possible d'ajouter à la surface d'ouverture considérée, les surfaces d'ouverture libre de ces baies, lorsque celles-ci représentent plus de 10 % de la surface de leur façade respective. La face à considérer est la façade de la pièce contenant la plus grande surface de baies. Dans le cas où deux façades d'orientation différente contiennent des surfaces de baies identiques, la façade de plus petite surface est considérée. La surface de la façade considérée est évaluée de la vue de l'intérieur de la pièce sur une hauteur maximale de 3 mètres par rapport au plancher ». Ainsi, l'évaluation de taux d'ouverture de la ventilation naturelle d'une pièce d'un bâtiment se fait en suivant les étapes suivantes :

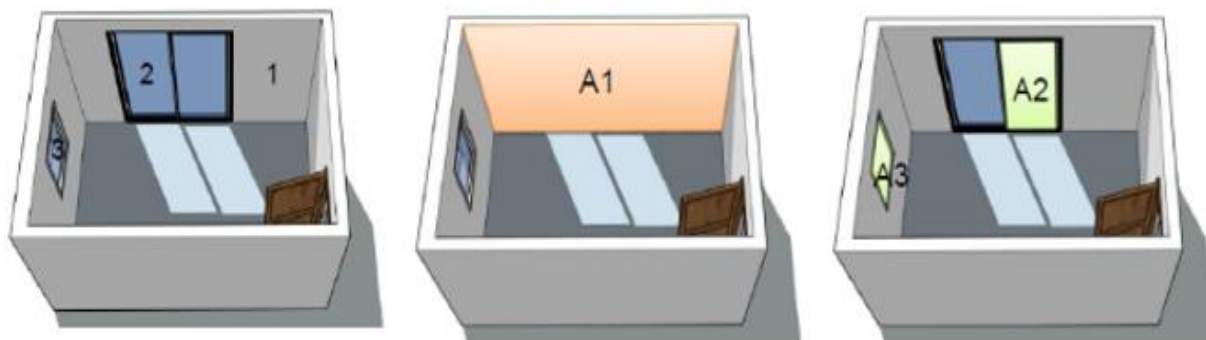


Photo 17 : Taux d'ouverture d'une pièce principale

- ☞ Identifier d'abord, pour chaque pièce principale, la façade (1) qui possède la plus grande surface d'ouverture libre (A2) ;
- ☞ Déterminer la surface intérieure de la paroi identifiée (A1) ;

<sup>65</sup> Règlements Thermique Acoustique Aération

- ☞ Identifier les baies qui se situent sur les parois extérieures (2 & 3) et déterminer leur surface d'ouverture libre (A2 & A3) (ne retenir que les baies ou ensembles de baies dont la surface d'ouverture libre représente plus de 10 % de la surface de leur façade) ; et enfin
- ☞ Calculer le rapport entre la somme des surfaces d'ouverture libre et la surface de la façade (1), tel que :

$$\tau = \frac{A2+A3}{A1} \quad [57]$$

Les pièces de service, ouvertes sur une pièce principale sont considérées comme des pièces principales (ex. : cuisine intégrée au séjour). La règle du taux d'ouverture est à vérifier sur l'ensemble séjour-pièce de service intégré.

La surface d'ouverture libre d'une baie peut être déterminée au choix :

- Soit calculée de manière précise pour chaque baie par l'évaluation de la surface de passage effectif de l'air ;
- Soit déterminée à l'aide des coefficients forfaitaires de porosité. La surface d'ouverture libre est alors obtenue en multipliant la surface de percement brute par le coefficient de porosité, donnée par le tableau 29 ci-après :

Tableau 29 : Coefficient de porosité des baies

| Type de menuiserie                                              |                                | Coefficient de porosité |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Menuiserie battante                                             | Fenêtre                        | 0,87                    |
|                                                                 | Porte-fenêtre, porte palière   | 0,94                    |
| Menuiserie coulissante escamotable (à galandage ou en applique) |                                | 1,00                    |
| Menuiserie coulissante                                          | Fenêtre à deux vantaux         | 0,44                    |
|                                                                 | Porte-fenêtre à deux vantaux   | 0,47                    |
|                                                                 | Porte-fenêtre à trois vantaux  | 0,62                    |
|                                                                 | Porte-fenêtre à quatre vantaux | 0,70                    |
| Menuiserie à soufflet                                           |                                | 0,70                    |
| Menuiseries à lames orientables, jalousies                      |                                | 0,87                    |
| Menuiserie et partie de menuiserie fixe                         |                                | 0,00                    |

### Cas d'une pièce principale sous rampant :

Pour déterminer la surface de paroi à prendre en compte dans le cas d'une pièce principale sous rampant, la pente de la toiture est à considérer, les exigences de porosité s'appliquent uniquement aux parois verticales, soit aux parois présentant une pente supérieure à 60° :

- Si la pente est supérieure à 60°, la surface à prendre en compte correspond à la surface de la paroi ;
- Si la pente est inférieure à 60°, seules les parois verticales aménagées pour créer des ouvertures sont comptabilisées dans le calcul de porosité.

### Varangues et terrasses :

De la même façon que pour les circulations à l'air libre, les varangues et terrasses pour lesquelles les parois donnant sur l'extérieur possèdent au moins 50 % de vide sont considérées comme étant largement ouvertes sur l'extérieur. Les baies donnant sur ces espaces participent à la ventilation naturelle du logement.

### ☞ Les ouvertures intérieures

Les ouvertures intérieures doivent permettre à la ventilation naturelle de traverser le logement. Le potentiel de ventilation naturelle offert par les ouvertures extérieures ne doit pas être contraint par des sections de transit intérieur du flux d'air trop faible. Chaque pièce principale doit :

- (1) Être ventilée de manière autonome par au moins 2 ouvertures extérieures de plus de 0,5 m<sup>2</sup> permettant un balayage de la pièce ; ou
- (2) Posséder une surface d'ouverture intérieure suffisante pour permettre au flux d'air de s'établir à travers le logement. La surface minimale d'ouverture à mettre en œuvre dépend alors de la surface de la pièce.

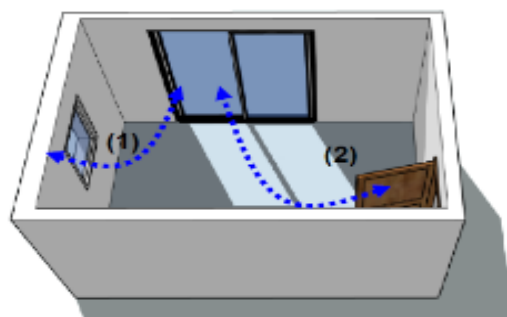


Photo 18 : Les ouvertures intérieures d'un logement

### a-2-6- Évaluation du potentiel de refroidissement de la ventilation naturelle

L'évaluation du potentiel de refroidissement de la ventilation naturelle dans un local est basée sur la différence de température intérieure et extérieure du bâtiment en évolution libre ainsi que les critères de confort d'adaptatif. Ghiaus and Allard (2006) démontrent que la température d'évolution libre « free running » <sup>66</sup> peut être utilisée à la place des bilans de températures dans les méthodes d'estimation de l'énergie. Cette approche évoque la méthode des degrés-heures donnée par les formules suivantes :

$$\delta_R = \begin{cases} 1, \text{ quand } T_{fr} > T_{ch} \text{ et } T_0 > T_{ch} \\ 0 \text{ si non} \end{cases} \quad [58]$$
$$D_R = \sum_i \sum_j [T_{fr}(i, j) - T_{ch}(i, j)] \delta_R$$
$$\delta_v = \begin{cases} 1, \text{ quand } T_{fr} > T_{ch} \text{ et } T_0 < T_{ch} \\ 0 \text{ si non} \end{cases}$$

<sup>66</sup>La température d'évolution libre « free running » est définie comme la température lorsqu'aucun équipement énergétique n'est utilisé  
[(Ghiaus and Allard (2006) ; Ghiaus (2003)]

$$D_R = \sum_i \sum_j [T_{fr}(i,j) - T_{ch}(i,j)] \delta_v$$

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{quand } T_{fr} < T_{cb} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

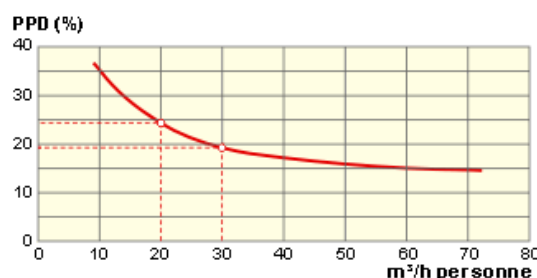
$$D_c = \sum_i \sum_j [T_{fr}(i,j) - T_{cb}(i,j)] \delta_c$$

Avec :

- $D_R$ : Les degrés heures de refroidissement par climatisation ;
- $D_v$ : Les degrés heures de la ventilation pour le refroidissement ;
- $D_c$ : Les degrés heures de chauffage ;
- $i$  : indice relatif aux heures ;
- $j$  : indice relatif aux jours (1 à 365).

## a-2-7-Les normes liées aux taux de renouvellement d'air

- La norme internationale montre l'existence d'une relation entre le débit d'air frais et le pourcentage prévisible de personnes insatisfaites (PPD) par la qualité de l'air ambiant. Le graphe ci-contre donne ce pourcentage en fonction du volume d'air de ventilation en m<sup>3</sup>/h et par occupant. Ainsi, une concentration de CO<sub>2</sub> maximale de 0,15 % (ou 1 500 ppm) en volume correspond à un renouvellement d'air de 20 m<sup>3</sup>/h par personne, soit un pourcentage prévisible d'insatisfaits de près de 25 %. Les 20 % de personnes insatisfaites veulent un renouvellement d'air équivalent à 30 m<sup>3</sup>/h par personne.



Graph 12: Relation entre PPD et volume d'air de ventilation

Dans des locaux à usage particulier, ces valeurs de référence peuvent être différentes : par exemple dans une chambre d'hôpital, pour limiter les risques de contamination, il faut prendre un renouvellement d'air de 50 m<sup>3</sup>/h par personne. Par ailleurs, lorsqu'il est permis de fumer, il faut au minimum doubler les taux de renouvellement d'air proposés ;

- La norme NBN D50-001 précise les débits d'air naturel, dans le tableau 30 ci-dessous, à satisfaire d'un bâtiment résidentiel :

Tableau 30 : Les débits d'air neuf recommandés

| Type de local | Surface plancher du local    | Alimentation en air                  | Transfert d'air : capacité (ou section libre) | Évacuation d'air |
|---------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------|
|               | Moins de 7 m <sup>2</sup>    | 25 m <sup>3</sup> /h                 | 25 m <sup>3</sup> /h                          | -                |
|               | Entre 7 et 20 m <sup>2</sup> | 3,6 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> | (ou 70 cm <sup>2</sup> )                      | -                |

|                                                              |                               |                                      |                                                                                                                       |                                      |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Chambres, bureaux, salle de jeux ou de hobby (ou équivalent) | Plus de 20 m <sup>2</sup>     | 72 m <sup>3</sup> /h                 |                                                                                                                       | -                                    |
| Séjour, salon, salle à manger (ou équivalent)                | Moins de 21 m <sup>2</sup>    | 75 m <sup>3</sup> /h                 | 25 m <sup>3</sup> /h<br>(ou 70 cm <sup>2</sup> )                                                                      | -                                    |
|                                                              | Entre 21 et 42 m <sup>2</sup> | 3,6 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> |                                                                                                                       | -                                    |
|                                                              | Plus de 42 m <sup>2</sup>     | 150 m <sup>3</sup> /h                |                                                                                                                       | -                                    |
| Toilette                                                     | -                             | -                                    | 25 m <sup>3</sup> /h<br>(ou 70 cm <sup>2</sup> )                                                                      | 25 m <sup>3</sup> /h                 |
| Cuisine (fermée), salle de bain, buanderie (ou équivalent)   | Moins de 14 m <sup>2</sup>    | -                                    | Cuisine : 50 m <sup>3</sup> /h<br>(ou 140 cm <sup>2</sup> )<br>Autres : 25 m <sup>3</sup> /h (ou 70 cm <sup>2</sup> ) | 50 m <sup>3</sup> /h                 |
|                                                              | Entre 14 et 21 m <sup>2</sup> | -                                    |                                                                                                                       | 3,6 m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup> |
|                                                              | Plus de 21 m <sup>2</sup>     | -                                    |                                                                                                                       | 75 m <sup>3</sup> /h                 |
| Cuisine ouverte                                              | -                             | -                                    | -                                                                                                                     | 75 m <sup>3</sup> /h                 |

- Le Règlement Général pour la Protection du Travail (RGPT) dans son article 56 du titre II, impose une introduction d'air neuf et une évacuation d'air vicié de 30 m<sup>3</sup>/h par travailleur présent dans un local (pour un volume minimum du local de 10 m<sup>3</sup> par personne) ;
- La norme belge NBN B 62-003 003 (qui devrait, à terme, être remplacée par la norme européenne NBN EN 12 831 (2003)) portant sur le « calcul des déperditions calorifiques des bâtiments » envisage des renouvellements d'air de 10 m<sup>3</sup>/h par personne dans les locaux où l'on ne fume pas, et de 20 m<sup>3</sup>/h par personne dans les locaux où l'on fume. Cette ancienne norme focalisée sur le dimensionnement des installations en chauffage est donc en contradiction avec celles traitant explicitement la qualité des ambiances. Ces valeurs ne doivent donc pas être prises comme référence ;
- La norme européenne EN 13 779 (Ventilation dans les bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air, 2007) propose différentes classes en fonction de la qualité de l'air souhaitée. Ces débits sont relatifs à des locaux dont la pollution principale est d'origine humaine. Dans le cas contraire, des débits différents peuvent être appliqués. Ce peut être le cas, par exemple, en présence de photocopieurs ou d'imprimantes laser, grands émetteurs de polluants.

### a-2-8- Le gain thermique par renouvellement d'air

Le renouvellement d'air dans un local est donc vraiment nécessaire pour résoudre les problèmes hygiéniques. Cet apport se fait en générale par la ventilation des locaux ainsi que par infiltration, et s'apparaît sous forme de gains sensibles et latents :

Les gains sensibles par renouvellement d'air  $Q_{Sr}$  (en W) sont donnés par la relation :

$$Q_{Sr} = q_v \cdot (\theta_e - \theta_i) \cdot 0,33 \quad [59]$$

Tandis que les gains latents par renouvellement d'air  $Q_{Lr}$  (W) :

$$Q_{Lr} = q_v \cdot (\omega_e - \omega_i) \cdot 0,84 \quad [60]$$

Où,

☞  $q_v$  : le débit d'air extérieur de renouvellement ( $m^3/h$ )<sup>67</sup> ;

☞  $\Theta_e$  : la température extérieure de base ( $^{\circ}C$ ) ;

☞  $\Theta_i$  : la température intérieure de base ( $^{\circ}C$ ) ;

☞  $\omega_e$  : la teneur en eau de l'air extérieur ( $g/kg_{air\ sec}$ ) ;

☞  $\omega_i$  : teneur en eau de l'air intérieur ( $g/kg_{air\ sec}$ ).

## b- LES APPORTS INTERNES

### b-1- Apport de chaleur par les machines et appareillages

La majorité des appareils électriques sont des sources de chaleur latente et sensible, dans des proportions qui dépendent cependant de leurs durées d'utilisation (coefficient de pondération). On doit minorer les apports de ces machines et appareillages (par un coefficient de pondération) en fonction de leurs durées de fonctionnement. Il est, par exemple, estimé qu'un appareil ne fonctionnant qu'une demi-heure par jour dégagera la moitié de sa puissance électrique nominale en apport de chaleur [IEPF,2006, page 19]. L'[annexe 4](#) donne les principaux apports de chaleur dégagés par les machines et appareillages utilisés dans un local d'un bâtiment :  $Q_{S\acute{e}quip}$ . Les valeurs dans ce tableau ont été déterminées d'après les indications de divers fabricants.

### b-2- Apport thermique des occupants

L'apport de chaleur par les occupants est donné en fonction de la température intérieure et du degré d'activité de l'individu. Ces apports thermiques internes des occupants sont à la fois sensibles (différence de température) et latents (apports hygrométriques dans les locaux).

Le gain sensible des occupants  $Q_{soc}$  (en W) est donné par la relation :

$$Q_{soc} = n \cdot C_{soc} \quad [61]$$

Et les gains latents des occupants  $Q_{loc}$  (W) par :

$$Q_{loc} = n \cdot C_{loc} \quad [62]$$

Où,

-  $n$  : le nombre d'occupants ;

-  $C_{soc}$  : la chaleur sensible des occupants (W) ;

-  $C_{loc}$  : la chaleur latente des occupants (W).

<sup>67</sup>Pour la ventilation est naturel comme notre cas, on peut considérer que le renouvellement d'air est égal à un volume de la pièce par heure (1 vol/h)

Dans le cas des locaux à forte densité d'occupation, les apports totaux des occupants peuvent devenir un facteur dominant dans le bilan thermique d'une zone. Les apports internes des occupants sont définis par leur métabolisme thermique, qui dépend grandement du niveau d'activité.

Diverses sources existent pour quantifier ces apports. Le tableau 31 ci-dessous représente les valeurs d'apports sensibles et hygrométriques par occupant pour divers types d'activités, telles que déterminées par le Costic :

Tableau 31 : Apports sensibles et hygrométriques des occupants

| Activités                    | Apports totaux (W/pers) | Apport sensible (W/pers)        |     |     |     |     |     |     | Apport hygrométrique (g/h/pers) |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              |                         | Température sèche du local (°C) |     |     |     |     |     |     | Température sèche du local (°C) |     |     |     |     |     |     |
|                              |                         | 17                              | 19  | 21  | 23  | 25  | 27  | 29  | 17                              | 19  | 21  | 23  | 25  | 27  | 29  |
| Assis au repos               | 114                     | 93                              | 86  | 79  | 73  | 67  | 59  | 45  | 31                              | 37  | 46  | 58  | 66  | 80  | 96  |
| Assis, travail léger, debout | 128                     | 102                             | 94  | 86  | 78  | 70  | 80  | 46  | 38                              | 46  | 60  | 72  | 85  | 101 | 122 |
| Assis, travail modéré        | 145                     | 109                             | 100 | 90  | 82  | 72  | 81  | 46  | 51                              | 61  | 80  | 95  | 110 | 127 | 147 |
| Debout, travail léger        | 174                     | 119                             | 108 | 95  | 84  | 73  | 81  | 48  | 82                              | 99  | 121 | 142 | 156 | 175 | 200 |
| Travail modéré               | 197                     | 143                             | 117 | 103 | 89  | 75  | 83  | 48  | 103                             | 116 | 140 | 163 | 182 | 203 | 227 |
| Travail actif                | 232                     | 142                             | 126 | 111 | 96  | 81  | 85  | 51  | 126                             | 141 | 170 | 196 | 216 | 237 | 260 |
| Travail intense              | 290                     | 172                             | 153 | 137 | 119 | 104 | 87  | 72  | 192                             | 213 | 245 | 274 | 290 | 334 | 337 |
| Travail pénible              | 406                     | 208                             | 189 | 172 | 153 | 136 | 119 | 100 | 290                             | 319 | 357 | 386 | 404 | 428 | 460 |

La part sensible décroît donc fortement quand la température de l'air augmente et quand l'activité devient plus intense. Il est commun que les apports totaux décrits dans ce type de tableau représentent la réalité pour un adulte homme. Un facteur 0,85 est appliqué pour les femmes et un facteur 0,75 pour les enfants. Les apports sont ensuite échangés avec l'environnement extérieur sous 3 formes :

- ✚ Échange par rayonnement grande longueur d'onde avec les parois ;
- ✚ Échange par convection avec l'air du local ;
- ✚ Chaleur latente par vaporisation.

### b-3- Apport par l'éclairage

Les charges liées à l'éclairage artificiel sont facilement maîtrisables par les concepteurs d'un bâtiment, car celles-ci se situent dans une fourchette de 7 à 40 W/m<sup>2</sup> selon la qualité de la conception.

Les apports internes dus à l'éclairage sont très importants pour certains types de bâtiment comme : les supermarchés, les salles de spectacle, les complexes sportifs, etc. De même, pour les bureaux et les locaux d'habitation, l'éclairage peut représenter une part non négligeable des apports si des précautions ne sont pas prises. Les apports dus à l'éclairage sont uniquement sensibles.

Le tableau 32 ci-dessous donne les valeurs des chaleurs dégagées par l'éclairage des lampes usuelles :

Tableau 32 : Puissance d'éclairage installée y compris ballast

| Type de local                                                                    | Puissance d'éclairage installée y compris ballasts<br>(W/m <sup>2</sup> ) |                    |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|
|                                                                                  | Lampe à incandescence                                                     | Lampe fluorescente |
| Entrepôts, habitat, restaurant, théâtres.                                        | 25                                                                        | 08                 |
| Bureau, salle de cours, hall d'entrée avec caisse et guichet.                    | 65                                                                        | 16                 |
| Salle de lecture, d'ordinateur, laboratoire, magasin, hall d'exposition.         | 110                                                                       | 24                 |
| Supermarché, très grand bureau, amphithéâtre sans fenêtre, travaux de précision. | -                                                                         | 45                 |

### b-3-1- Les critères de choix des ampoules et luminaires

Le choix d'une lampe doit se fonder en fonction des besoins sur plusieurs critères, à savoir :

- La puissance (en Watt) ;
- Son efficacité lumineuse (en Lumens/Watt). Plus cette valeur est grande, plus la lampe possède des capacités d'éclairage à puissance donnée ;
- Sa durée de vie, plus généralement plus élevée pour les ampoules ayant une efficacité lumineuse plus réduite ;
- Sa température de couleur (ou température de couleur corrélée) (en °K) : Une couleur froide correspond à une température de couleur élevée et inversement<sup>68</sup> ;
- Son Indice de Rendu des Couleurs (IRC ou RA [Selon la norme CIE]) qui caractérise la capacité d'une lampe à restituer la couleur de l'objet qu'elle éclaire, avec des notes allant de 0 à 100 (100 correspondants à la lumière du jour, un indice minimum de 75 à 80 étant recherché pour un bon rendu) regroupées dans des catégories allant de 4 à 1a et 1b. Des activités demandant un excellent rendu de couleur nécessiteront l'utilisation d'ampoules 1a, alors que les groupes inférieurs (moins chers, plus économes et avec une durée de vie supérieure) devront être privilégiés lorsque les activités le permettront. Le

<sup>68</sup> La lumière naturelle au coucher du soleil produit environ 2000 K, contre 20000 K en journée ensoleillée.

tableau 33 ci- dessous donne les valeurs des plages d'IRC avec leur correspondance en perception des couleurs :

Tableau 33 : Valeurs des plages d'IRC avec leurs correspondances en perception des couleurs

| Plage d'IRC  | Perception des couleurs | Classe d'IRC en fonction de la plage d'IRC |               |
|--------------|-------------------------|--------------------------------------------|---------------|
|              |                         | Classe d'IRC                               | IRC           |
| Ra < 25      | Faible                  | 1A                                         | Ra > 90       |
| 25 < Ra < 65 | Moyenne                 | 1B                                         | 90 > IRC > 80 |
| 35 < Ra < 90 | Bonne                   | 2                                          | 80 > IRC > 60 |
| Ra > 90      | Élevée                  | 3                                          | 60 > IRC > 40 |

- Leur classe d'efficacité énergétique, nouveau paramètre pris en compte depuis l'année 2013, suivant la Règlementation CE n°874/2012. Ce règlement s'applique depuis le 1er septembre 2013 aux lampes électriques telles que les lampes à filament, les lampes fluo compactes, les lampes à décharges à haute intensité et les lampes (et modules) LED (de plus de 30 lumens).

Cette réglementation définit les classes d'efficacité énergétique des lampes en fonction d'un critère de rendement. Ces classes (au nombre de 7) sont dénommées de A++ à E, la classe A++ ayant la meilleure efficacité énergétique (cf. la photo 19 ci- contre). Les classes sont définies par un rapport entre une puissance absorbée par la lampe (et corrigée de la totalité des pertes de l'appareillage de commande) et une puissance de référence, nommée indice d'efficacité énergétique (IEE). Ces limites sont définies comme suit :



Photo 19 : Pictogramme lié à la labellisation des lampes

Tableau 34 : Indice d'efficacité énergétique des lampes

| Classe d'efficacité énergétique | Lampes non dirigées    | Lampes dirigées        |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| A++ (le plus efficace)          | $IEE \leq 0,11$        | $IEE \leq 0,13$        |
| A+                              | $0,11 < IEE \leq 0,17$ | $0,13 < IEE \leq 0,18$ |
| A                               | $0,17 < IEE \leq 0,24$ | $0,18 < IEE \leq 0,40$ |
| B                               | $0,24 < IEE \leq 0,60$ | $0,40 < IEE \leq 0,95$ |
| C                               | $0,60 < IEE \leq 0,80$ | $0,95 < IEE \leq 1,20$ |
| D                               | $0,80 < IEE \leq 0,95$ | $1,20 < IEE \leq 1,75$ |
| E (le moins efficace)           | $0,95 < IEE$           | $1,75 < IEE$           |

La prise en compte de ce dernier critère vise essentiellement la gestion des énergies.

### b-3-2-Les différents types de lampes utilisés dans un local

On distingue généralement quatre types d'ampoule utilisables dans un local d'un bâtiment d'habitation, à savoir : les ampoules à incandescence, les lampes halogènes, les tubes et lampes fluorescentes ainsi que les lampes LED (ou Light Emitting Diode). Chaque type de ces lampes à sa propre caractéristique, notamment au niveau du dégagement de chaleur, raison pour laquelle nous profiterons quelques pages dans le présent ouvrage pour les décortiquer.

#### ☛ Les ampoules à incandescence

Pour ces types de lampes, le courant électrique passe dans le filament en tungstène et le porte à une température élevée par effet Joule. Le filament devient incandescent, il émet dans ce cas de la lumière ainsi que de la chaleur. Des atomes de tungstène sont éjectés du filament par sublimation et sont déposés au niveau de la surface interne de l'ampoule en verre plus froide. Il s'ensuit un noircissement de l'ampoule après un temps d'utilisation relativement court. Une des parades au noircissement est l'augmentation de la surface des ampoules à incandescence.



Photo 20 : Ampoules à incandescence

Raison pour laquelle ce type d'ampoule est de taille importante par rapport aux lampes halogènes par exemple. Le flux lumineux des lampes à incandescence peut être diminué ou augmenté par variation de la tension : « dimming ». Cette modulation se fera cependant avec une diminution de la température de couleur et du rendement lumineux. La chaleur dégagée par ce type de lampe est ainsi :

$$Q_{\text{Sécl}} = P \text{ (en W)} \quad [63]$$

P : étant la puissance de la lampe (W).

Pour une ampoule à incandescence, 60 % de sa consommation d'énergie sont transformés en infrarouge, 12 % transformée, par conduction et convection, en chaleur, ainsi seuls 5 % de son absorption sont transformés en lumière visible. Les principales caractéristiques de l'ampoule à incandescence sont les suivantes :

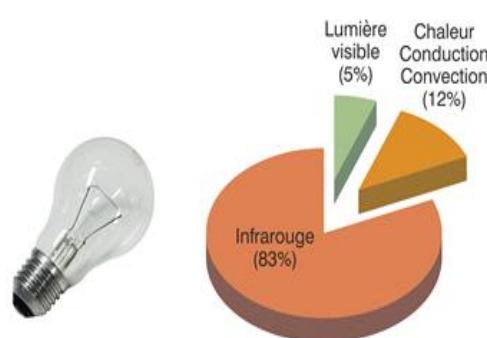


Figure 49 : Consommation d'énergie d'une lampe à incandescence

Tableau 35 : Caractéristiques des lampes à incandescence

| Puissances (W) | Flux lumineux (lm) | Efficacité lumineuse (lm/W) | IRC | T° de couleur (K) | Durée vie moyenne (h) |
|----------------|--------------------|-----------------------------|-----|-------------------|-----------------------|
| 25             | 220                | 8,8                         | 100 | 2 700             | 1 000                 |
| 40             | 415                | 10,4                        |     |                   |                       |

|     |       |      |  |  |  |
|-----|-------|------|--|--|--|
| 60  | 710   | 11,8 |  |  |  |
| 75  | 935   | 12,5 |  |  |  |
| 100 | 1 300 | 13   |  |  |  |

## ☛ Les lampes halogènes

La lampe halogène fonctionne sur le même principe qu'une lampe à incandescence : elle produit de la lumière visible à partir d'un filament de tungstène porté à incandescence. Pour éviter une dégradation très rapide du filament, celui-ci est placé dans une ampoule à verre de quartz (pour les hautes températures) renfermant des gaz halogénés à haute pression comme l'iode et le brome.

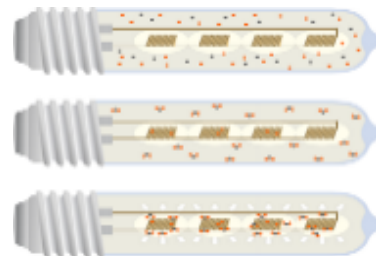


Photo 21 : Lampes halogènes

À la différence de la lampe à incandescence, les atomes de tungstène expulsés du filament par sublimation sont captés par le gaz halogène évitant le dépôt du tungstène sur la paroi intérieure de l'ampoule. En effet, les atomes de tungstène et les halogènes forment directement des halogénures de tungstène, qui par convection naturelle se déplacent librement et migrent vers le filament plutôt que vers le point froid que constitue la paroi intérieure de l'ampoule de verre. Sous l'effet de la chaleur, les halogénures de tungstène se dissocient, permettant aux atomes de tungstène de se fixer sur le filament et aux halogènes d'être libres pour le cycle suivant. Cette caractéristique de la lampe halogène lui permet de travailler avec une surface d'ampoule beaucoup plus petite. Dans ce cas, la lampe halogène fonctionne soit à très basse tension (12 V par exemple), soit à la tension du réseau (230 V). Même si sa luminosité est donc plus élevée, son usage peut être coûteux.

L'augmentation de la température permet un accroissement de sa durée de vie et également des économies d'énergie de 30 à 50 % comparativement aux lampes à incandescence. Le tableau 36 suivant donne les principales caractéristiques de ces types de lampe :

Tableau 36 : Caractéristiques des lampes halogènes

| Puissances (W)                                          | Flux lumineux (lm) | Efficacité lumineuse (lm/W) | IRC | T° de couleur (K) | Durée vie moyenne (h) |
|---------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----|-------------------|-----------------------|
| Lampe halogène « tension du réseau » (finition claire). |                    |                             |     |                   |                       |
| 40                                                      | 490                | 12                          | 100 | 3 000             | 2 000                 |
| 60                                                      | 820                | 14                          |     |                   |                       |
| 120                                                     | 2 250              | 19                          |     |                   |                       |
| 160                                                     | 3 100              | 19                          |     |                   |                       |
| 400                                                     | 9 000              | 23                          |     |                   |                       |
| 1 000                                                   | 22 000             | 22                          |     |                   |                       |
| 2 000                                                   | 44 000             | 22                          |     |                   |                       |

| Lampe halogène ECO « tension du réseau » ( finition claire). |       |    |     |       |       |
|--------------------------------------------------------------|-------|----|-----|-------|-------|
| 40                                                           | 590   | 15 | 100 | 2 800 | 2 000 |
| 60                                                           | 980   | 16 |     |       |       |
| 120                                                          | 2 300 | 19 |     |       |       |
| 160                                                          | 3 300 | 21 |     |       |       |

### ☞ Les tubes et lampes fluorescentes

Les lampes fluorescentes, illustrées par la figure 50 ci-dessous, font partie des lampes à décharge. Ce type de lampe utilise de la vapeur de mercure sous basse pression. Lorsqu'on met le tube sous tension, des électrons sont émis par les deux électrodes de tungstène. Lors de leur trajet au travers du tube, ils entrent en collision avec les atomes de mercure. Il en résulte une libération d'énergie sous forme de rayonnement ultraviolet invisible.

Ce rayonnement est absorbé par la couche fluorescente présente sur la face interne du tube et converti en rayonnement visible. La composition chimique de la couche fluorescente placée à l'intérieur du tube influence la couleur de la lumière émise et l'indice de rendu des couleurs de la lampe. Comme toutes les lampes à décharge, le tube fluorescent a besoin pour fonctionner d'un starter, d'un ballast et d'un condensateur pour compenser le mauvais cos  $\phi$ .

La chaleur dégagée par ce type de lampe est :

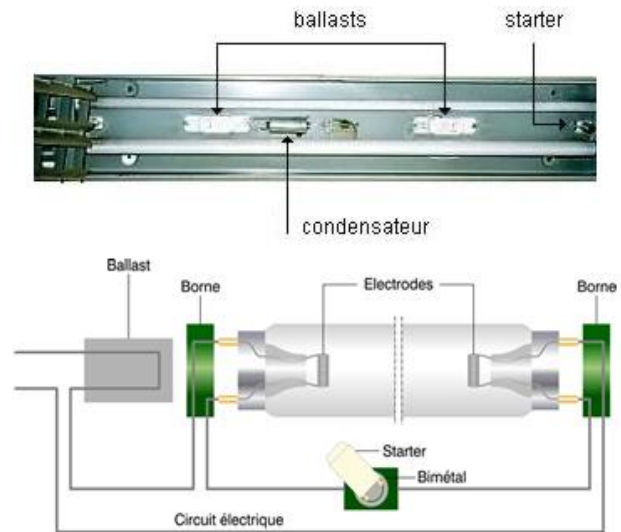


Figure 50 : Composition de la lampe fluorescente

$$Q_{\text{Sécl}} = 1,25. P \text{ (en W)} \quad [64]$$

Les 25 % supplémentaires pour la lampe fluorescente représentent la chaleur dégagée par le ballast électromagnétique. Les principales caractéristiques de ces types de lampes sont énumérées dans le tableau 37 ci-après :

Tableau 37 : Caractéristiques de lampes fluorescentes

| Puissances (W)                    | Flux lumineux (lm) | Efficacité lumineuse (ballast non compris) (lm/W) | IRC | T° de couleur (K) | Durée vie utile (h) | Durée vie moyenne (h) |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-----|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Ø 26 mm ou T8, classe 1B, à 25 °C |                    |                                                   |     |                   |                     |                       |
| 18                                | 1 350              | 75                                                |     |                   |                     |                       |

|                                       |       |     |                             |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
|---------------------------------------|-------|-----|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 36                                    | 3 350 | 93  | 80<br>à<br>90               | 2 700                        | 16 000 avec ballast<br>électronique<br>préchauffage<br>(42 000 pour la<br>version longue<br>durée) | 20 000 avec ballast<br>électronique<br>préchauffage<br>(50 000 pour la<br>version longue durée) |
| 58                                    | 5 200 | 90  |                             | 3 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
|                                       |       |     |                             | 4 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
|                                       |       |     |                             | 65 00 <sup>1</sup>           |                                                                                                    |                                                                                                 |
| Ø 26 mm ou T8, classe 2, à 25°C       |       |     |                             |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 18                                    | 1 100 | 64  | 60<br>à<br>80               | 2 900                        | 5 000                                                                                              | 14 000                                                                                          |
| 36                                    | 2 600 | 83  |                             | 4 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 58                                    | 4 125 | 83  |                             |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
| Ø 16 mm ou T5, classe 1 B HE, à 35 °C |       |     |                             |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 14                                    | 1 250 | 96  | 85                          | 2 700                        | 19 000<br>(30 000 pour la<br>version longue<br>durée)                                              | 24 000<br>(45 000 pour la<br>version longue durée)                                              |
| 21                                    | 1 920 | 100 |                             | 3 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 28                                    | 2 600 | 104 |                             | 3 500                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 35                                    | 3 300 | 104 |                             | 4 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
|                                       |       |     | 5 000<br>65 00 <sup>1</sup> |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
| Ø 16 mm ou T5, classe 1 B HO, à 35 °C |       |     |                             |                              |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 24                                    | 1 750 | 89  | 85                          | 2 700                        | 19 000<br>(30 000 pour la<br>version longue<br>durée)                                              | 24 000<br>(45 000 pour la<br>version longue durée)                                              |
| 39                                    | 3 100 | 92  |                             | 3 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 49                                    | 4 300 | 99  |                             | 3 500                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 54                                    | 4 450 | 93  |                             | 4 000                        |                                                                                                    |                                                                                                 |
| 80                                    | 6 550 | 88  |                             | 5 000,<br>65 00 <sup>1</sup> |                                                                                                    |                                                                                                 |

<sup>1</sup> Le flux lumineux (et donc l'efficacité lumineuse) est légèrement plus faible pour une T° de couleur de 6 500 K.

## 👁 Les lampes LED (ou Light Emitting Diode)

La lampe LED est un système complet conçu de manière à permettre le remplacement aisé des technologies traditionnelles moins efficaces (rétrofit). Ces lampes reprennent pour cela les formes et les culots normalisés des lampes traditionnelles. Le luminaire LED est, dans ce cas, un système complet composé de puces LED, de lampe(s) à LEDs ou encore de module(s) LED, comprenant l'électronique, l'enveloppe, le câblage, etc.

Il peut éventuellement être conçu pour recevoir des modules remplaçables. En effet, ce type de lampe utilise une diode électroluminescente pour transformer l'électricité en lumière. Ces ampoules ont un très



Photo 22 : Lampe LED

bon rendement de lumière par rapport à l'énergie qu'elles consomment, chauffent peu et ont une durée de vie assez longue.

Bien que le rayonnement lumineux de la LED ne génère pas d'infrarouge (et donc pas de chaleur dans le sens du flux lumineux), la dissipation de la chaleur de la jonction est un des problèmes majeurs des lampes et des luminaires à LEDs. En effet, seuls 30 % de l'énergie consommée par ce type de lampe sont transformés en lumière visible, tandis que 70 % de sa consommation sont transformés directement en chaleur qui doit être absolument évacuée sous peine de réduire l'efficacité lumineuse et la durée de vie.

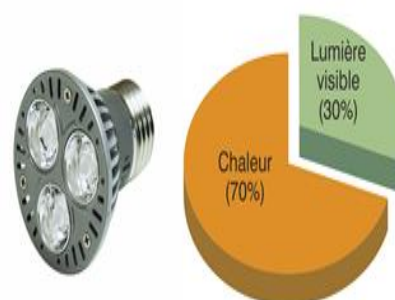


Figure 51 : La dissipation de la chaleur de la lampe LED

Des études de dissipation thermique pour chaque modèle sont donc nécessaires pour pouvoir concevoir une lampe ou un luminaire à LEDs avec son dissipateur de chaleur intégré. Les principales caractéristiques de lampes LED sont données par le tableau 38 ci- dessous.

Tableau 38 : Les principales caractéristiques des lampes LED

| Puissances (W)                                  | Puissance driver (W) | Puissance totale (W) | Flux lumineux (lm) | Efficacité lumineuse (ballast non compris) (lm/W) | IRC   | T° de couleur (K) | Durée vie utile/Durée vie moyenne (h) |
|-------------------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------------|
| Forme standard (type remplacement incandescent) |                      |                      |                    |                                                   |       |                   |                                       |
| 3                                               | 0,6                  | 3,6                  | 136                | 45                                                | 80-90 | 2 700-3 000       | 15 000-30 000                         |
| 5                                               | 0,9                  | 5,9                  | 250                | 50                                                |       |                   |                                       |
| 8                                               | 1,6                  | 9,6                  | 470                | 59                                                |       |                   |                                       |
| 10                                              | 2                    | 12                   | 650                | 65                                                |       |                   |                                       |
| 12                                              | 2,4                  | 14,4                 | 810                | 68                                                |       |                   |                                       |
| 14,5                                            | 5,9                  | 17,4                 | 1 055              | 73                                                |       |                   |                                       |

Le tableau 39 ci-après compare les performances de ces différents types de lampe citées ci- dessus :

Tableau 39 : Performance des différentes lampes

| Type de lampe | Puissance (W) | Flux lumineux(lm) | Efficacité lumineuse (sans ballast) (lm/w) | Indice de rendu des couleurs (IRC) | Température de couleur (K) | Durée de vie moyenne |
|---------------|---------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Incandescente | 25 à 500      | 220 à 8 200       | 9 à 16                                     | 100                                | 2 700                      | 1 000                |
| Halogène      | 40 à 2 000    | 500 à 50 000      | 12,5 à 25                                  | 100                                | 3 000                      | 2 000                |

|                  |         |              |          |         |               |                  |
|------------------|---------|--------------|----------|---------|---------------|------------------|
| Tube fluorescent | 14 à 58 | 1150 à 5 200 | 64 à 104 | 60 à 90 | 2 700 à 6 500 | 14 000 à 18 000  |
| Fluo compacte    | 5 à 55  | 200 à 4 800  | 39 à 87  | 80      | 2 700 à 4000  | 8 000 à 13 000   |
| LED              | 2 à 7   | 5 à 20       | 50       | 70 à 85 | 2 700 à 6 500 | 50 000 à 100 000 |

### b-3-3- L'éclairage

Même si l'apport thermique de l'éclairage doit être limité, il conviendra de tenir compte de la répartition de l'éclairage dans la pièce afin de limiter les risques de confort visuels. La condition d'éclairage nécessaire pour assurer la satisfaction des usagers dépend de l'utilisation des locaux. L'union suisse pour la lumière (USL) recommande les valeurs pour l'éclairage artificiel des locaux présentées dans le tableau 40 ci-après :

Tableau 40 : Éclairage recommandé

| Type de locaux et d'activités                                                                   | Éclairage requis(lux) |         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------|------|
|                                                                                                 | Min.                  | Moyenne | Max  |
| Circulation, corridors, théâtres, salle de concert                                              | 50                    | 100     | 200  |
| Atelier, halles de montage, magasins                                                            | 200                   | 300     | 400  |
| Écoles, bureaux, travaux courants, lecture, écriture, travail sur écran ; etc.                  | 300                   | 400     | 500  |
| Travaux délicats, dessin, tracés, travaux techniques, etc.                                      | 500                   | 750     | 1000 |
| Ateliers de précision, mécanique fine, contrôle des couleurs, contrôle visuel de qualités, etc. | 1000                  | à       | 5000 |

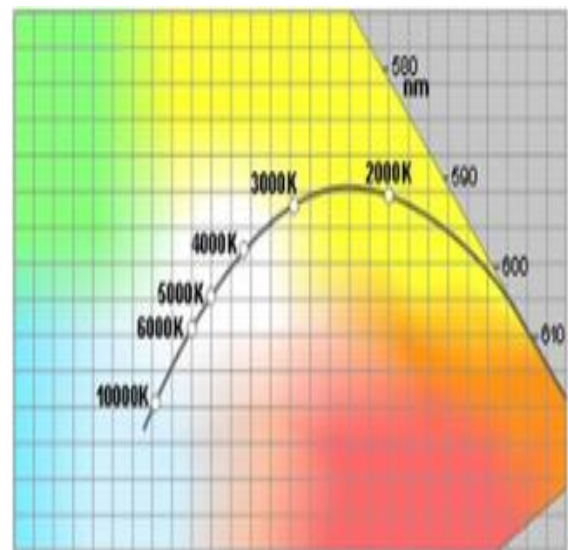
### b-3-4- La température de la couleur

La couleur de la lumière artificielle a une action directe sur la sensation de confort de l'ambiance lumineuse d'un espace. Elle n'influence cependant pas les performances visuelles. Pour la qualifier, on définit la température de couleur exprimée en Kelvins (K), illustrée par le graphe 13 ci-dessous. On parlera généralement de teinte chaude si la température de couleur est inférieure à 3 000 K, ou froide dans la condition où la température de couleur est supérieure à 3 000 K. Plus une couleur est chaude visuellement, plus sa température thermique (en degré Kelvin) est donc faible.

Une lumière de couleur « chaude » est composée majoritairement de radiation rouge et orange. C'est le cas des lampes à incandescence normale. Les tubes fluorescents standards, illustrés par la figure 52 ci-dessous, génèrent une lumière « froide » composée principalement de radiation verte, violette et bleue. De plus, les couleurs chaudes comme le rouge ou l'orange, des objets sont plus agréables lorsqu'elles sont éclairées par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide, mais par contre la lumière froide tend à noircir les couleurs froides bleues ou violettes. Ceci se manifeste particulièrement bien dans l'éclairage à incandescence classique.

Les radiations colorées émises par les objets et l'environnement peuvent aussi produire certains effets psychophysiologiques sur le système nerveux. C'est ainsi que les couleurs de grande longueur d'onde (rouge, orange) ont un effet stimulant tandis que celles de courte longueur d'onde (bleu, violet) ont un effet calmant. Les couleurs intermédiaires (jaune, vert) ont, de même que le blanc, un effet tonique qui est favorable à la concentration. Les couleurs foncées et le gris ont par contre une action déprimante.

Enfin, les couleurs peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. Les couleurs chaudes seront de préférence utilisées dans des locaux de dimensions exagérées tandis que les couleurs froides seront choisies pour les locaux de dimensions réduites. Les températures de la lumière émise par les différents types de lampe sont reprises dans le graphe 14 suivant :



Graphe 13: Qualification de la température de couleurs

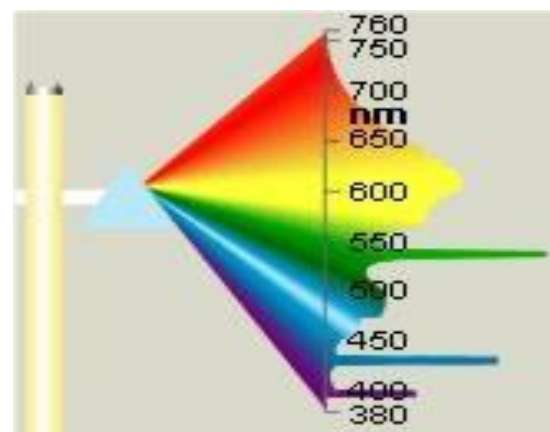
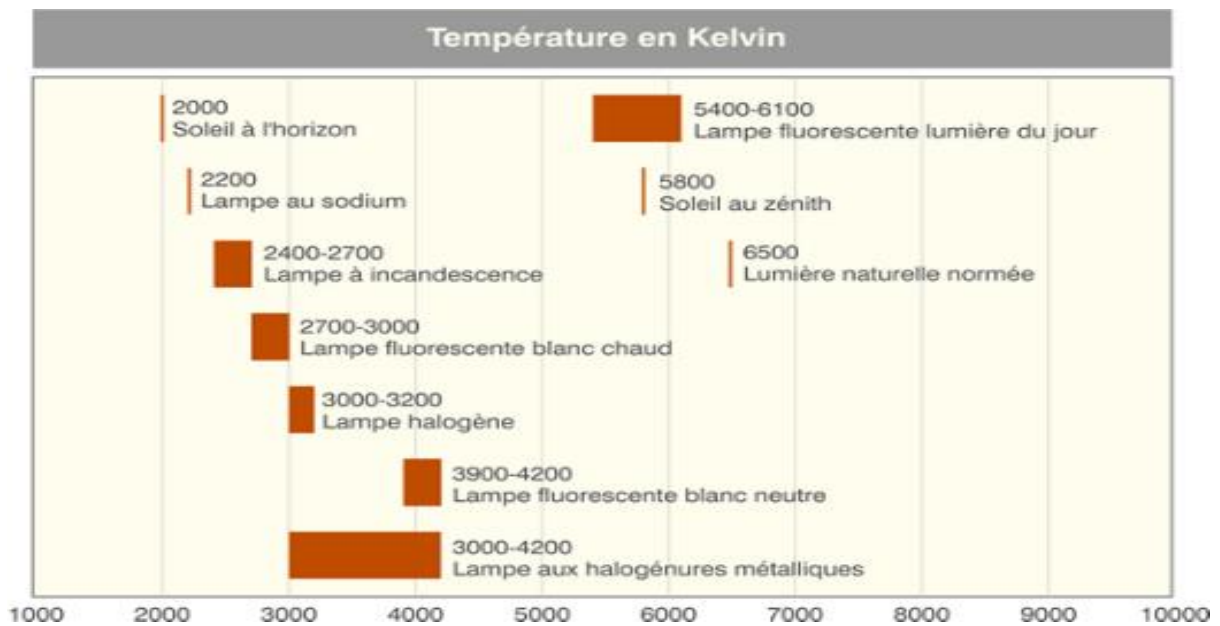


Figure 52 : Température des couleurs de lampe fluorescente



Graphe 14: Températures des couleurs de la lumière

### c- APPORT THERMIQUE TOTAL

Nous pouvons déduire ainsi les apports thermiques totaux  $Q_T$  (W) d'un local à partir des différents apports que nous avons vus ci-dessus. Dans ce cas, les charges thermiques totales représentent la somme des charges externes et internes et peuvent être découpées en charges sensibles ( $Q_s$ ) totales et en charges latentes ( $Q_L$ ) totales, telles que :

$$Q_T (W) = Q_s + Q_L \quad [65]$$

Dans laquelle :

- Les charges sensibles totales sont les apports de chaleur sensible dans le local dus à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, on a ainsi :

$$Q_s (W) = Q_R + Q_M + Q_V + Q_{SR} + Q_{SOC} + Q_{Sécl} + Q_{Séquip} \quad [66]$$

- Les charges latentes totales sont les apports de chaleur latente dus à la différence de quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air extérieur et intérieur, telles que :

$$Q_L (W) = Q_{LR} + Q_{LOC} + Q_{Léquip} \quad [67]$$

Ces apports thermiques seront à considérer avec les charges internes des locaux lors de la définition préalable des hypothèses de la simulation thermique du bâtiment objet de l'étude.

### IV-7-4- Bilan énergétique d'un bâtiment

Le bâtiment peut être comparé à un tonneau des Danaïdes, maintenu dans une hauteur d'eau fixe, en le remplissant continuellement le niveau correspondant au confort demandé ainsi que les débits d'eau aux flux d'énergie. Une partie de l'énergie est perdue à cause du versement à côté du tonneau.

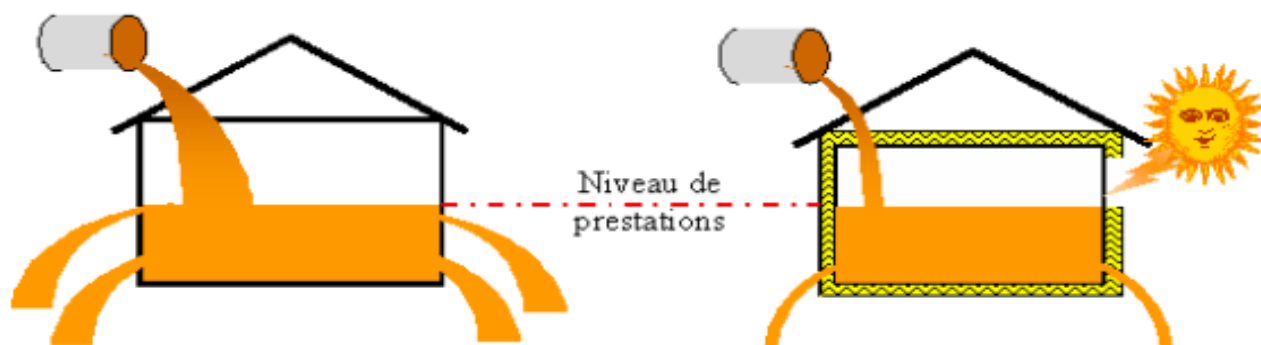
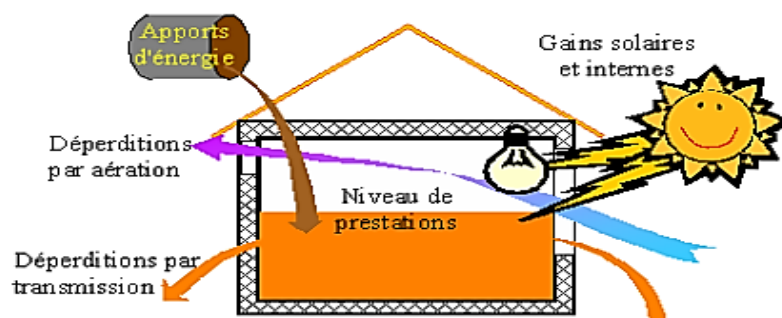


Figure 53 : Le bâtiment se ressemble à un tonneau de Donatides

La figure 53 ci-dessus illustre mieux la maintenance du confort dans un bâtiment grâce à un flux d'énergie : à gauche bâtiment mal isolé, à droite, bâtiment correctement isolé.

Les principaux flux de chaleur au travers du bâtiment, résumé dans la figure 54 ci-après, sont les déperditions par transmission au travers des parois de l'enveloppe, la déperdition par aération, à savoir la chaleur nécessaire pour conditionner l'air frais provenant de l'extérieur, les gains solaires passifs, essentiellement le rayonnement solaire entrant par la fenêtre, et l'apport d'énergie nécessaire pour maintenir un confort thermique agréable [Claude-Alain Roulet, dans son ouvrage « Condition de confort et de logement sain », Mai 2008, page 47].

Figure 54 : Les principaux flux de chaleur au travers d'un bâtiment



On peut dire ainsi que :

- Si le bâtiment est mal isolé, le flux d'énergie à l'intérieur est plus important, et le pire, la température est hétérogène : c'est-à-dire, en hiver, la température auprès des corps de chauffe est trop chaude et celle auprès des endroits mal isolés de l'enveloppe est trop froide ;
- Par contre, si le bâtiment est bien conçu, la température à l'intérieur est plus homogène. C'est-à-dire : les vitrages sont bien exposés et munis de protection solaire bien inventée et d'ouvertures adéquates, fournir de gain solaire important en hiver, bon contact avec l'extérieur, et permettent d'assurer un climat agréable en été.

Le bilan énergétique<sup>69</sup> à l'intérieur d'un bâtiment est basé sur le fait que toute l'énergie entrante finit par être transformée en chaleur, et cette dernière passe tôt ou tard à l'extérieur de l'enveloppe. Dans la mesure

<sup>69</sup>En moyenne, l'intérieur d'un bâtiment a une température constante.

où l'intérieur du bâtiment est souvent plus chaud que l'extérieur, toute cette énergie finit aussi par y sortir. Selon Melle Hamel Khalissa, dans son cours n° 04, relatif au comportement thermique des bâtiments, le bilan énergétique est la comptabilité des entrées et des sorties d'énergies du bâtiment pendant une période de temps donné. Pour conserver l'énergie, ce bilan doit être en équilibre. Le bilan énergétique détaille donc toutes les pertes et tous les gains, les sommes des gains et des pertes étant égales si la période de consommation est suffisamment grande<sup>70</sup>. Le tableau 41 ci-après donne quelques facteurs de perte et de gain d'énergie dans un local :

Tableau 41 : Quelques facteurs des pertes et de gain d'énergie dans un local

| Dépense                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Gains                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmission de chaleur au travers de l'enveloppe ;</li> <li>- Transmission de chaleur au travers du sol ;</li> <li>- Pertes de chaleur dans l'air vicié ;</li> <li>- Pertes de chaleur dans les égouts (eau chaude) ;</li> <li>- Chaleur accumulée dans la structure ;</li> <li>- Déperdition des installations techniques.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rayonnement solaire entrant par les fenêtres et autre système de captage passif ;</li> <li>- Chaleur métabolique des habitants ;</li> <li>- Capteurs solaires ;</li> <li>- Chaleur restituée par la structure ;</li> <li>- Apport d'énergie comme l'électricité et les combustibles</li> </ul> |
| <b>Pour conserver l'énergie : TOTAL DES PERTES= TOTAL DES GAINS [68]</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Le tableau précédent montre bien que le bâtiment reçoit de l'énergie sous différentes formes, dont :

- Les combustibles : mazout, gaz, charbon, bois, etc. ;
- L'électricité ;
- Le rayonnement solaire et le rayonnement thermique de l'extérieur ;
- La chaleur de l'air externe ainsi que la chaleur métabolique des habitants, éventuellement de la chaleur d'une centrale de chauffage, etc.

Un bâtiment est donc comparable à un système thermique, avec des séries d'inputs et outputs thermiques. Dont l'équation d'équilibre peut s'écrire :

$$Q_i + Q_c + Q_s + Q_v = \Delta S \quad [69]$$

Dont chaque terme constituant l'équation signifie :

- ☞  $Q_i$  : gain de chaleur interne ;
- ☞  $Q_c$  : gain ou perte de chaleur par conduction ;
- ☞  $Q_s$  : gain thermique solaire ;
- ☞  $Q_v$  : gain ou perte de chaleur par évaporation ;
- ☞  $\Delta S$  est le changement ou la différence de la chaleur stockée dans le bâtiment :

<sup>70</sup>Par exemple une année, voir un mois s'il n'existe pas de capacité de stockage particulièrement grande

- $\Delta S = 0$  s'il y a un équilibre dans le bilan thermique du bâtiment ;
- $\Delta S > 0$  si la température à l'intérieur du bâtiment augmente ;
- $\Delta S < 0$  si le bâtiment se refroidit.

#### IV-8- ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE D'UN BÂTIMENT

Les calculs de l'évolution de la température intérieure en régime dynamique dans un bâtiment paraissent très complexes. C'est pourquoi on n'utilise dans le présent ouvrage que la méthode simple d'approximations pour la mettre en évidence.

##### IV-8-1- Hypothèses simplificatrices de l'évolution de la température extérieure

L'évolution de la température extérieure d'un local peut être approchée par une sinusoïde de période 24 h, calée sur la température moyenne et l'amplitude quotidienne de la température. Précisément, c'est la température superficielle du mur qui varie de façon sinusoïdale, telle que :

$$T_e = T_{emoy} + A_e \sin (\Omega t) \quad [70]$$

La température extérieure moyenne  $T_{emoy}$  et l'amplitude  $A_e$  sont données par la météo. Tandis que  $\Omega$  est la pulsation égale à  $2\pi/T$ ,  $t$  étant la période considérée (24 heures).

##### IV-8-2- Évolution de la température intérieure

Par analogie, dans une approche thermique dynamique qui tient compte de la vie du bâtiment ainsi que des différents apports/gains sus énoncés, il est possible de définir la température intérieure  $T_i$  de la manière suivante :

$$T_i = T_{imoy} + A_i \sin (\Omega t')$$

$$\text{Avec : } T_{imoy} = T_{emoy} + D_T$$

$$\text{Et } t' = t - R$$

Ainsi, l'équation de l'évolution de la température intérieure d'un bâtiment peut s'écrire :

$$T_i = (T_{emoy} + D_T) + [(A_i/A_e) - A_e] \times \sin [\Omega (t - R)] \quad [71]$$

Où :

- $T_i$  : température intérieure à un instant  $t$  (°C) ;
- $T_{emoy}$  : Température extérieure moyenne sur 24 heures (°C) ;
- $D_T$  : [Gain thermique](#) (°C), détaillé dans le sous-paragraphe IV-7-3 du présent chapitre ;
- $A_i$  : amplitude de la température intérieure (°C) ;
- $A_e$  : amplitude de la température extérieure (°C) ;
- $A_i/A_e$  : facteur d'amortissement dépendant de l'inertie du bâtiment ;
- $R$  : Retard ou déphasage dépendant de l'inertie du bâtiment

-  $A_i \sin [\Omega (t - R)]$  : Fonction sinusoïdale de l'amplitude de la température intérieure, où  $\Omega$  est la pulsation égale à  $2\pi/T$ ,  $t$  étant la période considérée (24 heures).

Autrement dit, à un instant  $t$  :

**La température intérieure d'un local = La température d'air moyenne extérieure durant 24 heures + Un gain de température moyenne (dû aux apports internes et solaires) + Une fonction sinusoïdale de l'amplitude moyenne de la température intérieure, pour une période de 24 heures** [72]

## IV-9- MÉTHODE D'ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT

### IV-9-1- Mesure directe

Il existe sur le marché un instrument permettant d'analyser directement les ambiances climatiques intérieures d'un local. Pour cela, la surface du capteur de cet appareil est chauffée à une température similaire à celle d'un homme, dont on a présélectionné leur type d'habillement. Le niveau de chaleur nécessaire pour maintenir cette température est ainsi utilisé comme hypothèse de mesure des conditions environnementales du local objet de l'étude. De même, pour l'appareil pouvant, en tenant compte de l'habillement et de l'activité, calculer directement la température opérative, l'indice PMV, le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) ainsi que la température d'ambiance optimale. Le coût de ces appareils limite cependant leurs usages aux laboratoires spécialisés.

### IV-9-2- Évaluation de la sensation par rapport à la température d'ambiance optimale

Les premières études modernes du confort furent au début du XIX<sup>e</sup> siècle et se poursuivaient encore aujourd'hui. Elles visaient la prévision du taux de satisfaction pour une ambiance donnée et la mise au point d'indicateurs permettant de la qualifier précisément. La sensation de confort d'un individu peut être quantifiée en utilisant l'échelle de sensation à sept (7) niveaux de -3 à + 3 proposée par Fanger en 1982 et officialisée par la Norme internationale ISO 7730 du 1993. Cette sensation thermique est définie par les deux relations suivantes :

- Pour l'activité métabolique inférieure à 120 W/m<sup>2</sup> :

$$S_T = 0,6153 \cdot T_{sk} - 19,04 \quad [73]$$

- Pour l'activité métabolique supérieure à 120 W/m<sup>2</sup> :

$$S_T = 0,0133 \cdot T_{sk}^3 - 1,2228 \cdot T_{sk}^2 + 37,906 \cdot T_{sk} - 397,616 \quad [74]$$

Avec :

- $S_T$  : la sensation thermique, comprise entre - 3 et + 3 ; et
- $T_{sk}$  : la température de peau en (°C).

Ces jauges de sensibilité sont liées aux paramètres comportementaux selon l'échelle de Bedford et à l'ambiance d'un individu suivant l'échelle d'ASHRAE, données par le tableau 42 ci- dessous. On considère

que la zone de confort thermique s'étale de la sensation de légère fraîcheur (-1) à la sensation de légère chaleur (+ 1), soit de (-1) à (+ 1.)

Tableau 42 : Indice de vote moyen prévisible

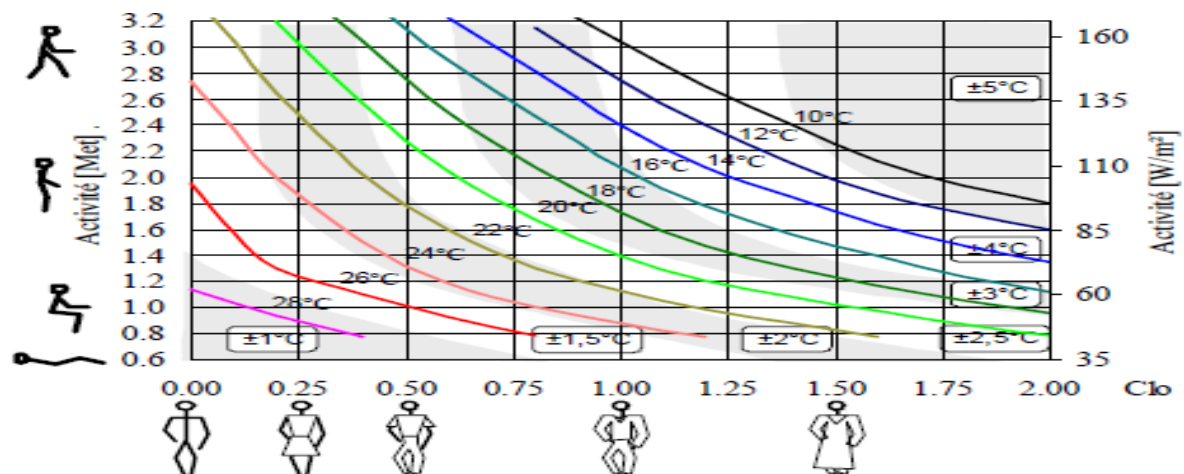
| S <sub>T</sub> | Échelle de Bedford (confort) | Échelle ASHRAE (sensation)       |
|----------------|------------------------------|----------------------------------|
| +3             | Chaud                        | Insatisfait parce que très chaud |
| +2             | Tiède                        |                                  |
| +1             | Légèrement tiède             | Satisfait                        |
| 0              | Neutre                       |                                  |
| -1             | Légèrement frais             |                                  |
| -2             | Frais                        | Insatisfait parce que très froid |
| -3             | Froid                        |                                  |

La norme NF EN ISO 7730, intitulée l'« Ergonomie des ambiances thermiques- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local » (mars 2006) décrit la méthode de comptage du pourcentage des personnes insatisfaites par les conditions de confort. Ce pourcentage est directement lié au vote moyen d'une population donnée. À partir de cette méthode découlent ainsi deux paramètres permettant d'évaluer les indicateurs de la sensation du confort thermique dans un local : l'indice de vote moyen prévisible (PMV) et le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD).

#### - L'« Indice de vote moyen prévisible » (PMV) :

Cet indice donne l'avis moyen d'un groupe important des personnes qui exprimeraient un vote de sensation de confort thermique dans un environnement donné sur une échelle de -3 à + 3, suivant l'indice de vote moyen prévisible du tableau 42 ci-dessus :

- Une valeur de PMV de zéro exprime une sensation de confort thermique optimale ;
- Une valeur de PMV négative signifie que la température est plus basse que la température idéale ;
- Réciproquement, une valeur positive signale qu'elle est plus élevée.



Graphie 15: Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme d'après le Norme

Le diagramme du graphe 15 ci-dessus montre les températures opératives idéales, liées à un PMV nul en fonction de l'activité et l'habillement ainsi que la vitesse de l'air pour une vitesse de l'air basse (moins de 0,1 m/s) et une humidité relative normale (35 à 65 %). L'écart acceptable autour de la température idéale,  $-0,5 < PMV < 0,5$ , domaines où il n'y aurait que 10 % d'insatisfaits est présenté par les parties ombrées.

Connaissant les différents paramètres influant le confort thermique suivant :

| Paramètres                                        | Unité (SI)                                  |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Température de l'air..... :                       | $\Theta_a$ (°C) ou $T_a$ (K)                |
| Température radiante moyenne..... :               | $\Theta_{mrt}$ (°C) ou $T_{mrt}$ (K)        |
| Pression partielle de vapeur d'eau..... :         | P (Pa)                                      |
| Vitesse relative de l'air..... :                  | U (m/s)                                     |
| Activité métabolique du sujet..... :              | M (Watt)                                    |
| Travail mécanique fourni par le sujet..... :      | W (Watt)                                    |
| Surface de la peau du sujet..... :                | A (m <sup>2</sup> )                         |
| Activité spécifique du sujet..... :               | $m = M/A$ (W/m <sup>2</sup> )               |
| Travail spécifique du sujet..... :                | $w = W/A$ (W/m <sup>2</sup> )               |
| Résistance thermique des habits ou habillement. : | R (m <sup>2</sup> . K/W) ou (clo) = R/0,155 |
| Fraction de la surface habillée..... :            | f                                           |

On peut déterminer le PMV à l'aide de l'équation de Fanger (1982), telle que :

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036 m) + 0,028] [m - w - 0,00305 (5733 - 6,99 (m - w) - p) - 0,42 (m - w - 58,15) - 0,000 017 m (5867 - p) - 0,0014 m (307 - T_a) - F] \quad [75]$$

F étant la fonction d'habillement donnée par :

$$F = 3,96 \cdot 10^{-8} f (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) + fh (T_{cl} - T_a) \quad [76]$$

Pour le coefficient h de transfert thermique des habits, on prend la plus grande valeur des deux expressions suivantes :

$$h = 2,38 (T_{cl} - T_a)^{1/4} \text{ ou } h = 12,06 \sqrt{U} \quad [77]$$

La température absolue des habits  $T_{cl}$  est obtenue en résolvant l'équation :

$$T_{cl} = 308,9 - 0,002 8 (m - w) - RF \quad [78]$$

Et la fraction de surface habillée f est estimée par :

$$f = 1,00 + 1,290 R \text{ si } R < 0,78 \text{ m}^2\text{K/W} \quad [79]$$

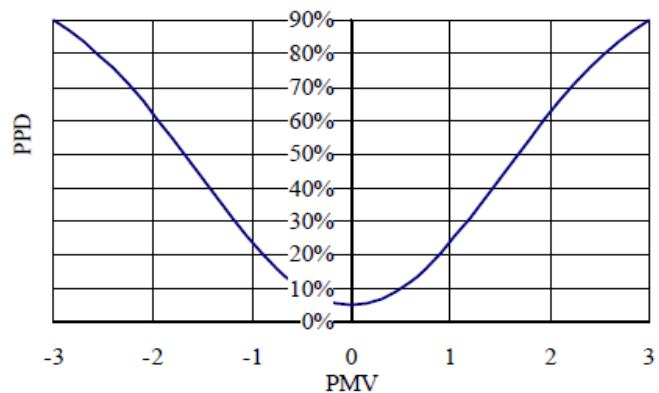
$$f = 1,05 + 0,645 R \text{ si } R > 0,78 \text{ m}^2\text{K/W} \quad [80]$$

- Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) :

Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, Fanger a lié le PMV à un autre indice, le « PPD », qui prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée, tel que :

$$\text{PPD} = 1 - 0,95 \exp(-0,003353 \text{ PMV}^4 - 0,2179 \text{ PMV}^2) \quad [81]$$

Cette relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5 % pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre vers les sensations chaudes et froides, comme illustre le graphe 16 ci-contre. Même dans la condition de confort optimale, on trouvera 2,5 % des personnes ayant très chaud, et de 2,5 % des personnes très froides.



Graphe 16: Relation entre le pourcentage d'insatisfaits (PPD) et le vote moyen (PMV)

Le pourcentage d'insatisfait monte à 10 % pour un PMV entre -0,5 et +0,5 et 20 % pour le PMV entre -0,84 et +0,84.

#### IV-9- 3- La simulation thermique

Contrairement à la mesure directe et l'expérimentation de la sensation d'un individu, la simulation thermique est un outil extrêmement séduisant et permet de tout essayer, fournit des solutions plus originales, avec un coût marginal très faible. Au moment de la simulation, on peut exploiter un modèle de bâtiment en lui ajoutant des composants, modifiant sa forme, son orientation, le situant à des endroits différents, etc. En effet, la simulation thermique permet à la fois d'évaluer des solutions techniques et architecturales. Elle se fait avec un détail, précision et pertinence, elle fournit aussi des résultats sous une forme identique à celle qu'auraient des mesures expérimentales sur un bâtiment réel, inversement aux méthodes de calcul simplifiées. Ces dernières fournissent des résultats intégrés sur l'ensemble d'une période et se limitent à l'évaluation de besoins en chauffage ou en climatisation, tandis que la simulation fournit des résultats qui offrent de plus, la possibilité de suivre l'évolution des variables d'observation. On peut ainsi analyser directement les influences des caractéristiques géométriques et physiques du bâtiment à l'aide de leur courbe d'évolution des températures et les taux d'humidité.

Les principaux objectifs et avantages de la simulation thermique d'un bâtiment sont les suivants :

- Aider le concepteur à réaliser la conception d'un bâtiment ;
- Déterminer et analyser les conditions de confort hygrothermique, visuel, acoustique, etc. ;
- Dimensionner les systèmes de climatisation, chauffage, ventilation, etc. ;
- Optimiser l'architecture du bâtiment en tenant en compte les conditions de confort ;

- Déterminer les consommations d'électricité, eau, fioul, etc.

C'est-à-dire, ce nouveau type d'évaluation de confort thermique permet de concevoir un bâtiment confortable et à faible consommation d'énergie. Dans cette optique, pour prendre en compte le comportement dynamique et énergétique du bâtiment, des modèles complexes ont été développés partout. Ces modèles permettent d'estimer précisément un grand nombre de phénomènes physiques réagissant les réponses énergétiques des locaux d'un bâtiment en fonction de l'évolution temporelle des paramètres de sollicitations [Selon Mathieu DAVID ([mathieu.david@univ-reunion.fr](mailto:mathieu.david@univ-reunion.fr))], comme la météorologie, la régulation des systèmes, l'utilisation, etc. La complexité de ces modèles et les méthodes de résolution qui leur sont associées nécessitent ainsi d'avoir recours à la puissance de calcul de la nouvelle technologie de l'informatique. Ces modèles ont été déjà connus très longtemps, mais réservés aux spécialistes, mais actuellement ils deviennent des plus en plus accessibles aux chercheurs.

## CONCLUSION

Les deux premières méthodes de mesures nécessitent des matériels spécifiques et coûteux. De plus, la fausse manipulation de ces matériels ainsi que les réponses incertaines des groupes de personnes enquêtées peuvent impacter les résultats à exploiter. En conséquence, la correction ainsi que la répétition des expériences vaudront respectivement beaucoup de temps et budget considérables dans une recherche. Ces raisons m'orientent dans la pratique de cette dernière méthode d'évaluation.

Pour bien mener le processus de la [simulation hygrothermique](#) d'un bâtiment, les différentes étapes de la modélisation suivante, que nous allons suivre et développer dans le chapitre III de la deuxième partie de cet ouvrage, sont inévitables :

- Modélisation architecturale et géométrique du modèle du bâtiment ;
- Définition des différents paramètres des matériaux pour l'ensemble des éléments du modèle géométrique, comme les façades, la toiture, le sol d'assise, les planchers, donc les éléments de la structure à prendre en compte dans l'inertie thermique du bâtiment ;
- Création des blocs thermiques issus des différentes zones du bâtiment ;
- Définition des sources de ventilation avec leurs horaires d'opération ;
- Définition des hypothèses d'usage : occupation, équipements, éclairage ;
- Interaction du bâtiment avec l'environnement du site d'implantation.

## IV-10- LES INCONFORTS LOCAUX

Malgré les différents efforts scientifiques réalisés par l'humanité pour maîtriser le confort thermique dans un bâtiment. L'existence d'une zone thermique inégale dans un local engendre toujours un inconfort pour certaines parties du corps, comme : la tête, les pieds, les mains.

Cet inconfort thermique est occasionné par plusieurs facteurs, comme :

- Le refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une des parties du corps, comme le courant d'air ;
- La différence de température anormalement entre la tête et la cheville, avec un sol très chaud ou très froid, ou bien à une asymétrie de rayonnement thermique.

La norme ISO 7730 propose la formule suivante pour évaluer la gêne due au courant d'air à travers un indice  $D_R$  (de l'anglais « draught rating ») qui prédit le pourcentage de la population qui serait dérangée par ce courant d'air :

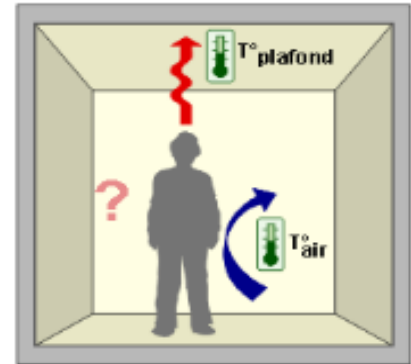


Figure 55 : Les inconforts locaux

$$D_R = (34 - t_a) (v - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot v \cdot T_u + 3,14)$$

[82]

Avec :

- ☞  $D_R$  : Le gêne par courant d'air (%) ;
- ☞  $t_a$  : La température locale de l'air (°C) ;
- ☞  $v$  : La vitesse d'air moyenne locale (m/s) ;
- ☞  $T_u$  : L'intensité locale de turbulence définie comme le rapport entre l'écart-type de la vitesse d'air locale et la valeur moyenne de celle-ci.

Ce modèle s'applique aux sujets réalisant une activité légère, essentiellement au repos, et éprouvant une sensation proche de la neutralité pour le corps entier. Par contre, il est important de faire une distinction selon l'état thermique du corps du sujet. Dans ce cas, pour une situation chaude, le mouvement d'air peut être perçu comme agréable tandis qu'il peut être gênant pour une situation froide.

Nous allons étudier, ainsi, dans la suite de la présente partie ces différentes sources d'inconforts à l'intérieur d'un local, notamment : Le courant d'air local, l'asymétrie de la température de rayonnement, la différence verticale de la température de l'air, ainsi que les températures du plancher.

#### IV-10-1- L'effet du courant d'air

Le courant d'air provoque une sensation de froid due à une convection assez importante entre la peau et l'air ambiant. La perception du courant d'air dépend de la vitesse et la température de l'air ainsi que de la zone du corps concerné. L'inconfort engendré par le courant d'air se manifeste localement au niveau de la nuque ou du visage de l'individu. Le courant d'air excessif conduit le corps de l'occupant à réaliser un effort dans l'augmentation de la température à l'intérieur pour contrer la sensation du froid. La norme recommande ainsi une vitesse d'air moyenne inférieure à 0,15 m/s en hiver et 0,25 m/s en été lors d'un travail sédentaire.

#### IV-10-2- L'effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique

La présence d'une paroi chaude ou froide comme le plafond ou un plancher chauffant, un vitrage chaud ou froid d'un local engendre un effet de l'asymétrie du rayonnement thermique. Dans sa thèse de Doctorat présenté à l'institut des Sciences appliquées de Lyon, France, en 2007, intitulé « Modélisation du confort thermique » Moujalled B. a pu conclure que l'asymétrie de la température radiante d'une pièce doit être inférieure à 10 °C pour une paroi verticale (baie vitrée en hiver), et 5 °C pour un plafond chaud (plafond chauffant).

#### IV-10 3- L'effet du gradient thermique de l'air

Le gradient vertical de la température est aussi une source non négligeable d'inconfort. Si le gradient vertical est suffisamment élevé, une sensation de chaud au niveau de la tête apparaît, même si le corps maintient son équilibre thermique. En général, l'effet du gradient thermique vertical de l'air attaque directement le corps d'un individu assis. La norme admet une différence de température d'air maximum de 3 °C entre 0,10 m du sol (niveau de la cheville), et 1,10 m du sol (niveau de la tête chez une personne assise) [Vogt J.J « Confort physiologique- Technique de l'Ingénieur » - B2180, 1995]

#### IV-10-4- L'effet de la température du sol

Nous constatons quotidiennement que la température au niveau du plancher trop élevé ou trop bas a un impact directement au niveau de nos pieds, donc entraîne un inconfort. Selon Olsen BW [Cité par Mr MAZARI Mohamed, dans son Mémoire de Magister en Architecture, intitulé « Étude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractères publics : Cas du département d'Architecture de Tamda (Tizi-Ouzou) », année 2012, page 18], les températures optimales de sol pour les personnes à chaussures et à la neutralité thermique sont de 23 °C pour les personnes debout et de 25 °C pour les personnes assises, avec un minimum de 6 °C d'insatisfaits.

Vogt JJ annonce aussi que d'autres éléments ont des influences sur le confort thermique lié à l'effet de la température du sol, comme : l'âge, le sexe, la nourriture, la localisation géographique, la couleur des murs, le bruit, la lumière.

#### IV-10-5- Les critères nécessaires pour éviter l'inconfort dans un local

Pour éviter la sensation d'inconfort, la norme NBN X 10-005/ISO 7730 propose les critères à respecter suivants :

- L'asymétrie de température de rayonnement de fenêtres (ou d'autres surfaces verticales) doit être inférieure à 10 °C (mesure à 0,6 m du sol). Cette mesure consiste donc à comparer comment la chaleur est échangée par rayonnement de chaque côté du corps vers l'environnement. Si le déséquilibre

dépasse 10 °C entre la T°moyenne des parois vers la fenêtre et la T°moyenne des parois vers le fond du local, la personne est en état d'inconfort ;

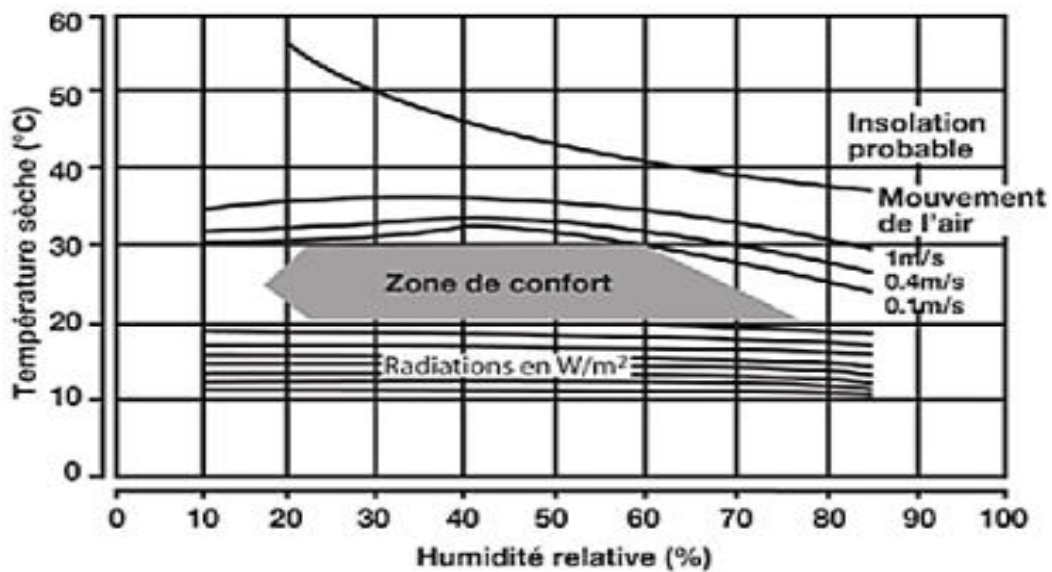
- L'asymétrie de température de rayonnement d'un plafond tiède (chauffé) doit être inférieure à 5 °C (mesure à 0,6 m du sol). Au-delà de cette valeur, davantage de personnes sont insatisfaites par l'excédent de chaleur autour de leur tête.
  - La température de surface du sol doit normalement être comprise entre 19 et 26 °C, mais les systèmes de chauffage par le sol peuvent être conçus pour 29 °C par période de grand froid ;
  - La stratification verticale des températures doit être limitée à 3 °C entre 0,1 et 1,1 m au-dessus du sol.
- L'étude de l'orientation optimale du bâtiment avant leur édification peut aider ainsi la propriétaire à éviter/diminuer les différents inconforts cités ultérieurement.

#### IV-11- LES DIFFÉRENTS MODÈLES DE CONFORT THERMIQUE

Les Modèles de confort thermique sont des outils d'analyse permettant de mieux définir les stratégies à adopter dans la conception d'un bâtiment, en fonction du climat local et du confort hygrothermique de ses occupants. Il existe plusieurs types de modèles de confort thermique, mais les plus utilisés dans le domaine du bâtiment sont développés à la suite de la présente sous-partie.

##### IV-11-1- Le modèle de Olgyay

Dans les années 1950, l'architecte hongrois Victor Olgyay a constaté l'influence des conditions climatiques extérieures sur le confort d'un bâtiment. Il développa ainsi un outil d'aide à la décision appelée diagramme bioclimatique, illustré par le diagramme du graphe 17 ci-dessous. Olgyay met en relation dans ce graphique les températures (axe des ordonnées) et taux d'humidité relative (abscisses). Une zone de confort correspondant à des températures extérieures variant de 20 à 30 °C et à des taux d'humidité extérieure situés entre 18 % et 75 % figure au centre. Cela permet ainsi d'analyser graphiquement les conditions climatiques locales et de définir en conséquence la stratégie à privilégier dans la conception du bâtiment. La notion de confort reste cependant subjective et dépend non seulement des paramètres climatiques, mais également des facteurs physiologiques et psychologiques.

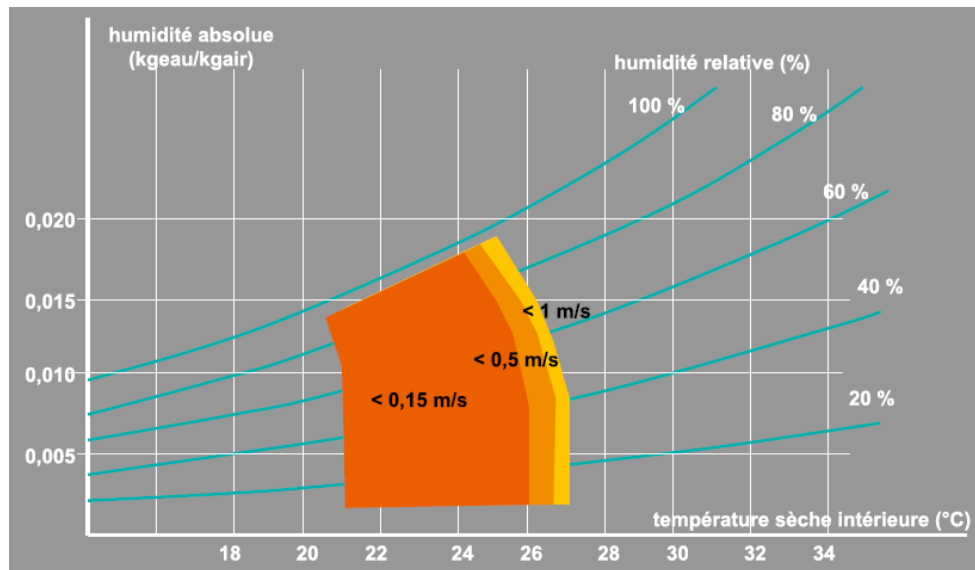


Graph 17: Diagramme de Olgay

La zone de confort peut ainsi se définir comme un ensemble de conditions climatiques intérieures dans lequel une majorité de personnes sent un confort thermique. D'autre part, en ne prenant en compte que des facteurs climatiques extérieurs, cet outil néglige certains paramètres physiologiques des espaces intérieurs et trouve donc essentiellement son application dans les climats chauds et humides, où les études montrent des variations climatiques plus modérées entre intérieur et extérieur

#### IV-11-2- Le modèle de Fanger

Ce modèle traduit l'équation de l'équilibre thermique du corps humain. Pour cela, Fanger combine les paramètres d'ambiance (température de l'air, température de parois, humidité de l'air, vitesse de l'air) aux paramètres de comportement (habillement et l'activité de l'individu) pour déterminer l'indicateur de confort représentant l'avis moyen d'un groupe de personnes suivant leur sensation de confort thermique. Cet indicateur est le PMV (Predicted Mean Vote), se mesure sur une échelle de sensation thermique à 7 niveaux, comme nous avons aperçu dans le sous-paragraphe IV-9-2 du présent chapitre, relatif à [l'évaluation de la sensation par rapport à la température d'ambiance optimale](#), précédemment. Ce modèle a été créé en confrontant les équations physiques avec des expériences réalisées en chambre climatique, et a été validé à la fin des années 1970 par une enquête statistique sur 500 individus placés dans des conditions thermiques prédéfinies. Ce modèle permet ainsi de mesurer la sensibilité des différents paramètres comportementaux et d'ambiance d'un individu dans un local. Les Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5 de ce modèle sont illustrées dans le paragraphe 18 ci- dessous.



Graph 18: Plages de sensibilité à la vitesse d'air correspondant à un PMV compris entre -0,5 et +0,5

La plage de confort optimale pour ce modèle est comprise entre 21 °C à 26 °C, c'est-à-dire dans des conditions classiques de travail de bureau. Le modèle est très sensible à l'habillement (4 °C de différence entre une tenue d'hiver et une tenue d'été), à l'activité (6 °C et plus entre une activité sédentaire et une marche sportive) et à l'humidité : Une baisse d'environ 2 °C de la zone de confort pour une humidité relative passant de 40 % à près de 100 %. Par contre, une vitesse de l'air passant de 0 m/s à 1 m/s n'autorisera qu'une augmentation de 1 °C de la plage de confort. Le modèle de Fanger a été la base de conception de la norme NF EN ISO 7730 qui est en vigueur jusqu'à ce jour [Confort d'été passif (Les Guide Bio-Tech), page 11]. Cette norme reprend les équations de Fanger définies dans la relation 75, pour le calcul du PMV et fixe les 3 classes de confort A, B et C<sup>71</sup>. Elle fait apparaître ainsi les notions :

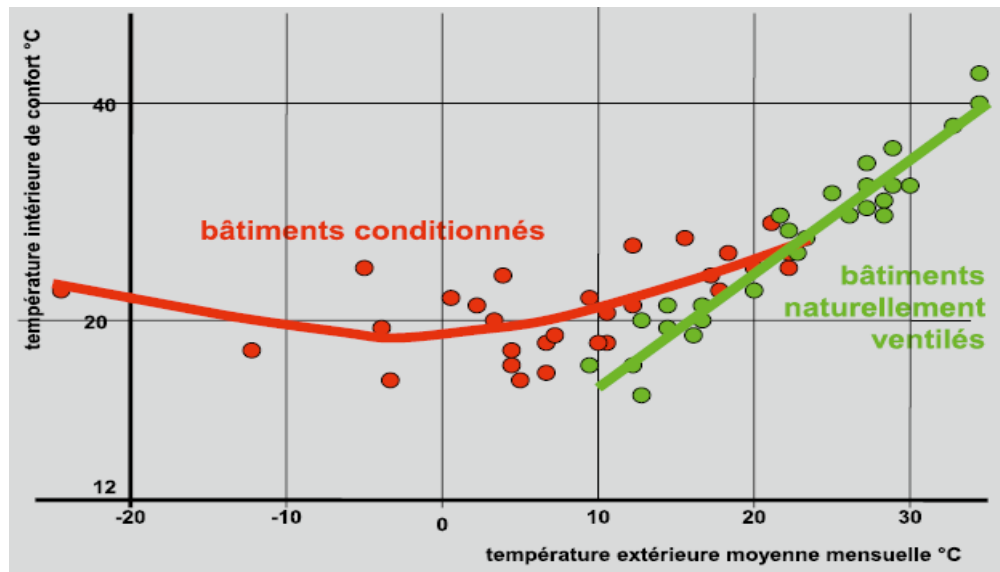
- ✓ De PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), pourcentage prévu de personnes en situation d'inconfort, pour lequel Fanger avait défini une corrélation avec le PMV ; et
- ✓ Les indicateurs d'inconforts locaux, basés sur les turbulences ( $D_R$ ) ou les différences locales de température (PA) définies par la relation 82 ci-haut.

#### IV-11-3- Le modèle de confort adaptatif de l'ASHRAE

Au début des années 2000, des travaux de l'ASHRAE montrent que le modèle de Fanger est valable, en été, pour les bâtiments climatisés, mais pas du tout dans les bâtiments ventilés naturellement. Dans ce cas-là, en France, le laboratoire PHASE de l'Université Paul Sabatier à Toulouse rejoint ces travaux et montre que la perception du confort thermique découle aussi d'une appréciation affective d'un ressenti, et pas seulement d'un déterminisme entre confort et conditions comportementales et d'ambiance. Cette approche, dite du « confort adaptatif », démontre que la sensation de confort dépend aussi de l'adaptation

<sup>71</sup>La classe A (PMV compris entre -0,5 et +0,5) est la plus souvent retenue.

d'un individu à son environnement. La corrélation entre la température de confort et celle de la température extérieure est illustrée par le graphe 19 ci- dessous.

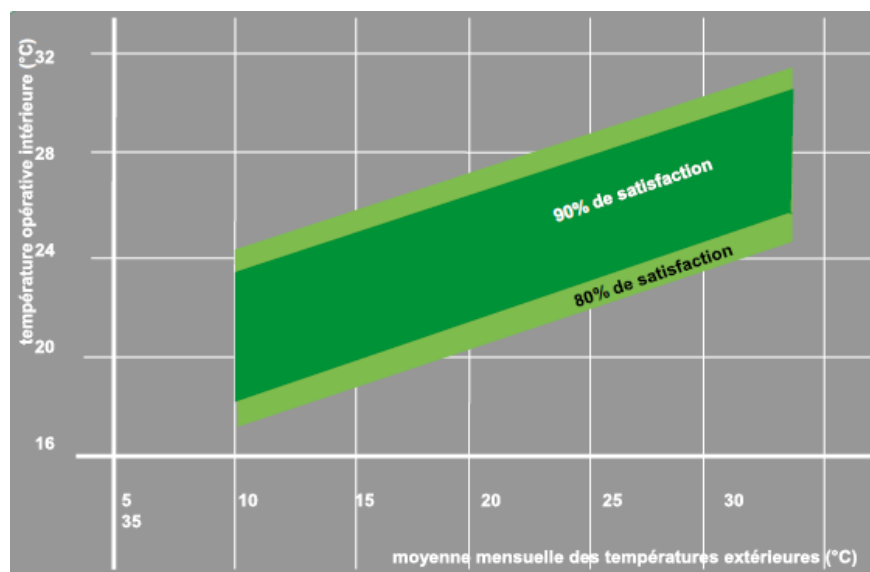


Graphe 19: Corrélation entre la température de confort et la température extérieure

Ces travaux ont montré que, dans les bâtiments ventilés naturellement, quand la température extérieure est plus élevée en été, elle prédispose les individus à une faculté d'adaptation accrue.

#### IV-11-4- Le Modèle du standard ASHRAE 552 004

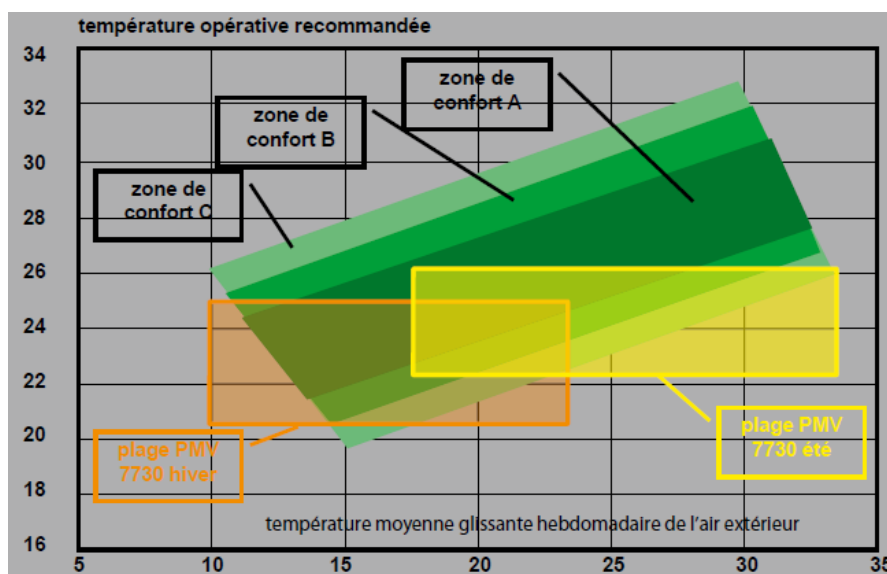
Le modèle adaptatif est la base/source de l'évolution de divers standards internationaux : comme le « standard de l'ASHRAE 552 004 » (illustré par le graphe 20 ci-après), proposé par ASHRAE en 2004 pour apporter une nouvelle amélioration de la zone de « confort adaptatif » sus- énoncée, en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle.



Graphe 20: Modèle ASHRAE 552 004

#### IV-11-5- Le Modèle de la norme EN 15 251 de 2007

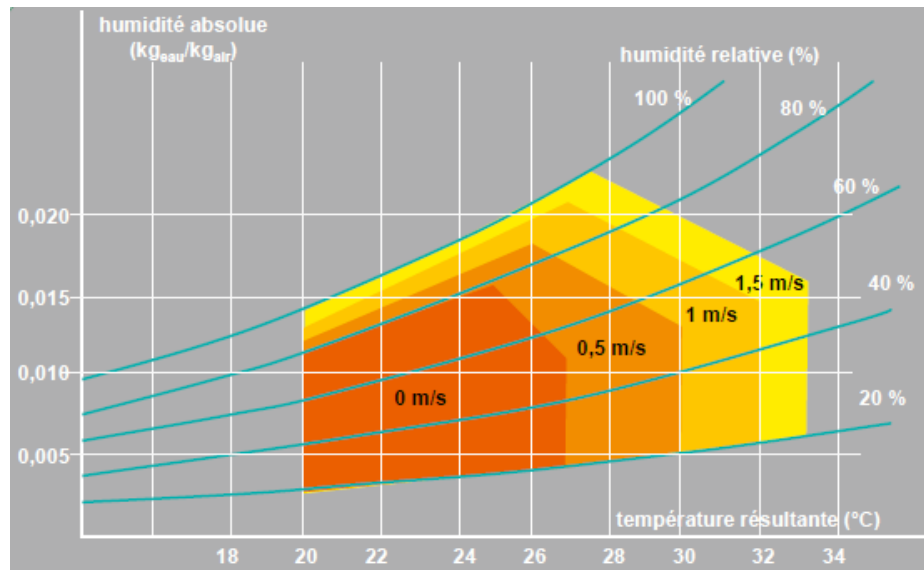
Ce modèle est applicable aux bâtiments naturellement ventilés, il fait évoluer la norme NF EN ISO 7730 et le strict calcul, selon Fanger, du PMV développé dans le sous-paragraphe [IV-9-2](#) du présent chapitre. La plage centrale (zone de confort A) correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5. Une telle approche du confort adaptatif, appliquée à la semaine caniculaire d'août 2003, aurait donné comme plage optimum de confort (plage A) la plage [25 – 31 °C]. Alors qu'une stricte application de la norme NF EN ISO 7730 limite cette plage A à [22- 26 °C].



Graphe 21: Modélisation suivant la norme EN 15 251 de 2007

#### IV-11-6- Le modèle de Givoni

Établi par Burach Givoni à peu près à la même époque que le modèle de Fanger, ce modèle d'évaluation de confort thermique intègre l'évapotranspiration. Issu de ce modèle, le diagramme de Givoni, établi pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été, définit, sur le diagramme de l'air humide, des zones de confort correspondant à différentes plages de vitesse d'air (jusqu'à 1,5 m/s, vitesse au-delà de laquelle un risque de nuisance existe). Largement utilisé en Amérique du Sud et dans les DOM TOM, il a fait l'objet d'études récentes menées par le laboratoire PIMENT de l'Université de la Réunion et revalidées par une série d'enquêtes sur un bâtiment non climatisé (IUP de Saint-Pierre). Dans ce diagramme (illustré par le graphe 22 ci-dessous) :



Graph 22: Le diagramme du Givoni

- La plage 0 m/s correspond aux modèles de confort classiques (valables jusqu'à 0,20 m/s) ;

- La plage 0,5 m/s peut être atteinte avec des dispositions de ventilation naturelle ;

Les vitesses supérieures ne peuvent être atteintes que grâce à des dispositifs mécaniques (brasseurs d'air).

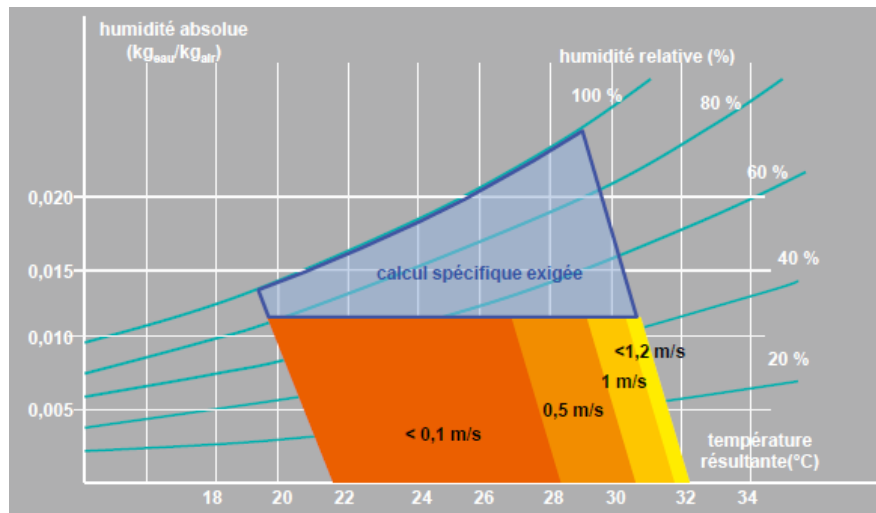
L'utilisation de cet outil est basée sur deux relevés, à savoir :

- La moyenne des températures maximales journalières (abscisse) rapportée à celle des taux d'humidité absolue minimums journaliers (ordonnée), et, inversement ;
- La moyenne des températures minimales journalières rapportée à celle des taux d'humidité absolue maximums.

En reliant ainsi les deux points obtenus, on obtient un tracé qui en fonction de son positionnement par rapport aux zones précitées, permet de définir des objectifs stratégiques sur le mois étudié.

#### IV-11-7- Le modèle du standard ASHRAE 552 009

Les règles ASHRAE de 2004 ont récemment évolué, en 2009, en intégrant la prise en compte de la vitesse d'air dans la détermination du confort thermique pour les bâtiments non climatisés. Elles reprennent et confinent sensiblement les plages de confort de Givoni pour les humidités relatives faibles et modérées.



Graphique 23: Modèle du Standard ASHRAE 552 009

## ANALYSE ET CONCLUSION

Parmi les modèles sous- développés, on remarque que :

☞ Pour déterminer les zones de confort, ils exploitent soit :

- ▶ La température sèche en fonction de l'humidité relative : Modèle de Olgay ;
- ▶ Humidité absolue en fonction de la température sèche : Model de Fanger ;
- ▶ La température intérieure en fonction de la température extérieure : Model du confort adaptif, modèle standard d'ASHRAE 552 004, modèle de la norme EN 15 251 ;
- ▶ Humidité absolue en fonction de la température résultante : modèle de Givoni et celui du modèle standard d'ASHRAE 552 009 ;

☞ Seuls le modèle confort adaptif d'ASHRAE ainsi que le modèle de confort de Givoni permettaient d'étudier le confort thermique d'un bâtiment naturellement ventilé. C'est pourquoi on a décidé de profiter à exploiter ces deux types de modèles pour étudier le confort thermique du bâtiment objet de l'étude de l'orientation optimale de la présente thèse.

## V - LE CONFORT THERMIQUE ET L'APPROCHE BIOCLIMATIQUE

Un bâtiment est conçu pour jouer un rôle de filtre thermique, permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. Pour cela, plusieurs variables attachées directement à l'architecture du bâtiment sont nécessaires. Ces paramètres sont liés aux facteurs climatiques d'un bâtiment, plus précisément acquérir le lien fondamental entre l'environnement du bâti et celui de l'environnement naturel [André Potvin, March PhD et Claude MH Demers dans leur publication intitulée « L'approche bioclimatique en architecture » ]: c'est l'approche bioclimatique<sup>72</sup>.

<sup>72</sup>L'appellation bioclimatique désigne un concept architectural qui utilise judicieusement les ressources de l'environnement proche

## V-1- SIGNIFICATION DE LA « BIOCLIMATIQUE » ET SON ORIGINE

Construire en bioclimatique veut dire construire en prenant en compte les interactions entre le climat et l'écosystème. Plus simplement, on construit en s'adaptant au mieux à l'élément architectural et au site de construction du bâtiment. Cette adaptation a deux buts principaux :

- Premièrement, se protéger des aléas du climat (froid/chaud, vent, pluie, etc.) ; puis
- Profiter des bienfaits du climat (lumière, chaleur ou fraîcheur naturelles selon la saison, brise douce, etc.).

Dès les premières habitations aménagées par des êtres humains, ces impératifs sont déjà imposés. La possibilité de profiter des bienfaits de la nature et du climat est du ressort du confort, et est donc une préoccupation beaucoup plus récente. Ce besoin de confort est cependant imposé dès la révolution industrielle dans les pays sur la voie d'industrialisation, et a conduit à une augmentation sans cesse croissante de la consommation en énergie pour obtenir ce confort, à mesure d'une part que la classe moyenne croisse en nombre, et d'autre part que la surface occupée par habitant ait augmenté.

La définition moderne du terme « bioclimatique » apparaît après le choc pétrolier des années 1970, dès lors que le prix de l'énergie force les gens à tenter d'obtenir leur confort en gaspillant moins.

En matière d'habitat, le confort est une double exigence : avoir chaud l'hiver, mais n'avoir pas chaud l'été. Pour ce faire, il n'y a enfin de compte que deux axes de travail : mieux capter/se protéger de l'énergie solaire, et mieux conserver la chaleur/fraîcheur. Les maisons bioclimatiques résultent donc des premiers prototypes de maisons « solaires » bâties à partir des années 1960, et qui misaient essentiellement sur « mieux capter/se protéger de l'énergie solaire ».

Enfin, une maison bioclimatique se doit également de prendre en compte deux autres aspects qui ne sont pas directement liés au confort : la qualité sanitaire du lieu de vie créé, et l'impact écologique global de la construction. Ces deux points tendent de plus en plus à être associés à la démarche bioclimatique, ce qui devrait conduire à terme le bio- climatisme à construire des maisons réellement écologiques sur toute la ligne.

## V-2- OBJECTIF DE L'APPROCHE BIOCLIMATIQUE

Le bio- climatisme consiste à trouver le point d'équilibre entre la construction, le comportement de l'occupant et le contexte géographique, pour réduire au maximum l'emploi de ressources énergétiques, et de se protéger aux aléas climatiques, car c'est historiquement la première fonction d'un habitat. Ainsi, l'approche bioclimatique vise à obtenir un confort d'ambiance optimal pour les usagers en tirant profit des caractéristiques et particularités du lieu d'implantation tout en limitant les besoins énergétiques extérieurs au site. L'objectif principal de cette approche est donc de concevoir le bâtiment de manière « naturelle », c'est-à-dire en s'inscrivant pleinement dans leur environnement d'assurer un meilleur confort et de parvenir

à une réduction significative de la consommation énergétique. Pour répondre à cet objectif, les principes du bio- climatisme s'appuient sur une adéquation entre :

- ▶ La conception et la construction de l'enveloppe habitée ;
- ▶ Le climat et l'environnement dans lequel l'habitat s'implante ;
- ▶ Les modes et rythmes de vie des habitants ;

### V-3- CONCEPTION BIOCLIMATIQUE

Il s'agit d'un procédé de conception visant à limiter les besoins énergétiques du bâtiment tout en favorisant les conditions de confort, aux moyens de solutions organisationnelles, constructives ou techniques passives. La conception bioclimatique met à profit les conditions climatiques favorables, comme la ventilation naturelle, des protections solaires fixes, du déphasage de température, ou de l'orientation des espaces, etc., tout en se protégeant de celles qui sont indésirables, ceci afin d'obtenir le meilleur confort thermique. Elle utilise l'énergie solaire disponible sous forme de lumière ou de chaleur, afin de consommer le moins d'énergie possible pour un confort équivalent. Le processus de conception bioclimatique, consiste donc à la recherche d'une méthode de création qui intègre tous les éléments importants de l'environnement, du site et du climat [David Wright], résumé dans le tableau 43 ci-après :

Tableau 43 : Les éléments importants de la conception bioclimatique

| Environnement                                                                                                                                                                                                                  | Climat                                                                                                                                                                                                              | Autres                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Type de la Région ;</li> <li>- Nature du sol ;</li> <li>- Végétation ;</li> <li>- Profil du terrain ;</li> <li>- Altitude et latitude ;</li> <li>- Vue ;</li> <li>- Bruit.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensoleillement ;</li> <li>- Température ;</li> <li>- Type de temps ;</li> <li>- Luminosité ;</li> <li>- Précipitations ;</li> <li>- Humidité ;</li> <li>- Vent.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le contexte urbain ;</li> <li>- Législation ;</li> <li>- Matériaux locaux ;</li> <li>- Eau, gaz, électricité ;</li> <li>- Alimentation en eau.</li> </ul> |

### V-4- ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

L'architecture bioclimatique est une discipline de l'architecture qui recherche un équilibre entre la conception et la construction de l'habitat, son milieu (climat, environnement, etc.) et les modes ainsi que les rythmes de vie des habitants.

L'architecture bioclimatique permet de réduire les besoins énergétiques, de maintenir des températures agréables notamment en été, de contrôler l'humidité et de favoriser l'éclairage naturel. On l'appelle également « architecture climatique » ou « architecture naturelle ». Un bâtiment bioclimatique doit donc tenir compte des paramètres du relief du terrain sur lequel il est bâti, de la végétation qui l'entoure, de la

course du soleil tout au long de la journée, ainsi les éléments architecturaux comme les murs, les pièces, les ouvertures, les vitrages, etc.

En période froide, une architecture bioclimatique favorise les apports de chaleur gratuits, diminue les pertes de chaleur et assure un renouvellement d'air suffisant. En période chaude, elle réduit les apports caloriques et favorise le rafraîchissement.

À part le confort d'été et d'hiver, l'architecture bioclimatique s'appuie particulièrement aussi sur les différents apports thermiques, développés dans le sous-paragraphe IV-7-3, relatifs aux [gains thermique](#), du présent chapitre ainsi que les principaux paramètres de base de l'architecture bioclimatique que nous aurons à approfondir dans la suite de cette section.

## V-5- LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE BASE DU BIOCLIMATIQUE

### V-5-1- Le site

Le site d'implantation d'un bâtiment influe directement sur le degré de confort des occupants dû à l'incidence du soleil. Le bon choix du site d'implantation du bâtiment recherche à bénéficier au maximum :

- La protection naturelle au vent et au soleil estival par la topographie du terrain naturel et la végétation existante ;
- L'ensoleillement hivernal en évitant les masques portés par la végétation, le relief et l'environnement bâti.

La localisation du bâtiment dans son site est aussi un préalable de l'intégration de la composante énergétique dans la maîtrise des qualités et ambiances architecturales. Par conséquent, la sélection du site doit tenir compte de :

- L'occupation des sols ;
- L'influence du climat local ;
- L'exposition du bâtiment aux vents, à l'humidité et aux radiations solaires ;
- L'environnement immédiat (topographie, végétation, proximité, etc.) ;
- L'utilisation faite du territoire autour du site (urbanisation par exemple).

La présence d'infrastructures urbaines permet, en effet, d'obtenir une protection plus élevée contre les radiations solaires (effet masque), et rendra également les stratégies passives d'éclairage. Lorsque cela est possible par exemple, la végétation est une bonne alternative, agissant non seulement en absorbant la chaleur, mais également en offrant une barrière naturelle aux vents, et ce, sans forcément bloquer la circulation de l'air, comme montre l'illustration de la figure 56 ci-dessous.

Ce processus permet de profiter une meilleure protection contre l'ensoleillement et les radiations solaires, mais ne doit pas faire obstruction à la circulation de l'air au niveau des parois. Une végétation haute avec des troncs fins remplit ces deux objectifs à la fois.

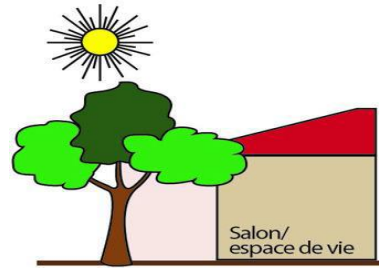
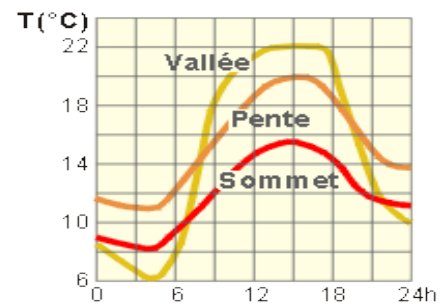


Figure 56 : la végétation est une bonne alternative pour le confort d'un bâtiment

### V-5-2- La topographie du site

La topographie du site destiné pour la construction d'un bâtiment, et plus particulièrement l'altitude par rapport au niveau de la mer, a une conséquence importante sur les températures locales, la pression atmosphérique ou encore l'humidité absolue de l'air. Le graphe 24 ci- contre montre l'évolution typique des températures extérieures sur 24 heures selon le type des reliefs. On constate que les vallées sont en général plus chaudes le jour que les sommets.



Graphe 24: Évolution de la température d'un site en fonction du type des reliefs

Par contre, la nuit, le soleil n'entrant plus en ligne de compte, l'air se refroidit et s'accumule au fond des vallées et forme de petites dépressions.

Il se crée ainsi une différence de température au profit des pentes directement en contact avec ce qu'on appelle la ceinture chaude. En effet, dans les longues vallées, le phénomène tend à créer un mouvement d'air longitudinal d'autant plus puissant quand la vallée est longue et que le gradient de température est élevé. Sur les versants des collines, le soleil favorise un gradient de température. La nuit, le gradient s'estompe et puis s'inverse légèrement, de telle sorte que l'air circule dans le sens opposé. Chaque élévation du terrain de 100 mètres, par rapport au niveau de la mer, s'accompagne en moyenne d'un décroissement proportionnel des températures de 1 °C [BBC (British Broadcasting Corporation)]. Pour les nuits plus fraîches en altitude, un refroidissement du sol amène une apparition d'une couche d'air froid au ras de la surface. Celle-ci redescend en aval et est collectée au pied des vallées ou des montagnes.

### V-5-3- L'urbanisation

Les températures locales sont également variées en fonction de l'environnement immédiat du site et notamment de la densité urbaine. Cette concentration crée des îlots de chaleur urbains plus ou moins élevés selon la morphologie du territoire et les matériaux utilisés. La principale cause de cette variation est l'effet des activités humaines plus concentrées et productrices de chaleur, par exemple industries et

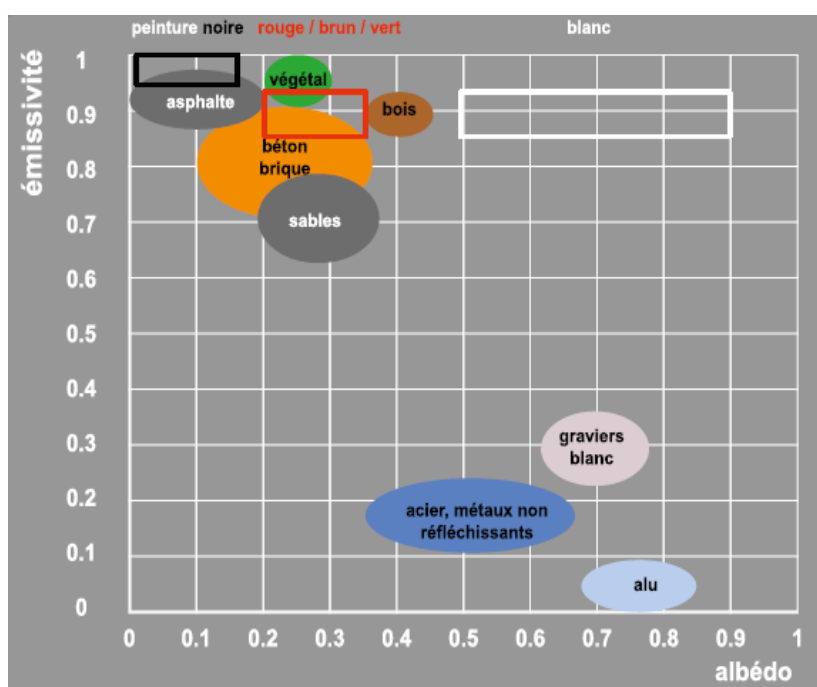
transports, une plus grande absorption des radiations solaires ou effet albédo, par exemple, lié aux revêtements des voies en goudron noir et des blocages à la circulation de l'air et aux vents.

Le dôme de pollution recouvrant les villes limite également les radiations nocturnes, puisque la pollution ralentit le réchauffement matinal de l'air, et l'accumulation de celle-ci freine la chute de température en début de soirée. Les sites dégagés sont fortement balayés par les vents et largement ouverts vers la voute céleste. Il y fait donc plus froid qu'ailleurs. En effet, la température des villes étant supérieure à celle des campagnes, puisqu'on y constate un mouvement d'air similaire à celui créé par les masses d'eau. L'appel d'air se dirige donc vers les villes. De même, en ville, les grands espaces dégagés donnent naissance à des courants d'air.

#### V-5-4- La couleur des revêtements proches

Le graphe 25 ci-contre donne l'émissivité (en  $W/m^2$ ) de quelques matériaux en fonction de leur température d'albédo respective.

La partie du rayonnement solaire frappant un revêtement urbain est réfléchi selon l'albédo du matériau (les forts albédos réfléchissent plus). La partie du rayonnement non réfléchi est absorbée par le revêtement (s'il est opaque) et réémise en infrarouge, avec un déphasage, selon l'émissivité du matériau. L'effet d'îlot de chaleur urbain est réduit par des revêtements d'albédo élevé et d'émissivité faible.



Graphe 25: Albédo et émissivité des matériaux

#### V-5-3- La nature du sol d'assise

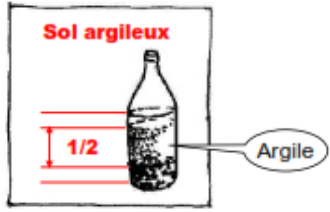
La composition, la nature ainsi que les propriétés des sols plus ou moins réfléchives auront également une influence, notamment via l'interaction entre température du sol et température de l'air. Si le sol de fondation n'est pas du roc ou du gravier<sup>73</sup>, il existe une méthode simple pouvant être utilisée pour la détermination

<sup>73</sup> Sol dur

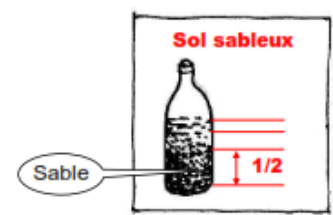
de la nature des sols d'assise de la fondation d'un bâtiment, suivant les deux catégories de sols les plus habituels, à savoir : argileux ou sableux.

Le tableau 44 ci-après explicite succinctement le processus de cette méthode :

Tableau 44 : Méthode simple pour déterminer les types des sols de la fondation d'un bâtiment

| Processus                                                                                                                              | Illustration                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Creuser d'abord un trou de 1,00 m de profondeur et prendre en un échantillon de sol d'assise destiné pour la fondation.                |    |
| Ensuite, remplir le tiers d'une bouteille transparente avec le sol prélevé. Puis ajouter un autre tiers d'eau et une cuillerée de sel. |    |
| Agiter fortement cette bouteille jusqu'à ce que le mélange soit uniforme.                                                              |   |
| Après cela, laisser le mélange se décanter pendant 24 heures.                                                                          |  |
| Mesurer respectivement la hauteur du sable, de l'argile et du limon bien séparés à l'intérieur de la bouteille.                        |  |
| Interprétation du résultat                                                                                                             |                                                                                       |
| Si plus de la moitié est de l'argile, le sol est dans ce cas-là argileux.                                                              |  |

Si plus de la moitié est du sable, le sol est ainsi sableux.



Les pouvoirs calorifiques de ces types de sous-sols sont ainsi les suivants :

- ▶ Sol sablonneux sec : 10 à 15 W/m<sup>2</sup> ;
- ▶ Sol argileux sec : 20 à 25 W/m<sup>2</sup> ;
- ▶ Sol argileux humide : 25 à 30 W/m<sup>2</sup> ;
- ▶ Sol marécageux : 30 à 35 W/m<sup>2</sup>.

#### V-5-5- Les paramètres climatiques

Il n'y a pas de conception dite bioclimatique sans une connaissance rigoureuse des données climatiques locales du projet considéré. Le degré de caractérisation locale d'un climat peut varier en subtilité, selon le zonage climatique et le nombre de stations de mesure disponibles dans un pays.

Les cinq paramètres climatiques qui font l'objet d'une attention particulière pour un bâtiment à architecture bioclimatique sont :

- ▶ Les températures extérieures ;
- ▶ L'humidité ;
- ▶ L'ensoleillement ;
- ▶ Le rayonnement solaire ; et
- ▶ Les vents.

Ces paramètres sont influencés par un ensemble de variables comme la topographie ou les activités urbaines, ces paramètres peuvent néanmoins varier à une échelle très réduite, parfois inférieure à une centaine de mètres (microclimats).

#### a- LES TEMPÉRATURES EXTERNES

Les variations de température externe sont plus importantes dans l'approche bioclimatique d'un bâti, afin d'adapter l'inertie thermique aux conditions locales. En effet, les données sur les températures, telles que les valeurs maximales, minimales ou encore les moyennes sur une période définie (jour, mois, année) de la région d'étude sont nécessaires dans la simulation énergétique du bâtiment, qu'on réalisera dans la partie suivante de la présente thèse.

Le Traité d'Architecture bioclimatique [LAYAL CHAHWANE, dans sa thèse de Doctorat intitulé « Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments », 2001, page 13] propose la classification de climats selon quatre types en fonction de la température externe comme suit :

- ☞ Froid, pour des températures moyennes annuelles de moins de 10 °C ;
- ☞ Tempéré, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 10 °C et 20 °C ;
- ☞ Chaud, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 20 °C et 30 °C ;
- ☞ Très chaud, pour des températures moyennes annuelles supérieures à 30 °C.

Toutefois, au-delà de ces données, un certain nombre de paramètres, qui influent sur le niveau des températures à une échelle locale, seront aussi non négligeables.

## b- L'HUMIDITÉ RELATIVE

Le ratio d'humidité relative varie en fonction inverse des températures, avec un accroissement durant la nuit et un décroissement lorsque les températures augmentent en journée. Tout comme les températures, l'humidité relative est le résultat d'interactions complexes et dépend non seulement du climat, mais aussi :

- De l'environnement : la présence de végétation et de points d'eau (océans, mers, lacs, rivières) accroît l'humidité, respectivement au travers des processus d'évapotranspiration et d'évaporation.
- De la topographie : les températures moins élevées sur les versants ombragés des montagnes ou au bas d'une vallée conditionnent généralement une humidité relative plus élevée.

L'ouvrage cité précédemment [Traité d'Architecture Bioclimatique] a décelé deux catégories de type d'humidité comme suit :

- ☞ Sec, pour une humidité relative inférieure à 55 % ;
- ☞ Humide, pour une humidité relative supérieure à 55 %.

## c- L'ENSOLEILLEMENT

### c-1- Le mouvement terre- soleil

La course de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie, illustrée par la figure 56 ci-après. Dans cette ronde annuelle autour du Soleil, la Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures autour de l'axe des pôles. Cet axe nord- sud fait un angle de 23°27' avec la direction perpendiculaire sur le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil. Cette inclinaison est constante tout au long de la course autour du Soleil et est responsable des variations saisonnières, qui différencient le confort d'été et l'hiver d'un bâti. Dans ce cas-là, pendant l'hiver, en hémisphère nord, la durée d'insolation est relativement courte et le Soleil ne monte pas donc très haut dans le ciel. Tandis qu'en été, la situation est inversée, l'hémisphère nord est tourné vers le Soleil. Les jours sont alors plus longs que les nuits dans l'hémisphère nord et le rayonnement incident se rapproche de la verticale.

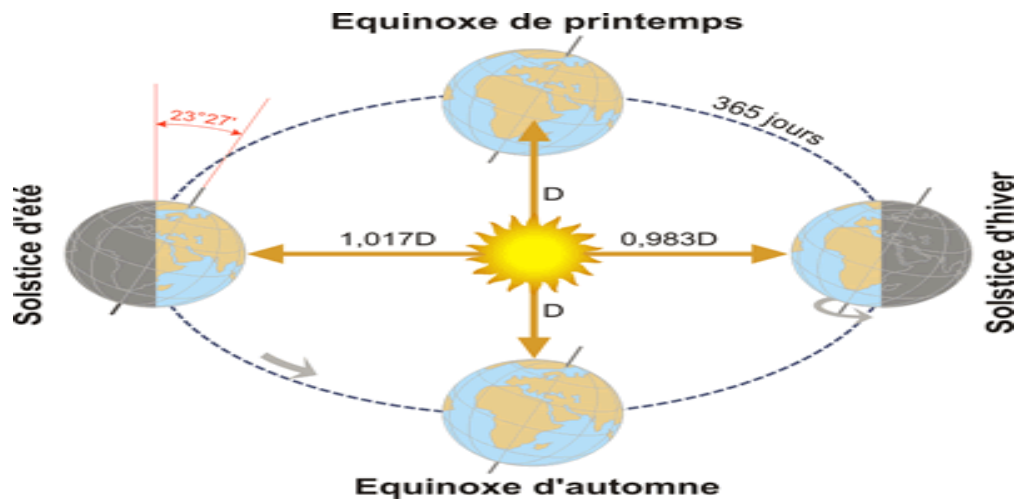


Figure 57 : Le mouvement terre soleil

Aux équinoxes de printemps et d'automne (21 mars, 21 septembre), à midi, le rayonnement est perpendiculaire à l'équateur (latitude  $0^\circ$ ) et partout sur le globe, les jours et les nuits sont de durée égale. C'est à ce moment que la hauteur du Soleil à midi est la plus facile à calculer. En effet, sa hauteur est égale à l'angle complémentaire de la latitude, telle que :  $H = 90^\circ - L$  [83], comme illustre la figure 58 ci-dessous :

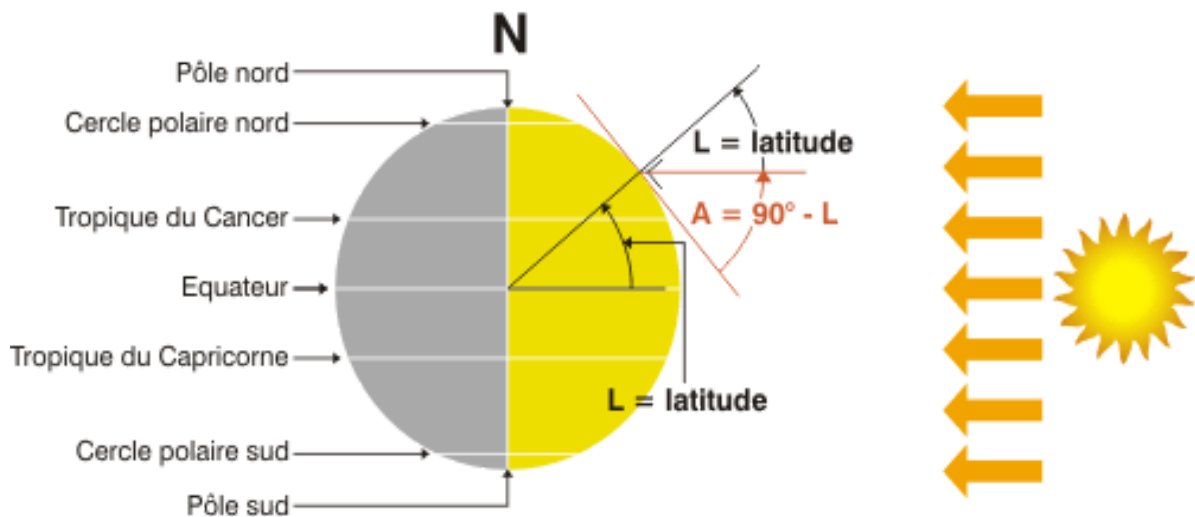


Figure 58 : Positionnement du soleil aux équinoxes de printemps et d'automne

Au solstice d'été (21 juin), la terre est inclinée vers les rayons solaires et, à midi, ceux-ci sont perpendiculaires au tropique du cancer (latitude  $23^\circ 27' N$ ), comme montre la figure 58 ci-dessous. Le Soleil ne se couche jamais dans les régions du globe situées à l'intérieur du cercle arctique (celui-ci se trouvant  $23^\circ 27'$  au-dessous du pôle Nord). Une personne vivant à la latitude de  $66^\circ 33' N$  ( $90^\circ - 23^\circ 27'$ ) veille donc jusqu'à minuit pour voir le Soleil. La hauteur du Soleil à midi (solaire) est de  $23^\circ 27'$  supérieure à celle de l'équinoxe, et la hauteur du soleil dans ce stade est :  $H = 90^\circ - L + 23^\circ 27'$  [84]

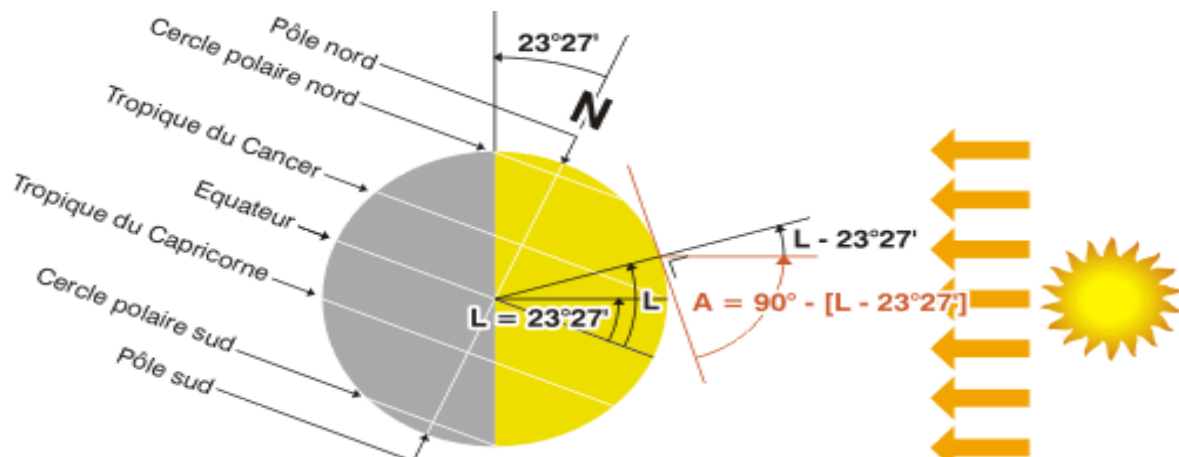


Figure 59 : Positionnement du soleil au solstice d'été

Enfin, au solstice d'hiver (22 décembre), l'angle d'inclinaison est inversé et c'est le tropique du capricorne (latitude  $23^\circ 27' S$ ) qui bénéficie d'un rayonnement perpendiculaire. La hauteur du Soleil à midi est de  $23^\circ 27'$  inférieure à celle de l'équinoxe. La hauteur du soleil est ainsi :  $H = 90^\circ - L - 23^\circ 27'$  [85]

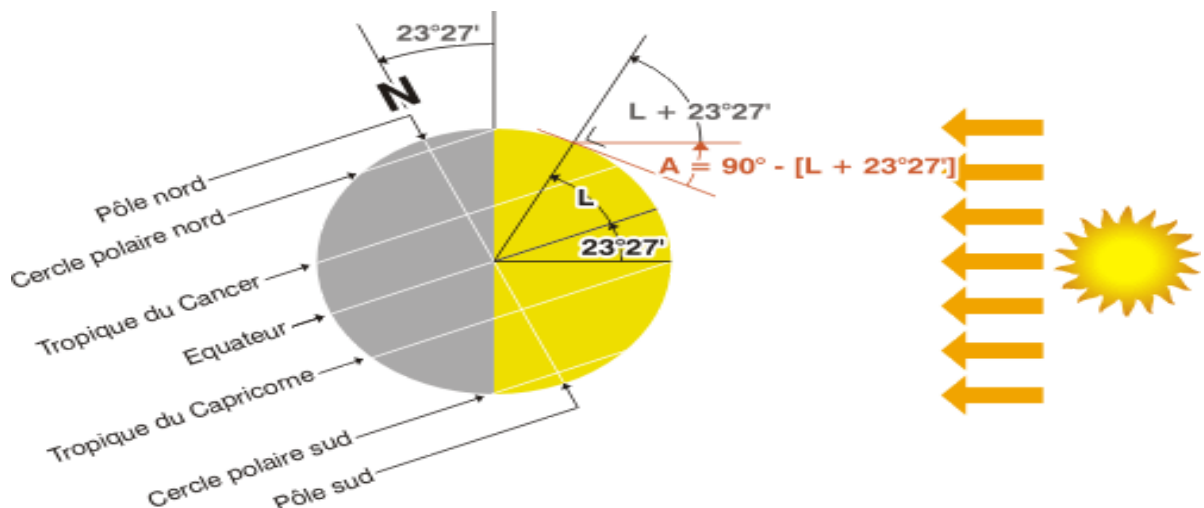


Figure 60: Positionnement du soleil au solstice d'hiver

Pour déterminer la trajectoire complète du soleil tout au long de l'année en fonction d'une position géographique spécifique, on peut utiliser les diagrammes solaires, dont la méthode de sa construction est donnée ci-dessous. Ce tracé permet de définir l'angle d'incidence du soleil par rapport aux différentes faces des parois et son exposition à la lumière naturelle et aux radiations.

## c-2- Construction d'un diagramme solaire

La voûte céleste est la partie visible du ciel dans toutes les directions au-dessus de l'horizon. Le quadrillage du diagramme solaire représente les angles horizontaux et verticaux des points de la voûte céleste, comme montre la figure 60 à gauche ci- dessous. Tout se passe comme si l'observateur repérait l'azimut et la hauteur du Soleil sur un hémisphère transparent au-dessus de lui et comme si, ensuite, il étirait cette portion de sphère en cylindre vertical, comme ce qui est montré par la figure 61 à droite ci-dessous.

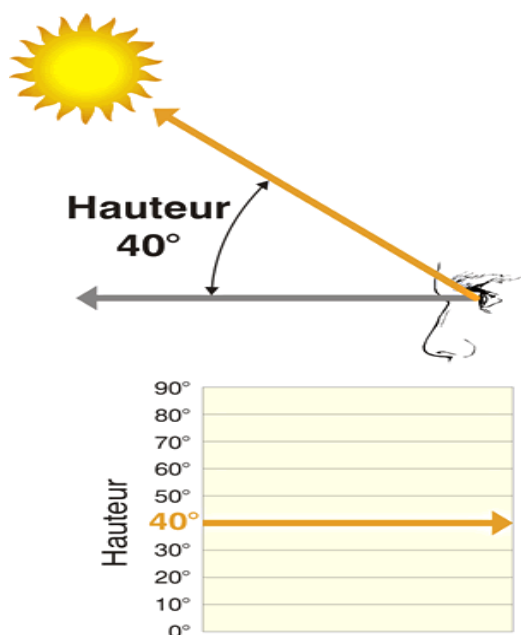


Figure 61 : Angle de la voûte céleste

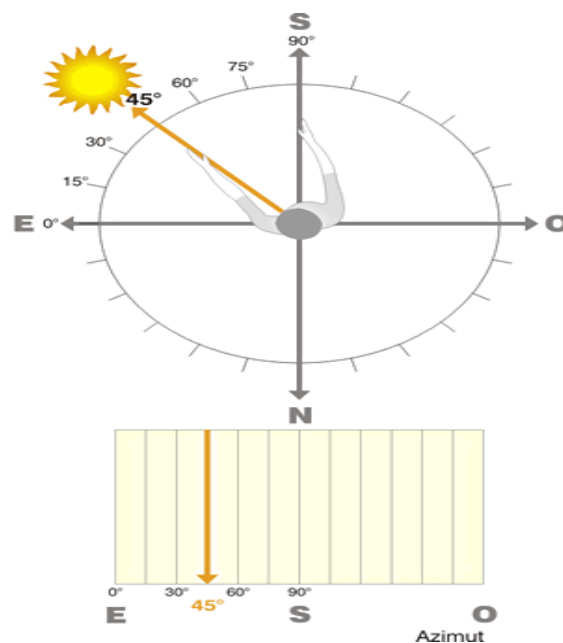


Figure 62 : l'observateur repère l'azimut et la hauteur du Soleil

Lorsque l'on connaît l'azimut et la hauteur solaire, il ne reste que de repérer la position du Soleil dans le ciel (figure 63 à gauche ci-dessous). En joignant les différentes localisations, du Soleil à divers moments de la journée, on obtient le tracé de la course du Soleil (figure 64 à droite ci-dessous).

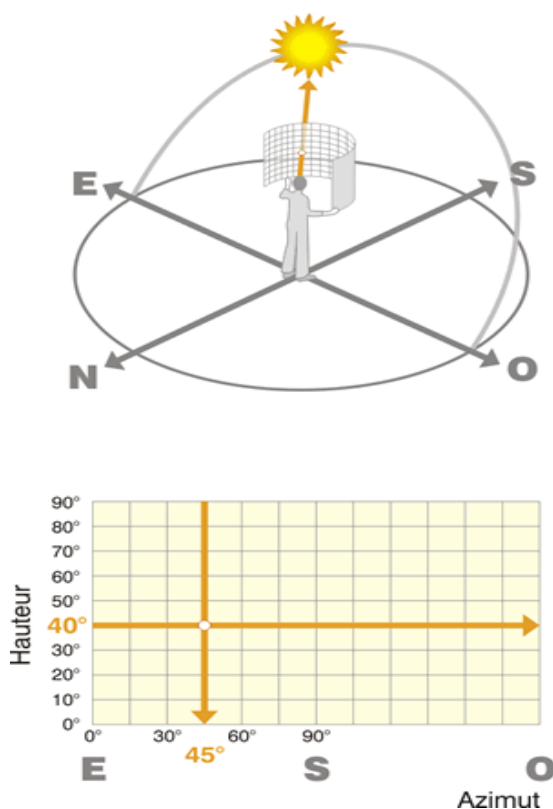


Figure 63 : Repérage de la position du soleil dans le sol

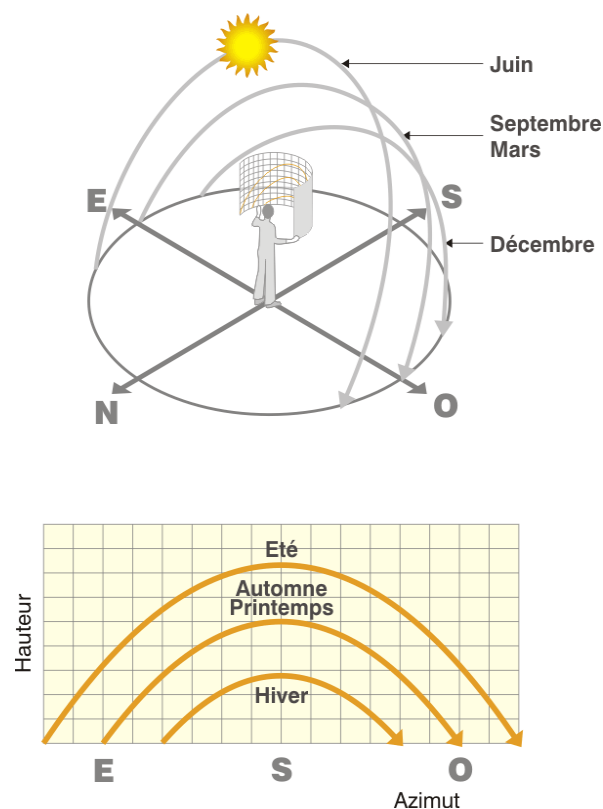


Figure 64 : tracé de la course du Soleil

On peut ainsi tracer la course du Soleil pour n'importe quel jour de l'année, comme montre la figure 64 ci-contre. Les trajectoires représentées sur les diagrammes solaires correspondent au vingtième jour de chaque mois (mais on peut avoir aussi un diagramme pour les 5, 15 et/ou 25ème jours de chaque mois). La journée solaire la plus longue est au solstice d'été, lorsque le Soleil atteint sa hauteur la plus élevée et balaie le secteur azimutal le plus large, de part et d'autre du sud.

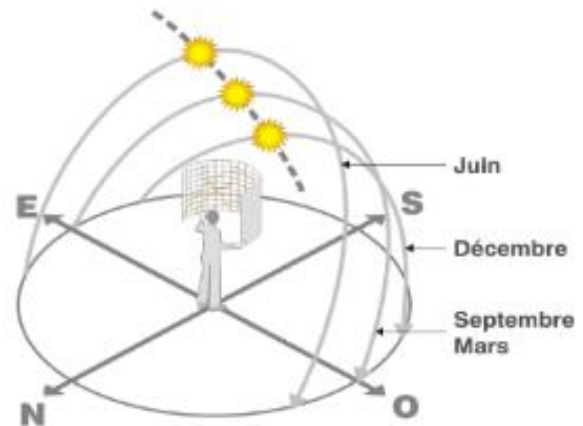


Figure 65 : Diagramme de la course du soleil

Au voisinage du solstice d'hiver, le Soleil est au contraire beaucoup plus bas dans le ciel : il reste visible moins longtemps et balaie le secteur azimutal le plus faible.

Pour terminer, si on relie entre eux les points qui correspondent aux mêmes heures sur les différentes courbes relatives à une même latitude et à différents moments de l'année, on obtient pour chaque heure du jour une ligne particulière en pointillé. Comme illustre la figure 66 ci-contre.

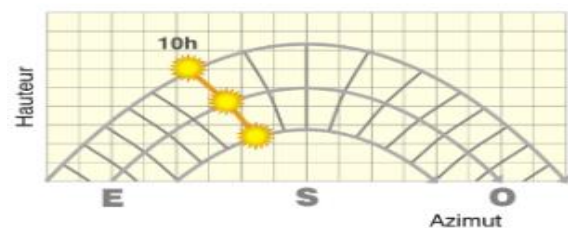


Figure 66 : Liaison de différentes courbes relatives à une même latitude dans les différents moments de l'année

D'une manière similaire, on pourra aisément représenter les masques solaires. Il suffira pour cela de repérer l'azimut et la hauteur de chacun des obstacles et de les reporter sur le diagramme.

### c-3- Le mouvement apparent du soleil

Pour bien comprendre et utiliser l'influence du Soleil dans le choix et le traitement d'un site, il faut bien sûr connaître à tout instant la position du Soleil dans le ciel. Cette information est indispensable pour le calcul des apports solaires, pour le choix de l'exposition d'un immeuble, l'implantation de systèmes actifs solaires (thermique ou photovoltaïque), l'aménagement des parties extérieures voisines, l'éclairage naturel des pièces intérieures, l'emplacement des fenêtres, des protections solaires et de la végétation, etc.

À un instant donné, la hauteur et l'azimut du Soleil, illustré par la figure 66 ci-contre, déterminent la position du Soleil dans le ciel. Et si on connaît la direction du rayonnement solaire, on peut calculer les surfaces ensoleillées du bâtiment. Ces calculs tiendront compte des effets d'ombrage dus au relief, au cadre bâti, à la végétation ou au bâtiment lui-même.

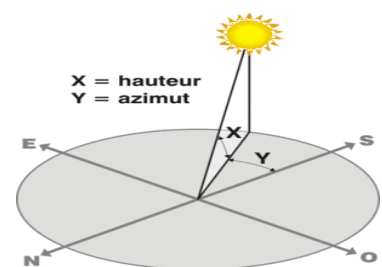


Figure 67 : Hauteur et l'azimut du Soleil

En un lieu, la hauteur " $\alpha$ " du Soleil est l'angle que fait la direction du Soleil avec le plan horizontal. Elle se compte de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  à partir de l'horizon vers la voûte céleste.

L'azimut " $\gamma$ " du Soleil est l'angle créé entre le plan vertical passant à la fois par le Soleil et par le lieu considéré, et le plan vertical N-S. Cet angle vaut  $0^\circ$  au sud et est conventionnellement positif vers l'ouest et négatif vers l'est. Ces coordonnées solaires sont illustrées dans les deux figures ci-dessous.

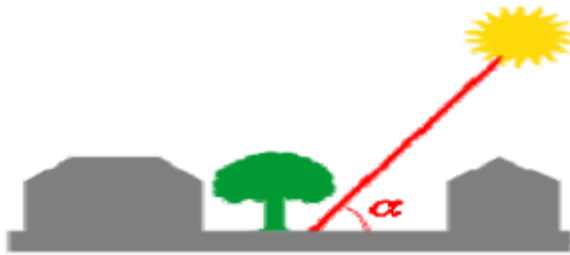


Figure 68 : Hauteur du soleil

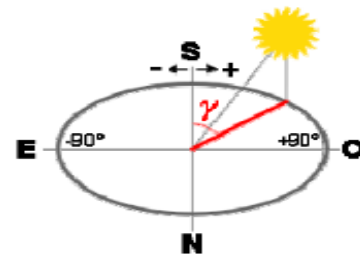


Figure 69 : Azimut du soleil

L'exposition du soleil change ainsi à chaque position (orientation) et à tout moment donné : à chaque date et à chaque heure.

#### c-4- Les obstacles de l'ensoleillement

##### c-4-1- La topographie

À une altitude élevée, la distance parcourue par les rayons du soleil dans l'atmosphère est réduite et les radiations solaires augmentent. La topographie du site, telle que les montagnes, les vallées ou encore les collines, provoque une grande influence et donc varie énormément l'impact de l'ensoleillement d'un site.

##### c-4-2- Les infrastructures urbaines

Quant aux infrastructures urbaines, les constructions voisines constituent des écrans fixes pour le bâti. Leur rôle peut être positif si l'on recherche une protection contre le Soleil. Par contre, leur rôle peut être négatif si les bâtiments voisins masquent le Soleil alors qu'on souhaite bénéficier d'apports solaires. En tout cas, tous les masques de l'environnement (immeubles ou grands arbres) gêneront grandement l'utilisation des gains solaires d'un bâtiment.

Pour mesurer l'impact de cet effet de masquage, on peut porter sur un diagramme cylindrique ou stéréographique (figure 70 ci-dessous) les courbes de la course solaire annuelle et la silhouette des bâtiments voisins. On repère ainsi facilement les périodes où l'ensoleillement est disponible et on peut ainsi calculer les facteurs de réduction des gains solaires.

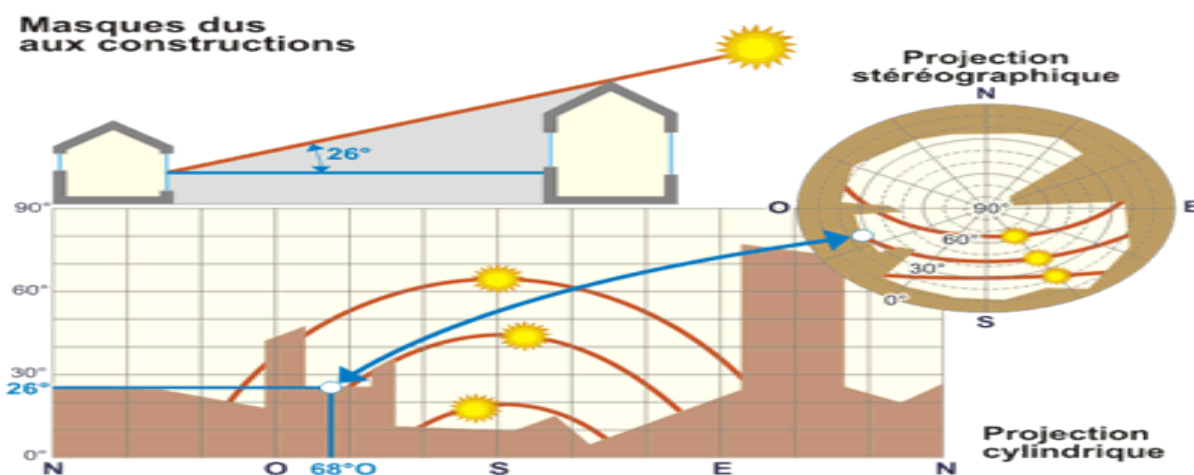


Figure 70 : Diagramme cylindrique ou stéréographique

### c-4-3- La composition atmosphérique

Au milieu du jour, le Soleil est au-dessus de notre tête, et ses rayons ont traversé une épaisseur d'air moindre, avant d'arriver sur Terre. Au début et à la fin de la journée, le Soleil est bas sur l'horizon, la traversée de l'atmosphère se fait alors plus longue, comme illustre la figure 71 ci-dessous. Ainsi, au coucher du Soleil, les rayons sont suffisamment affaiblis pour permettre à l'œil humain de fixer le Soleil sans trop d'éblouissement. L'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons solaires influence donc le spectre lumineux reçu.

Les normes internationales définissent différents types de spectres :

- ✚ AM1 pour air mass 1, lorsque le rayonnement a traversé une épaisseur d'atmosphère ;
- ✚ AM0 pour le spectre à la surface externe de l'atmosphère ;
- ✚ AM1.5 pour le spectre utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires correspondants à la traversée d'une atmosphère et demie.

Par sa composition, la couverture des nuages varie aussi énormément la puissance des rayons ainsi que l'ensoleillement d'un site.

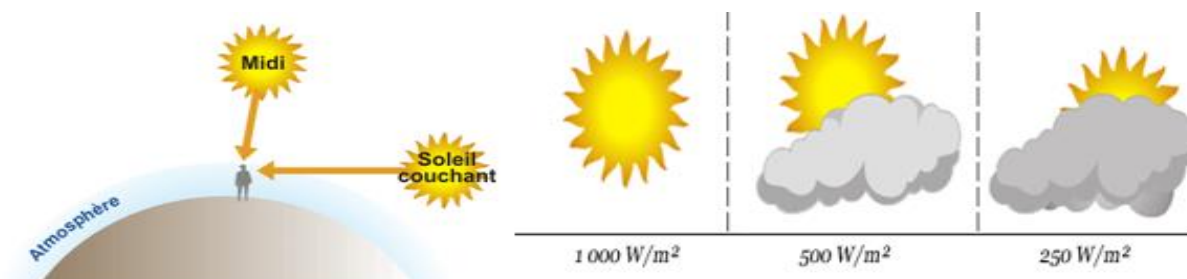


Figure 71 : Les principaux facteurs d'affaiblissement de l'ensoleillement

Pour jouer ainsi l'impact de rayonnement solaire et de l'intégrer dans la conception du bâtiment, trois données doivent être prises en compte :

- La position du soleil dans le ciel et l'angle qu'il crée avec les surfaces du bâtiment ;

- La quantité d'énergie radiante reçue au niveau du sol et des autres surfaces ;
- Les obstructions et les réflexions pouvant être causées par les nuages, la topographie et l'environnement immédiat, notamment l'urbanisation.

#### d- LES VENTS

Les vents sont des circulations d'air provoquées par les différences de pression atmosphérique liées aux gradients de température des sols, de l'air ou des eaux qui se produisent à des niveaux régionaux ou locaux. Leurs impacts sur le bâtiment se manifestent à l'aide des pertes thermiques et la pénétration des eaux de pluie.

Pour un site donné, les vents sont caractérisés par leurs différents paramètres, notamment : la vitesse, la puissance, la direction ainsi que la fréquence, qui peuvent être représentées et étudiées graphiquement sur une rose des vents.

La vitesse des vents peut varier en fonction de la rugosité, notamment : l'altitude du lieu, les végétations ainsi que les infrastructures aux alentours (taux d'urbanisation) du bâti comme illustre la figure 72 ci-dessus, à une hauteur de rugosité plus importante, l'effet du vent ralentit, tandis que dans l'eau ou vaste pleine, cet effet s'inverse.

Les montagnes agissent également comme une barrière naturelle et influant sur les vents, notamment via l'onde orographique. Un vent ascensionnel le long du relief peut également avoir lieu sous l'effet de la circulation d'air causée par la différence de température entre les masses d'air réchauffées sur les versants ensoleillés des vallées et celles de la vallée elle-même (vent anabatique), l'inverse arrive généralement la nuit (vent catabatique). Les vents chauds et secs descendant des versants des montagnes peuvent également apparaître après qu'ils ont déchargé leur humidité sur les versants opposés (effet de Föhn). Dans ce cas, les vitesses des vents varieraient en fonction de l'altitude. L'équation suivante est utilisée pour calculer la vitesse des vents à différentes hauteurs :

$$V = V_{ref} \lambda \ln (Z / Z_0) \quad [86]$$

Où :

- $V_{ref}$  : vitesse à une hauteur de 10 m
- $Z$  : hauteur pour laquelle la vitesse est recherchée

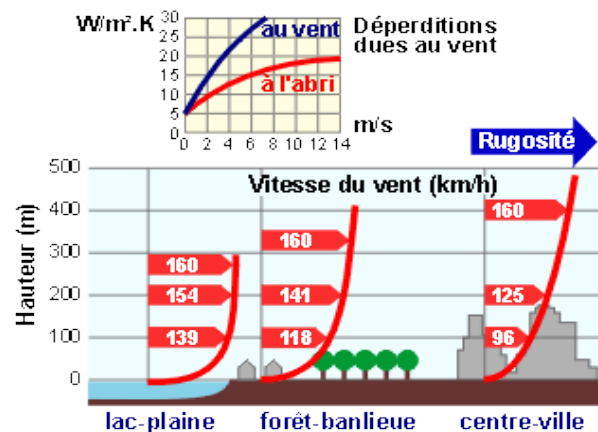


Figure 72 : Impact de la vitesse du vent selon l'altitude et la nature du sol

- $\lambda$  et  $Z_0$  : valeurs différentes en fonction de la classe de la zone, fixées par la norme NBN B03-002 intitulée « actions du vent sur les constructions », et donnée dans le tableau ci-après :

Tableau 45 : Classe de la zone, valeur de  $\lambda$  et  $Z_0$

| Classe de la zone                                                                            | $\lambda$ | $Z_0$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|
| 1 : borde de mer (0 à 2 km de la digue)                                                      | 0,166     | 0,005 |
| 2 : zone rurale avec bâtiments ou arbres isolés                                              | 0,202     | 0,070 |
| 3 : zone urbanisée, industrielle ou forestière                                               | 0,234     | 0,300 |
| 4 : ville (zone de construction d'au moins 10 m de haut sur au moins le quart de sa surface) | 0,209     | 1,00  |

## V-5-6- Les paramètres architecturaux

### a- PLACEMENT DES ESPACES INTERNES

L'architecture intérieure d'un logement a aussi un rôle important à jouer. Ainsi, la bonne orientation accompagnée d'une stratégie de zonage d'un bâtiment, comme l'exemple illustré par la figure 73 ci-après, consiste à placer les différentes pièces du bâtiment en fonction de leur l'exposition, de l'usage, de l'activité et du taux d'occupation prévisionnels des espaces intérieurs. Elle peut agir sur la profondeur, la forme ainsi que l'exposée au rayonnement direct du soleil. De même, chaque zone de vie doit être positionnée en fonction du moment de la journée où les personnes y passent le plus de temps, les zones les moins exposées aux apports de chaleur où les plus aérées sont ainsi réservées à des utilisations demandant des températures modérées (chambres, salles de travail, etc.).

À l'inverse, les locaux pouvant supporter des températures plus élevées pourront être placés du côté le plus exposé aux radiations solaires. Cette stratégie permet de regrouper les locaux en fonction de leurs besoins en air et de réduire ainsi le niveau de la facture énergétique, tout en adaptant au mieux le confort d'une pièce.

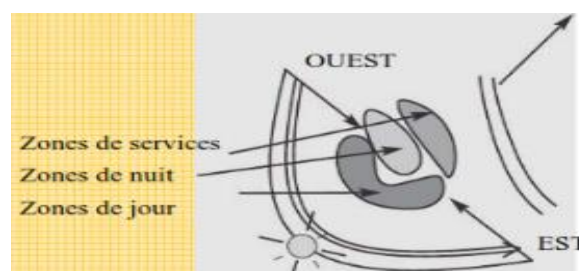


Figure 73 : Stratégie de zonage thermique d'un bâtiment

### b- FORME DU BÂTIMENT

La compacité ou le coefficient de forme (CF) est défini par le ratio de la surface du bâtiment comparée à son volume habitable, en  $m^2/m^3$ . Le sens du transfert de la chaleur se dirige de l'extérieure vers les espaces intérieurs, et qui va s'accroître à mesure que la forme du bâtiment devient moins compacte. Une plus grande surface amène en effet une plus grande exposition aux radiations solaires. La réduction du ratio surface/volume peut ainsi permettre de réduire les transferts thermiques, et de limiter les matériaux nécessaires à la construction avec des conséquences en termes de coûts et d'énergie. Un compromis

devra cependant être trouvé avec les objectifs de ventilation et d'éclairage naturels, qui sont favorisés par une forme longue et étroite du bâtiment.

Une distance accrue entre les façades peut en effet impacter négativement la circulation d'air tandis qu'une structure plus compacte réduira l'entrée de lumière dans certaines pièces. Par conséquent, Il est mieux d'opter, pour une structure moins compacte, la ventilation naturelle du site, combinée à une protection efficace de l'enveloppe du bâtiment contre les apports de chaleur notamment sur leurs façades.

## **c- CHOIX DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT**

L'enveloppe joue un rôle crucial dans la conception d'un bâtiment et notamment dans les stratégies de ventilation et d'éclairage naturel.

### **c-1- Toits**

Parmi les différentes parties de l'enveloppe d'un bâtiment, les toits sont les plus exposés aux radiations solaires ainsi, ils doivent être bien conçus afin de limiter les apports de chaleur. En effet, l'air chaud, plus léger, s'élève naturellement et vient en grande partie de se loger sous les toits. Ainsi, différents éléments tels que la forme, la structure ou la présence de combles sont considérés durant la phase de conception. On privilégie la structure avec une inclinaison pour favoriser l'évacuation des eaux de pluie et les toits étendus afin de fournir une protection supplémentaire contre les radiations solaires. En général, on distingue trois (03) types de toitures, à savoir :

- ▶ Les combles perdus : Les locaux situés sous des toitures inclinées et font office de grenier en général. Ils ne sont pas chauffés et doivent être séparés du logement ;
- ▶ Les combles habitables ou aménageables, comme le cas du bâtiment objet de l'étude de la présente thèse : La partie d'une construction située sous une toiture inclinée dont on y habite. Ils peuvent être chauffés, et
- ▶ Les toitures-terrasses.

### **c-2- Les parois**

La paroi d'un bâtiment exposée à l'environnement extérieur reçoit directement le rayonnement solaire selon leur degré de transparence ou d'opacité, leur couleur ou leur texture de surface, et est sujette ainsi à des échanges simultanés de chaleur par conduction et radiation. Ainsi pour assurer une bonne qualité thermique d'un environnement intérieur, sans faire appel à des matériels polluants et consommateur d'énergies, on peut intervenir sur les performances des matériaux constituant les parois d'un bâtiment, comme les briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka. Une enveloppe de bâtiment bien conçue apporte, dans ce cas, des bénéfices conjugués autant pour le confort des occupants que pour la préservation de notre planète, comme illustre la figure 73 de la page ci-après.

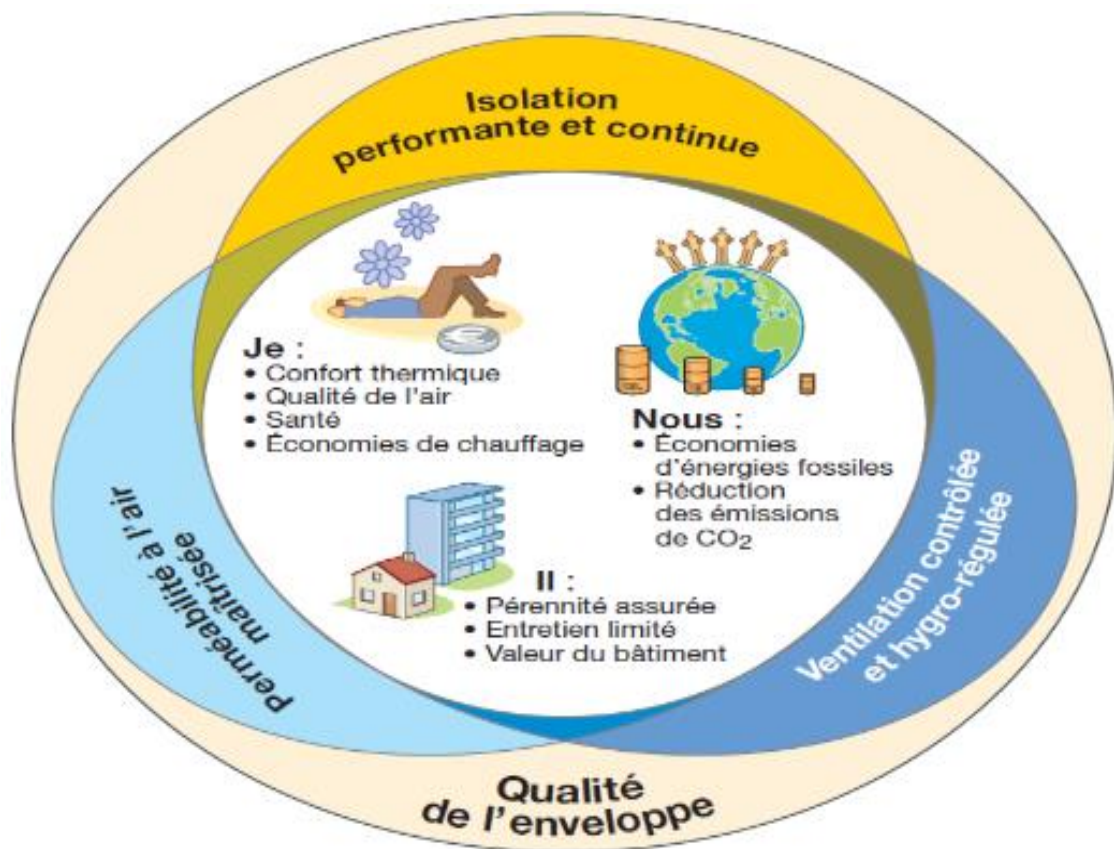


Figure 74 : Les avantages d'une enveloppe de bâtiment bien conçu

Ainsi, la sélection des matériaux de construction d'un bâtiment devra tenir en compte :

- L'énergie grise contenue dans les matériaux (énergie notamment dépensée lors de leur production et de leur transport) : en optant pour des ressources locales plutôt qu'importées (à titre d'information les énergies grises dépensées par quelques matériaux utilisés dans la construction d'un bâtiment sont données dans l' [annexe 5](#)) ;
- La méthode de production des matériaux : en privilégiant les matières (par exemple, bois) provenant d'une exploitation durable dont les processus ne nuisent pas à l'environnement ;
- Le cycle de vie des matériaux : en optant pour des matériaux recyclés ou recyclables et non polluants, comme la brique en terre cuite ;
- Les méthodes d'entretien : en privilégiant les matériaux qui demandent peu d'entretien ou dont la maintenance aura un impact environnemental limité ;
- De la durabilité de la structure et de l'adaptabilité des matériaux aux conditions climatiques locales ;
- Les performances thermiques recherchées.

De plus, l'enveloppe d'un bâtiment doit être étanche à l'eau, bloquant les remontées capillaires, bien isolée et étanche à l'air, hygro-régulable (air neuf et ajusté en teneur en vapeur d'eau).

## d- LES PROTECTIONS SOLAIRES

Les surfaces du bâtiment exposées au soleil comme les fenêtres, les murs et les toits peuvent conduire aux surchauffes des ambiances intérieures. Ces impacts résultent souvent des apports de chaleur non désirés et un risque d'éblouissement. Ainsi, il faut maîtriser ces rayonnements directs par l'intermédiaire de diverses protections.

On entend par protection solaire tout élément dont leur rôle est d'éviter que tout ou seulement une partie du rayonnement solaire ne pénètre pas une surface ou une ouverture.

### d-1- Les différents types de protection solaire

Il existe nombreux types de dispositif de protection solaire, ils peuvent être structuraux, fixes (comme l'approche, la véranda, le brise-soleil) ou appliqués, mobiles (stores, persiennes, volets, etc.), extérieurs ou intérieurs, verticaux ou horizontaux. Parmi ceux, on peut citer : les auvents, les persiennes, le flanc, la loggia, les rideaux, les stores, les volets, les miroirs, les fenêtres teintées, les avant-toits, ou encore les étagères à lumière, etc.

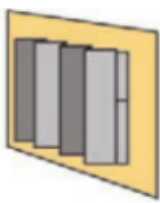
L'efficacité de la protection solaire est en fonction de sa typologie, de son orientation, de la période, ainsi que des différentes saisons de l'année. La combinaison des différents types de protection solaire peut être bénéfique pour avoir une efficacité maximale.

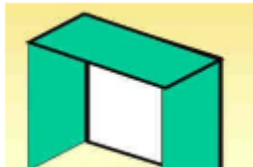
#### d-1-1-Les protections extérieures

Les fenêtres entièrement ombragées de l'extérieur peuvent réduire les apports solaires de l'ordre de 80 % [ASHRAE (2009)]. Dans les façades du bâtiment, les apports d'énergie solaire peuvent contrôler via l'utilisation de protections extérieures au niveau des fenêtres et des parois. Ces protections prennent la forme de simples surplombs plus ou moins modulables et inclinables selon les objectifs, des persiennes verticales ou horizontales ou à la fois la combinaison des deux. L'isolation de ces éléments est aussi à prendre en compte afin d'éviter qu'ils ne se réchauffent pas et transmettent ainsi cette chaleur vers le vitrage et l'intérieur du bâtiment. Les figures du tableau 46 suivant définissent quelques types de protection pouvant être utilisés pour les fenêtres extérieures :

Tableau 46 : Types de protections extérieures des fenêtres

| Définition et descriptif de la protection extérieur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Illustrations                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>L'auvent</b> : constitué par une avancée horizontale au-dessus de l'ouverture : auvent, débord de toit, débord de dalle, balcon, brise-soleils horizontaux, casquette. Son occultation au rayonnement direct est bonne et la casquette laisse passer le soleil, quelle que soit l'orientation de la façade. Il peut être :</li></ul> |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ☞ Standard horizontal                                                                                                                                                                                                                                      |    |
| ☞ Ajouter d'un petit rebord pour limiter les projections ;                                                                                                                                                                                                 |    |
| ☞ En pente pour limiter les projections ;                                                                                                                                                                                                                  |    |
| ☞ Combiner avec une persienne pour faire entrer plus de lumière.                                                                                                                                                                                           |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Persienne</b> : Contrevent formé d'un châssis articulé garni de lamelles horizontales, servant à protéger une fenêtre du soleil et de la pluie tout en permettant à l'air de passer. Et peut-être :</li> </ul> |  |
| ☞ Vertical pour les façades est et ouest principalement ;                                                                                                                                                                                                  |  |
| ☞ De type auvent au niveau de la protection supérieure pour une lumière plus diffuse ;                                                                                                                                                                     |  |
| ☞ Divisé en plusieurs protections pour limiter les projections solaires.                                                                                                                                                                                   |  |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Flanc</b> : Pans verticaux à côté de l'ouverture, comme : le décrochement de la façade, saillie de refend, tableau de fenêtres, écrans à lames verticales. Son occultation est quasiment constante (mais faible) toute l'année.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Loggia</b> : Combiné entre l'auvent et les flancs : loggia, tableaux + linteau de fenêtre, balcon filante + séparation verticale, écrans à lames croisées. Sa fonction est moyenne toute l'année.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Le store</b> : Pièce de matière souple ou d'éléments assemblés qu'on enroule et qu'on déroule pour faire varier la luminosité ou la chaleur d'une pièce, ou pour créer de l'intimité : Stores vénitiens (lamelles horizontales), les stores enroulables, les stores à lamelles (verticales), disposés au côté extérieur de la fenêtre. Ce type de protection est adapté constamment aux conditions extérieures et intérieures d'un local. Ils peuvent être utilisés en fonction des besoins, et permettent ainsi une protection efficace.</li> </ul> |  |

Les pare-soleil, les brise-soleil, les balcons, les avancées de toiture, les décrochements de façade ainsi que les occultations horizontales fixes (appelées casquettes) sont des véritables éléments architecturaux qui participent bien à l'amélioration de la façade et au confort thermique d'un bâtiment.

Maçonnés ou rapportés, verticaux ou horizontaux, ils ont davantage agi en permanence sans intervention humaine. Leurs emplacements et leurs dimensions doivent être étudiés pour une protection moyenne de façon à plus ou moins laisser passer le rayonnement solaire selon les saisons. Mais, la protection en surplomb ou auvent sur les façades est la plus efficace pour la conception réalisée en fonction des trajectoires du soleil, parce que ce type de protection protège la fenêtre contre le rayonnement direct.

Comme illustre la figure 75 ci- contre.

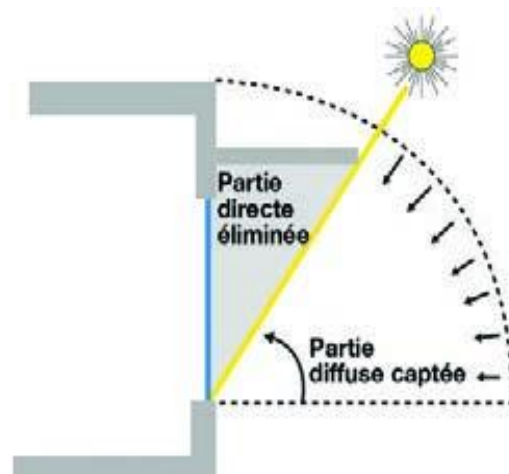


Figure 75 : L'auvent bloque le rayonnement direct

Un autre moyen consiste à planter des arbres ou des arbustes, plutôt à l'ouest pour créer une ombre l'après-midi et en soirée. Il est judicieux de choisir des plantations à feuilles caduques, qui laissent ainsi passer les rayons du soleil l'hiver. De même, une végétalisation de la façade et de la terrasse participe à l'apport de fraîcheur pour les occupants d'un bâtiment.

### **d- 1-2- Les protections intérieures**

Les protections solaires intérieures peuvent contribuer à une réduction de l'ordre de 23 - 89 % de l'énergie nécessaire pour le refroidissement du bâtiment [Dubois, 1997]. Elles comprennent les rideaux plus ou moins opaques, les stores enroulables, plissés, vénitiens ou à lamelle ou encore les films opaques. L'avantage de ce type de protection est le pouvoir d'adapter facilement depuis l'intérieur autant que besoin, la trajectoire du soleil et l'heure. Par exemple, store quasiment fermé sur les fenêtres exposées en matinée, ouvert dans l'après-midi, et inversement dans le soir.

### **V-5-7- Le plan de masse**

La plupart des paramètres à considérer dans la conception bioclimatique d'un bâtiment peuvent intégrer au sein d'un plan de masse. Il inclut les nuisances sonores à proximité, la trajectoire du soleil, le potentiel venteux, le cycle de l'eau ou encore les contraintes liées à l'urbanisme.

## **PARTIE II : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE**

# CHAPITRE I- DÉTERMINATION DE L'ARGILOGITÉ, LA TENEUR EN EAU NATURELLE AINSI QUE LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA

Le présent chapitre explore les différents études/essais réalisés, suivant la méthode géotechnique de laboratoire, des échantillons d'argiles destinés pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka.

L'échantillon d'argiles étudié, du présent chapitre, a été extrait dans trois puits, distants de 30 m environ, ouverts à l'exploitation artisanale dans le site d'extraction d'Ambohitrimanjaka. Le premier échantillon, noté ( $P_1$ ) dans le processus ci-dessous, a été prélevé proche du pied de la colline du village d'Ambohitrimanjaka, le deuxième ( $P_2$ ) au milieu du site de la première extraction est celle du bord de la rivière de l'lkopa, tandis que le troisième ( $P_3$ ) échantillon à 10 m près de la berge dudit fleuve.

Pour bien mener l'étude et l'analyse, nous allons commencer par la détermination de l'argilogité de ces échantillons de sol, puis leur teneur en eau naturelle, et terminer par l'étude de leurs différents comportements mécaniques, plus particulièrement : la limite de liquidité, la limite de plasticité, l'indice de plasticité, ainsi que la limite de retrait.

Chaque résultat obtenu sera conclu par une validation, analyse et interprétation liées au processus de la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka.

Et enfin une suggestion géotechnique pour les briquetiers d'Ambohitrimanjaka sera mise en exergue à la fin du présent chapitre.

## I - IDENTIFICATION DE L'ARGILOGITÉ DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA

L'argilosité de l'argile d'Ambohitrimanjaka a été déterminée à l'aide de l'essai au bleu de méthylène, suivant la norme NF P 94-068. Puisque ce produit étant absorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer. Cette capacité d'absorption rend compte globalement l'activité de cet additif sur la surface d'échantillons des sols argileux.

### I-1- BUT ET PRINCIPE DE L'ESSAI

Cet essai permet d'évaluer la richesse en argile d'un sol, notamment leurs éléments fins, en mesurant sa capacité d'adsorption de molécules de bleu de méthylène. Pour atteindre cet objectif, on injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. Puis, on contrôle l'aptitude d'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tâche sur un papier filtre. La tâche formée issue de cet ajout se compose d'un dépôt central

coloré d'un bleu soutenu entouré d'une zone humide incolore et un excès de bleu clair persistant autour du dépôt central.

## I-2- ÉQUIPEMENTS/MATÉRIELS NÉCESSAIRES

- **Appareillage d'usage courant** : Une balance électrique, un chronomètre, un tamis de 2 mm d'ouverture, une pissette de 500 ml, un bécher de verre ; et une spatule.



Photo 23 : Appareillages d'usages courant pour la détermination de l'argilogité d'un sol

- **Appareillage spécifique** : Une burette de capacité 100 ml et de graduation 1/10 ml, papier-filtre, une baguette de verre, un agitateur à ailettes, et un bac carré en matière plastique.



Photo 24 : Appareillages spécifiques pour la détermination de l'argilogité d'un sol

- **Produits utilisés** : Solution de bleu de méthylène et eau distillée.



Photo 25 : Produits utilisés pour la détermination de l'argilogité d'un sol

## I-3- DÉROULEMENT DE L'ESSAI

### I -3-1- Préparation de l'échantillon

Cet essai a été effectué sur la fraction de sol ayant une granulométrie 0/5 mm, c'est-à-dire les éléments inférieurs à 2  $\mu\text{m}$  qui contiennent la fraction argileuse. Car, cette fraction de sol argileux donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène, et donc quantifie la sensibilité du sol à l'eau. On prélève, ainsi, 30 g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée. Le mélange étant maintenu à l'aide de l'agitateur à ailettes.

### I-3-2- Déroulement de l'essai

Une fois la procédure de la préparation est effectuée, on passe au test de la tâche. Cette épreuve consiste à injecter successivement des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à avoir une saturation des particules d'argiles. Pour ce faire, on prélève une goutte de liquide dans le bécher contenant le sol imbibé de bleu, cette goutte est, à l'aide de la baguette de verre, déposée sur le papier-filtre, comme illustre la photo 26 ci-contre.



Photo 26 : Test de l'argilosité d'un sol

On obtient un dépôt de diamètre compris entre 8 et 12 mm. Suite à cela, 2 résultats sont possibles, illustrés par les photos 27 et 28 ci-après :

- ☞ La goutte centrale bleue est cerclée d'une zone incolore, illustrée par la photo ci-contre : avec ce résultat, le test est négatif ;
- ☞ La goutte centrale bleue est cerclée d'une zone teintée de bleu plus clair, illustrée par la photo ci-contre : avec ce résultat, le test est positif.

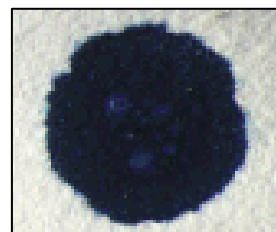


Photo 27 : Test au bleu de méthylène négatif

Pour la lecture du résultat, on procède de la manière suivante :

- Ajout de 5 ml de bleu : cette première phase consiste à l'addition de bleu de méthylène par pas grossier (5 ml) suivi du test de la tâche.

Test immédiat de la tâche :

- Si test est négatif, il faut refaire l'étape précédente, et
- Si test est positif, on peut procéder à l'étape suivante.

- Ajout de 2 ml de bleu : Pour cette deuxième phase au premier test immédiat positif, on ajoute de bleu par pas fin (ml) suivi du test de la tâche.

Test immédiat de la tâche :

- Si test est négatif, il faut recommencer l'étape précédente, et
- Si test positif, on peut opérer l'étape suivante.

- Confirmation du test pendant 5 minutes : pour cette troisième phase, on opère 5 fois la confirmation du test, toutes les minutes et pendant 5 minutes.

Test immédiat de la tâche :

- Si test est négatif, il faut reprendre l'étape précédente, et
- Si test positif, l'objectif de l'essai est atteint.



Photo 28 : Test au bleu de méthylène positif

### I-4- MÉTHODE DE CALCUL ET RÉSULTAT DE L'ESSAI

Par définition, on appelle « valeur de bleu » des fines, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de fines. Ainsi, la valeur du bleu d'un sol est définie par la relation :

$$VBs = (V_i * C_B / M_s) * C \quad [87]$$

Où :

- VBs : La valeur du bleu du sol ( $g_{\text{bleu}}/100 g_{\text{sol}}$ ) ;
- Vi : Le volume total de bleu introduit (ml) ;
- $C_B$  : la concentration de la solution du bleu de méthylène, pris égal à 0,01 g/ml ;
- Ms : Masse sèche de la prise d'essai (g) ; et
- C : La proportion de sols ayant une dimension de 0/5 mm.

Les quantités de matériaux, les volumes de bleu de méthylène utilisés ainsi que les résultats obtenus issus de l'essai réalisé, relatifs à chaque échantillon, sont récapitulés dans le tableau 47 qui suit.

Tableau 47 : Classification des sols selon la valeur du bleu de méthylène

| Échantillon                                               | P <sub>1</sub>                                             | P <sub>2</sub>                                             | P <sub>3</sub>                                             |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Prise d'essai (masse sèche des fines) : (M <sub>s</sub> ) | 40 g                                                       | 30 g                                                       | 50 g                                                       |
| Volume total de solution introduite : (V <sub>i</sub> )   | 131 ml                                                     | 131 ml                                                     | 131 ml                                                     |
| Volume de bleu introduit : (C <sub>B</sub> )              | 0,01 ml                                                    | 0, 01 ml                                                   | 0, 01 ml                                                   |
| Proportion de 0/5 mm : (C)                                | 100 %                                                      | 100 %                                                      | 100 %                                                      |
| Résultats des tests                                       |                                                            |                                                            |                                                            |
| Première injection : 5 ml                                 | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Deuxième injection : 10 ml                                | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Troisième injection : 15 ml                               | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Quatrième injection : 20 ml                               | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Cinquième injection : 25 ml                               | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Sixième injection : 27 ml                                 | Négatif                                                    | Négatif                                                    | Négatif                                                    |
| Septième injection : 29 ml                                | Positif                                                    | Positif                                                    | Positif                                                    |
| <b>Valeur de bleu du sol d'Ambohitrimanjaka : (VBs)</b>   | <b>3,28 <math>g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}</math></b> | <b>4,37 <math>g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}</math></b> | <b>2,62 <math>g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}</math></b> |

On remarque que l'argilogité de l'échantillon P<sub>2</sub> pris dans le site d'extraction d'argile d'Ambohitrimanjaka est la plus élevée, puis celle de l'échantillon P<sub>1</sub> extrait au pied de la colline dudit village, et la plus faible de taux d'argile est l'échantillon P<sub>3</sub> prélevé auprès de la berge de la rivière de l'Ikopa.

## I-5- VALIDATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE RÉSULTAT

Le tableau 50 qui suit donne la classification d'un sol selon leur valeur de bleu de méthylène VBs, suivant la norme prise pour la réalisation des essais.

Tableau 48 : Classification des sols selon la valeur du bleu de méthylène

| Valeur du bleu du sol ( $g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$ ) | Nature du sol          |
|---------------------------------------------------------------|------------------------|
| < 0,2                                                         | Sols sablonneux        |
| 0,2- 2,5                                                      | Sols limoneux          |
| 2,5- 6,0                                                      | Sols limoneux argileux |
| 6,0-8,0                                                       | Sols argileux          |
| > 8,0                                                         | Sols très argileux     |

Ainsi la valeur moyenne du bleu de l'argile des sols destinés pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, estimée à  $3,42 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$  et se situe entre l'intervalle de  $2,5 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$  à  $6,0 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$ , est un sol limoneux argileux.

La différence entre le taux de l'argilogité de chaque échantillon est expliquée par leur formation géologique, notamment les dépôts des matériaux, tels que les sables ainsi que les limons, engendrés par la crue venant du village d'Ambohitrimanjaka et celle de la rivière de l'Ikopa :

- Les dépôts des matériaux fins laissés au pied du village d'Ambohitrimanjaka sont issus à la fois de l'érosion du dit village ainsi que celle de la rivière de l'Ikopa, donc le type d'argile qui y formé est plus ou moins hétérogène ( $3,28 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$ ) ;
- Les sols déposés au milieu de la plaine d'Ambohitrimanjaka sont déposés directement dans les lavaka, ancien site d'extraction d'argile à ciel ouvert, par les biais de la crue engendrée par la rivière de l'Ikopa pendant la saison de pluie. Cet emprisonnement/immobilisation favorise l'action de l'agent responsable de leur sédimentation, c'est pourquoi le taux d'argile ( $4,37 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$ ) dans cet endroit est si élevé ; et enfin
- Les sols formés approchent de la berge de l'Ikopa et reçoivent un dépôt de limon à chaque fois que le niveau de l'eau dudit fleuve monte. Pendant cette période, les matériaux enroulés qui l'accompagnent sont emportés par l'écoulement de l'eau vers l'aval, sauf durant la période d'étiage. En effet, le type d'argile formé dans cette condition est un sol limoneux. Le résultat de l'essai de l'échantillon pris dans cet emplacement ( $2,62 g_{\text{bleu}}/100g_{\text{sol}}$ ) proche de la limite entre le sol limoneux argileux ainsi que le sol limoneux confirme cette hypothèse.

## II - DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU NATURELLE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA

### I-1- BUT ET PRINCIPE DE L'ESSAI

Le but de cet essai est de rechercher la teneur en eau naturelle (%) contenant dans l'échantillon d'argile suivant la norme NF P 94-050.

### I-2- ÉQUIPEMENTS/MATÉRIELS NÉCESSAIRES

- ☞ Une étuve de dessiccation pouvant être réglée jusqu'à 105 °C ;
- ☞ Une balance permettant les pesées avec une incertitude maximale de 1/1000<sup>e</sup> de la pesée.

### I-3- DÉROULEMENT DE L'ESSAI

Les produits de carottage extrait sur site ont été emballés directement et hermétiquement dans un sac plastique, immédiatement après l'extraction de chaque échantillon, pour éviter la déshydratation de l'eau contenue dans l'argile. Dès que ces matériaux sont parvenus dans le laboratoire, les premières pesées de l'échantillon ont été entamées directement, en conditionnant la quantité d'eau dans l'échantillon inchangé. Puis, ces mêmes échantillons ont été étuvés, pendant 24 h, dans un four calibré avec une température de 105 °C, pour sécher. Après cet étuvage, les échantillons ont été pesés à nouveau.

### I-4- MÉTHODE DE CALCUL ET RÉSULTAT DE L'ESSAI

La teneur en eau d'un sol est exprimée par le rapport entre le poids de l'eau et celui des grains.

La détermination de la teneur en eau naturelle est basée sur la formule ci-après :

$$W (\%) = (P_w/P_s). 100 \quad [88]$$

Où :

- ✚ W : est la teneur eau naturelle de l'échantillon (%) ;
- ✚ P<sub>w</sub> : étant le poids de l'eau dans l'échantillon de sol à l'état naturel (g) ; et
- ✚ P<sub>s</sub> : le poids des échantillons de sol après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures (Kg).

En effet, les poids des échantillons ainsi que les teneurs en eaux, déterminés suivant la relation 88 ci-dessus, de chaque échantillon retenu sont récapitulés dans le tableau ci- après.

Tableau 49: Teneur en eau naturelle de l'argile d'Ambohitrimanjaka

| Échantillon         |          | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> |
|---------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| N°. de la tare      | Relation | M 01           | M 02           | M 03           |
| Masse totale humide | a        | 276,860 g      | 307,58 g       | 280,95 g       |
| Masse totale sèche  | b        | 182,400 g      | 205,01 g       | 179,73 g       |

|                                                                     |        |                |          |          |
|---------------------------------------------------------------------|--------|----------------|----------|----------|
| Masse de la tare                                                    | c      | 23,510 g       | 31,39 g  | 23,35 g  |
| Masse de l'eau : (P <sub>w</sub> )                                  | d= a-b | 94,460 g       | 102,57 g | 101,22 g |
| Masse du mat. Sec : (P <sub>s</sub> )                               | e= b-c | 158,890 g      | 173,62 g | 156,38 g |
| Teneur en eau : (W)                                                 | f= d/e | 59,45 %        | 59,08 %  | 64,73 %  |
| <b>Teneur en eau naturelle de l'argile d'Ambohitrimanjaka (W) :</b> |        | <b>61,08 %</b> |          |          |

### I-5- VALIDATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE RÉSULTAT

D'une part, d'après la définition des [constituants géotechniques de l'argile](#), annoncée dans le sous-paragraphe I-9 du chapitre II de la première partie de cet ouvrage, les argiles destinées pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka sont classées dans l'argile molle, parce que leur teneur en eau naturelle (61,08 %) est comprise dans l'intervalle de 50 à 100 %.

D'autre part, nous avons vu dans la théorie du processus de fabrication des briques artisanale en terre cuite, notamment pour la condition nécessaire pour atteindre [le séchage](#) normal des produits finis, que la teneur en eau naturelle de l'argile devrait être comprise entre 25 % et 30 % pour que leurs états hydriques n'aient pas d'impacts négatifs, tels que la déformation et les fissures, sur les qualités des briques, tant durant la période de séchage que pendant la cuisson.

En effet, afin de réduire la teneur en eau naturelle dans les pâtes et pour obtenir l'homogénéisation ainsi que l'humidification nécessaire, les briquetiers d'Ambohitrimanjaka n'excluent pas les différentes étapes de la [préparation de l'argile](#), développées dans le sous-paragraphe II-4-2 du chapitre II de la première partie de la présente thèse, qui conditionnent la maniabilité de ces matériaux avant leur moulage.

## III - IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA

L'objectif de la présente partie est de mettre en exergue la méthode de détermination des différents comportements mécaniques d'un sol argileux, sur la base de la norme NF P 94 051, relative à l'essai des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité.

### III-1- ORIGINE DES ESSAIS

Les limites d'Atterberg ont été identifiées au début du XX<sup>e</sup> siècle par A. Atterberg, quand ce pédologue suédois s'intéressait à la plasticité des argiles destinées pour la fabrication des produits céramiques de cette époque. Et plus tard, vers les années 60, les essais mis au point à cette époque ont été repris par

Casagrande<sup>74</sup>, afin que leur interprétation puisse permettre d'établir un lien entre la teneur en eau ainsi que le comportement du sol.

### III-2- DÉFINITION ET TERMINOLOGIE

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérale caractéristique d'un sol argileux. Ainsi, elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action de variation de volume proportionnellement aux teneurs en eau, suivant les quatre états caractérisant la consistance des argiles, dont :

☞ L'état liquide : Le sol a une consistance très faible. Dans ce cas, il a l'aspect d'un fluide, il tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les particules glissent facilement les unes sur les autres, comme illustre la figure 75 ci-contre ;

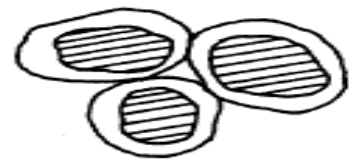


Figure 76 : État liquide de l'argile

☞ L'état plastique : Le sol a une consistance plus importante. Donc il ne tend plus à se niveler. Soumis à des faibles contraintes, il se déforme largement sans se rompre. Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Les particules ont mis en commun leurs couches absorbées. Lorsqu'il y a déformation, les particules restent attachées les unes aux autres sans s'éloigner, comme illustre la figure 76 ci-contre ;

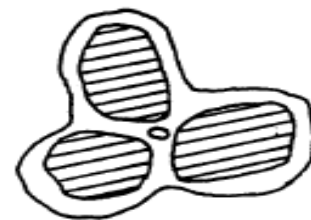


Figure 77 : État plastique de l'argile

☞ L'état solide avec retrait ou état semi-solide : Dans ce cas-là, le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes : petite déformation élastique ;

☞ L'état solide sans retrait : Les particules arrivent au contact en quelques points en sachant l'eau absorbée, le sol ne change plus de volume quand la teneur en eau est diminuée, comme illustre la figure 77 ci-contre.



Figure 78 : État solide sans retrait de l'argile

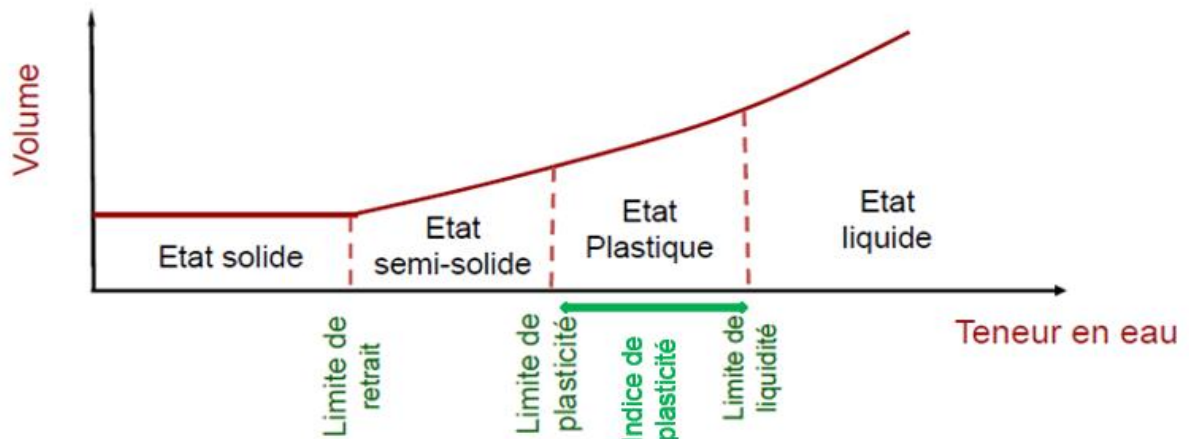
Les intervalles de changement d'état d'un sol argileux sont délimités par :

- ✓ La limite de liquidité ( $W_L$ ) : C'est la teneur en eau d'un sol remanié, caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique ;
- ✓ La limite de plasticité ( $W_P$ ) : C'est la teneur en eau d'un sol remanié, caractérisant la transition entre un état plastique et un état semi- solide (le sol durcit et se fissure) ;

<sup>74</sup> Professeur au Massachusetts Institute of Technology et à Harvard. Un de cofondateur de la mécanique des sols modernes.

- ✓ La limite de retrait  $W_s$  en (%) : C'est la teneur en eau à partir de laquelle, lorsque l'argile est séchée, son volume ne diminue plus ; et
- ✓ L'étendue du domaine plastique du sol entre la limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité donne l'indice de plasticité ( $I_P$ ) en (%)

La variation de volume en fonction de la teneur en eau ainsi que les différentes limites géotechniques qui séparent le changement d'état d'un sol argileux à un autre, énumérées ci-dessus, sont illustrées dans le graphique ci-après.



Grphe 26: Les différent état et le limites de variation de la teneur en eau d'un sol argileux

On tire à partir de ce chronogramme que la propriété mécanique l'argile diminue proportionnellement avec l'augmentation de sa teneur en eau.

### III-3- PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'essai s'effectue en trois phases, dont :

- ☞ Premièrement, la recherche de la teneur en eau ( $W_L$ ) par laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande se ferme sous l'action de 25 socs appliqués de manière normalisée ;
- ☞ Deuxièmement, la recherche de la teneur en eau ( $W_P$ ) pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3 mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.
- ☞ Puis, on calcule l'indice de plasticité ( $I_P$ ) ainsi que la limite de retrait ( $W_s$ ) des échantillons en exploitant la limite de liquidité et la limite de plasticité annoncées dans le processus ci-dessus.

### III-4- ÉQUIPEMENT NÉCESSAIRE

#### III-4-1- Pour la préparation de l'échantillon

- ☞ Un tamis à mailles carrées de 400  $\mu\text{m}$  d'ouverture ;
- ☞ Un bac de manutention (30 x 20 x 8 cm) ;
- ☞ Récipient de 2 l.

### III-4-2- Pour la détermination de $W_L$

Appareil de Casagrande équipé d'une coupelle normalisée, monté sur un support métallique avec manivelle, le tout étant fixé sur un socle en bois bakélisé. Comme illustre la photo 29 ci-contre. L'ensemble permet de faire tomber la coupelle d'une hauteur de 10 mm sur le bloc de bois dur, chaque choc entraînera la fermeture progressive de la rainure pratiquée dans l'échantillon de sol, celle-ci ayant été effectuée à l'aide de l'outil à rainurer. Cet appareil est livré avec deux coupelles, dans lesquelles l'une ayant une surface lisse tandis que l'autre a une surface rigoureuse. Ce deuxième type de coupelle est destiné spécialement pour les échantillons sableux qui ont tendance à glisser sur la surface de la coupe lors de chaque choc.



Photo 29 : Appareil de Casagrande

### III-4-3- Pour la détermination de $W_p$

- ☞ Une plaque lisse en marbre pour le malaxage du sol et la confection de rouleaux de sol ;
- ☞ Une plaque de verre et sa cale pour l'évaluation du diamètre du rouleau de sol.

### III-4-4- Pour la mesure des teneurs en eau $W$

- ☞ Une étuve de dessiccation pouvant être réglée à 105 °C et à 50 °C ;
- ☞ Une balance permettant les pesées avec une incertitude maximale de 1/1000<sup>e</sup> de la pesée ;
- ☞ Des capsules en verre ou boîte de pétries, des pustules, et une truelle.



Photo 30 : Micro – onde pour déterminer la teneur en eau de l'argile

## III-5- PROCESSUS DE L'ESSAI ET MÉTHODE DE CALCUL

### III-5-1- Préparation de l'échantillon

- Prendre l'échantillon représentatif du sol et le mettre imbibé dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures ;
- Tamiser ce matériau imbibé par voie humide sur un tamis de 400  $\mu\text{m}$ , l'ensemble du tamisât et des eaux de lavage est ensuite décanté pendant 12 heures ;
- L'eau claire surnageant est siphonnée en prenant garde de ne pas entraîner de particule solide fine, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à 50 °C jusqu'à l'obtention d'un mortier mou ;

L'échantillon ainsi préparé doit contenir 200 g de particules solides.

### III-5-2- Détermination de la limite de liquidité $W_L$

L'échantillon sus- préparé est maintenant mis en place à la spatule, de façon bien homogène. L'épaisseur au centre est d'environ 15 à 20 mm, et le pourtour étant sensiblement horizontal. On creuse ensuite une rainure dans le mortier contenu dans la coupelle, à l'aide de l'outil à rainurer. On tourne ensuite la manivelle de manière très régulière, à raison de deux chocs par seconde, afin de provoquer le choc de celle-ci sur le bloc de bois dur.

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 socs. Ainsi, on observe le fond de la rainure et on compte le nombre de choc nécessaire pour que celle-ci se ferme sur 1 cm environ. On recommence l'opération 3 fois avec des teneurs en eau décroissantes et de telle sorte que le nombre de chocs à chaque essai soit compris entre 15 et 35 :

- ☞ Dans le cas où le choc « n » a été inférieur à 15, l'échantillon pris doit être laissé sécher un peu ; et
- ☞ Si le nombre de chocs « n » est supérieur à 35, l'échantillon doit humidifier légèrement et bien malaxer/homogénéiser avant de reprendre l'essai.

Pour chaque essai, tel que  $15 < n < 35$ , on peut déterminer la teneur en eau, en suivant le processus ci-après :

- ✓ On prélève un peu de mortier de la part et d'autres de la rainure ;
- ✓ On place l'ensemble de prélèvement sur un verre de montre de poids T ;
- ✓ Puis on pèse immédiatement, soit  $W_h$  ;
- ✓ On met à l'étuve à 60 °C jusqu'à dessiccation complète et ayant un poids stable, c'est-à-dire pendant 25 heures environ ;
- ✓ À la sortie de l'étuve, on doit peser immédiatement l'échantillon sec, ou après refroidissement dans un dessiccateur, soit  $W_d$  ;
- ✓ On déduit la teneur en eau telle que :

$$w = \frac{(W_h - T) - (W_d - T)}{(W_d - T)} 100 \quad [89]$$

Où :

- ☞  $w$  : La teneur en eau (exprime en %) ;
- ☞  $T$  : Poids de la tare (g) ;
- ☞  $W_h$  : le poids de l'échantillon humide, y compris la tare (g) ;
- ☞  $W_d$  : le poids de l'échantillon sec, y compris la tare (g).

L'expression des résultats de la limite de liquidité ( $W_L$ ) est déterminée à partir du graphique de la teneur en eau ( $W$ ) mesurée à chaque essai, en fonction du logarithme du nombre de coup correspondant. Elle

est lue sur le graphique pour N= 25 coups, exprimés en pourcentage arrondi au nombre entier le plus proche.

Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, il existe ainsi une relation permettant de déterminer  $W_L$  à partir d'un seul essai, pourvu que le nombre de coup de fermeture soit compris entre 15 et 35. Cette relation s'écrit comme suit :

$$W_L = W \cdot \frac{(N)^{0,121}}{(25)} \quad [90]$$

Où :

- $W_L$  : étant la limite de liquidité (%);
- $W$  : La teneur en eau du sol au moment de l'essai (%);
- $N$  : le nombre de coup correspondant à la fermeture de l'échantillon sur 1 cm dans la coupelle.

### III-5-3- Détermination de la limite de plasticité $W_P$

La limite de plasticité  $W_P$  doit être inférieure à  $W_L$ , il faut donc sécher l'échantillon un peu plus. Quand sa teneur en eau est correcte, il faut modéliser une boulette de mortier, grosse comme une noisette, environ 12 mm de diamètre, et en faire un cylindre de 3 mm de diamètre (cf. la figure 79 ci-dessous), en le roulant sur la plaque de marbre propre, lisse et sèche. Ceci se fait à la main, ou en utilisant une plaque plane, par un mouvement alternatif d'environ un aller-retour par seconde. Le cylindre issu de cette modélisation doit avoir une longueur de 10 à 15 cm.

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau cylindrique d'un sol qui se brise lorsque son diamètre atteint 3 mm.

La teneur en eau doit être déterminée immédiatement après le test, selon la procédure décrite lors de la détermination de  $W_L$ . Ainsi :

- ☞ Si le cylindre se brise avant d'atteindre le diamètre de 3 mm, la teneur en eau de l'échantillon est trop faible ;
- ☞ S'il ne s'est pas brisé, on doit soulever le cylindre en son milieu de 15 mm à 20 mm, comme montre la figure 80 ci-contre, la limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement ;
- ☞ Si la rupture ne se produit pas, on devrait laisser la teneur en eau se diminuer.

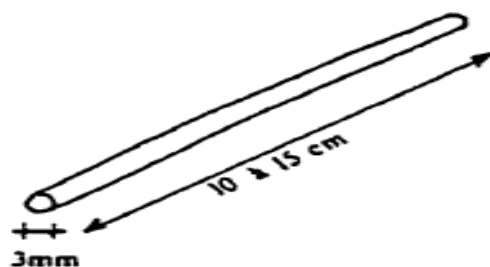


Figure 79 : Dimension du cylindre pour la détermination  $W_P$

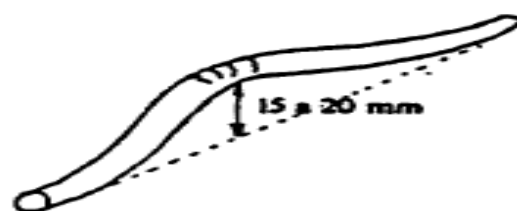


Figure 80 : Hauteur d'élévation du cylindre de 3 mm

Lorsque l'essai est probant, il est nécessaire de l'effectuer une deuxième fois. Les teneurs en eau obtenue ne devront pas s'écarter de plus de 2 % de la valeur moyenne.

### III-5-4- Calcul de l'indice de plasticité

L'indice de plasticité de l'échantillon d'argile étudié est obtenu à partir de la différence entre sa limite de liquidité et sa limite de plasticité, tel que :

$$I_P = W_L - W_P \quad [91]$$

Avec :

$I_P$  : l'indice de plasticité (%) ;

$W_L$  : la limite de liquidité (%) ; et

$W_P$  : la limite de plasticité (%).

### III-5-5- Calcul de la limite de retrait

Quant à la limite de retrait, elle est aussi calculée en fonction de la limite de liquidité ainsi que la limite de plasticité à l'aide de la relation :

$$W_S = 5,4 - 0,27W_L + W_P \quad [92]$$

Où :

$W_S$  : est la limite de retrait (%) ;

$W_L$  : la limite de liquidité (%) ; et

$W_P$  : la limite de plasticité (%).

## III-6- RÉSULTATS DE L'ESSAI

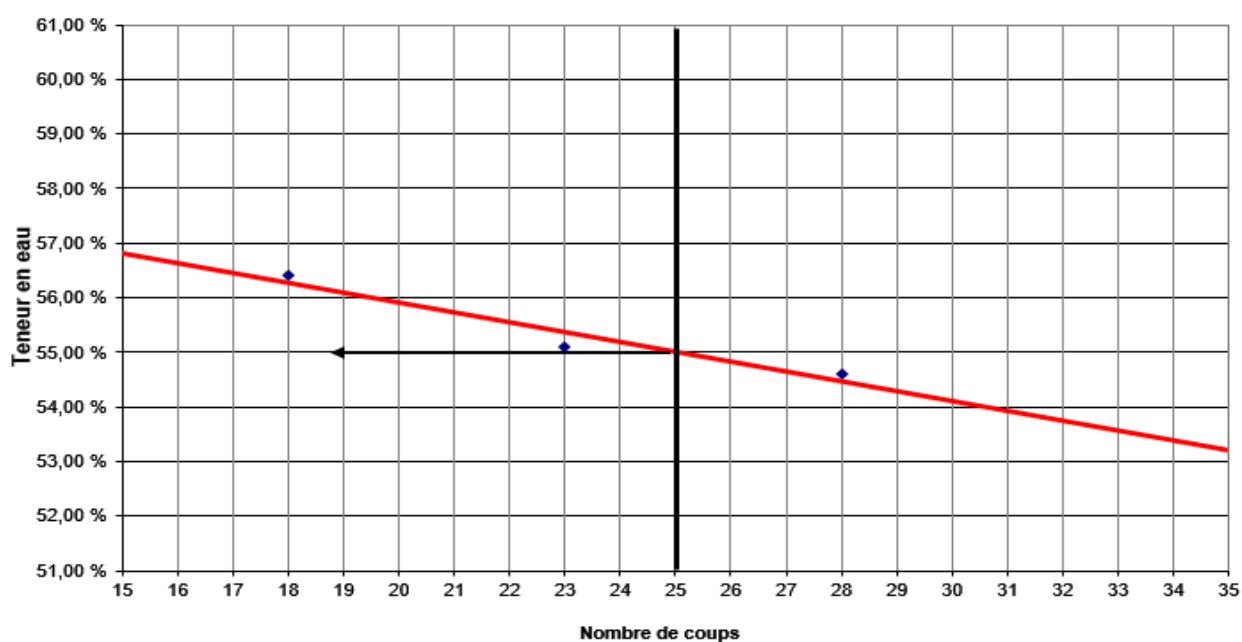
### III-6-1- Limite de liquidité $W_L$

Le nombre de coup ainsi que la teneur en eau, issus des résultats de pesage, utilisés pour déterminer la limite de liquidité de chaque prise d'échantillons sont donnés par le tableau 50 ci-dessous :

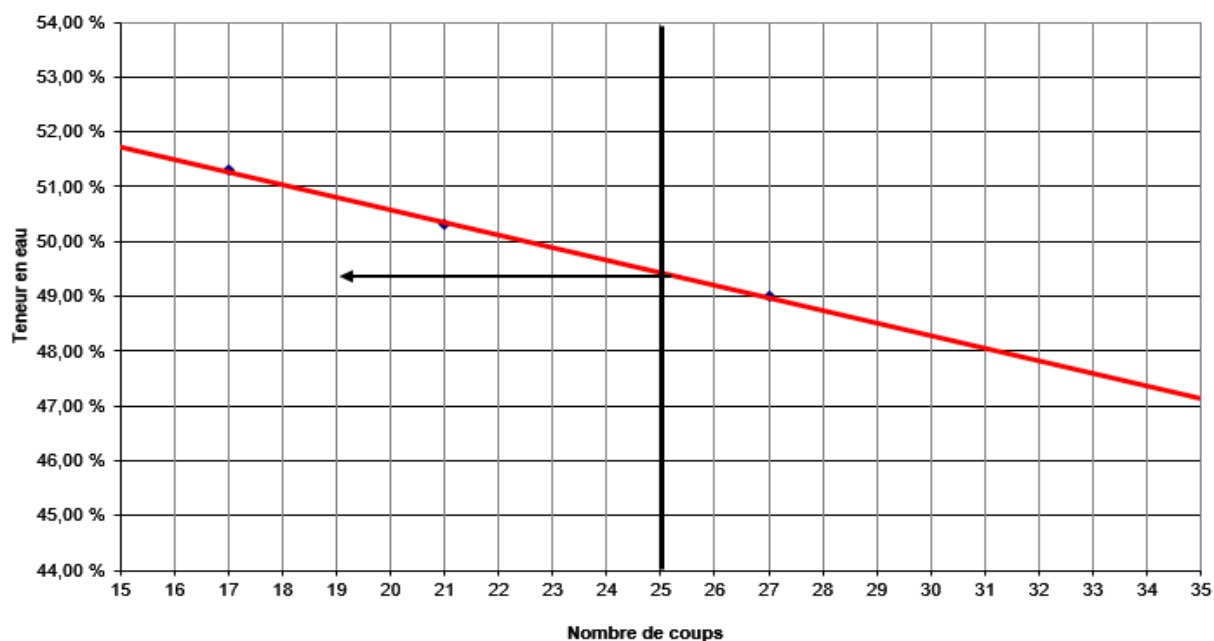
Tableau 50 : Nombre de coup et teneur en eau de chaque échantillon

|                    | Échantillon P <sub>1</sub> |         |         | Échantillon P <sub>2</sub> |         |         | Échantillon P <sub>3</sub> |         |         |
|--------------------|----------------------------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|----------------------------|---------|---------|
| Nombre de coups :  | 18                         | 23      | 28      | 17                         | 21      | 27      | 18                         | 23      | 29      |
| Tare n°            | E4                         | E1      | E       | F2                         | H1      | T4      | T1                         | F4      | H2      |
| Poids tare         | 9,97 g                     | 9,61 g  | 9,53 g  | 9,61 g                     | 9,62 g  | 9,53 g  | 9,98 g                     | 10,07 g | 9,60 g  |
| Poids total humide | 17,93 g                    | 17,94 g | 16,47 g | 16,04 g                    | 17,00 g | 16,55 g | 17,35 g                    | 18,99 g | 17,65 g |
| Poids total sec    | 15,06 g                    | 14,98 g | 14,02 g | 13,86 g                    | 14,53 g | 14,24 g | 14,63 g                    | 15,75 g | 14,74 g |
| Poids d'eau        | 2,87 g                     | 2,96 g  | 2,45 g  | 2,18 g                     | 2,47 g  | 2,31 g  | 2,72 g                     | 3,24 g  | 2,91 g  |
| Poids matériau sec | 5,09 g                     | 5,37 g  | 4,49 g  | 4,25 g                     | 4,91 g  | 4,71 g  | 4,65 g                     | 5,68 g  | 5,14 g  |
| Teneur en eau (W)  | 56,40 %                    | 55,10 % | 54,60 % | 51,30 %                    | 50,30 % | 49,00 % | 58,50 %                    | 57,00 % | 56,60 % |

En effet, la limite de liquidité ( $W_L$ ) de chaque échantillon, obtenue à partir de la relation 90 ci-dessus, en fonction de leur teneur en eau ( $W$ ) ainsi que du logarithme du nombre de coups correspondant est présentée successivement dans les graphiques qui suivent.



Graphe 27: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon  $P_1$



Graphe 28: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon  $P_2$



Graph 29: Courbe de la limite de liquidité de l'échantillon P<sub>3</sub>

On déduit à partir de ces graphiques que la limite de liquidité ( $W_L$ ) de chaque échantillon est respectivement de 55,00 % pour P<sub>1</sub>, 49,00 % pour l'échantillon P<sub>2</sub>, et 57,00 % celle de P<sub>3</sub>. Ainsi la limite de liquidité de l'argile d'Ambohitrimanjaka est estimée à 55,00 %.

### III-6-2- Limite de plasticité $W_p$

Quant à la limite de plasticité, les résultats des pesées, la teneur en eau correspondant à la rupture des cylindres remaniés, ainsi que la limite de plasticité relative à chaque prise d'échantillon sont données par le tableau 51 ci-dessous :

Tableau 51 : Résultats des pesées, teneur en eau des cylindres et  $W_L$  de chaque échantillon

|                                                                                | Échantillon P <sub>1</sub> |         | Échantillon P <sub>2</sub> |         | Échantillon P <sub>3</sub> |         |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
| Tare n°                                                                        | P21                        | X4      | L1                         | A1      | X11                        | A1      |
| Poids tare                                                                     | 22,20 g                    | 22,11 g | 21,98 g                    | 22,00 g | 21,93 g                    | 22,27 g |
| Poids total humide                                                             | 25,58 g                    | 26,69 g | 26,03 g                    | 26,35 g | 24,60 g                    | 25,06 g |
| Poids total sec                                                                | 24,65 g                    | 25,43 g | 24,98 g                    | 25,22 g | 23,83 g                    | 24,25 g |
| Poids d'eau                                                                    | 0,93 g                     | 1,26 g  | 1,05 g                     | 1,13 g  | 0,77 g                     | 0,81 g  |
| Poids matériau sec                                                             | 2,45 g                     | 3,32 g  | 3,00 g                     | 3,22 g  | 1,90 g                     | 1,98 g  |
| Teneur en eau W                                                                | 37,96 %                    | 37,95 % | 35,00 %                    | 35,09 % | 40,53 %                    | 40,91 % |
| <b>Limite de liquidité de l'Argile d'Ambohitrimanjaka : (<math>W_L</math>)</b> | <b>38,00 %</b>             |         | <b>35,00 %</b>             |         | <b>34,00 %</b>             |         |

Ainsi la limite de plasticité ( $W_p$ ) moyenne de l'argile d'Ambohitrimanjaka est estimée à 35,00 %

### III-6-3- Indice de plasticité et retrait de l'Argile d'Ambohitrimanjaka

L'indice de plasticité ( $I_P$ ) ainsi que la limite de retrait ( $W_s$ ) de l'argile d'Ambohitrimanjaka tirés successivement à partir des relations 91 et 92 sont donnés par le tableau 54 ci-dessous :

Tableau 52: Indice de plasticité et limite de retrait de l'argile d'Ambohitrimanjaka

| $I_P$   | $W_s$    |
|---------|----------|
| 20,00 % | 25, 55 % |

### III-7- SYNTHÈSE, VALIDATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Pour faciliter la lecture, la validation ainsi que l'interprétation des résultats, les comportements mécaniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka sont synthétisés dans le chronogramme de la figure ci-après.

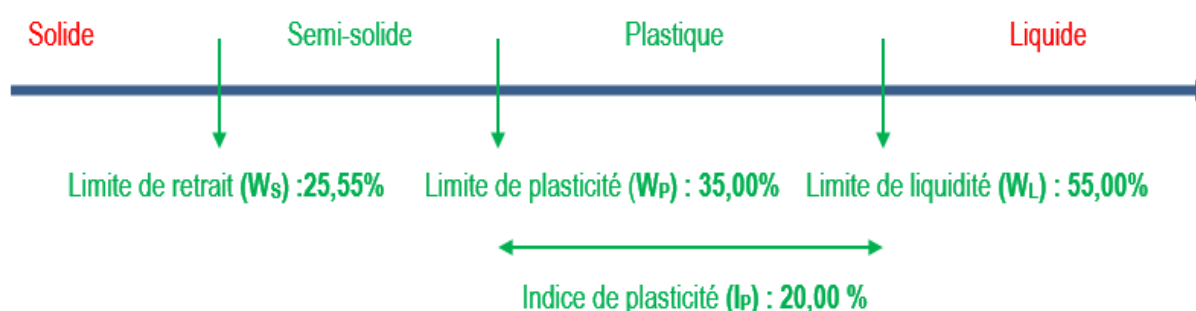


Figure 81: Comportements mécaniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka

La norme NF P 94 051 donne, dans le tableau 53 ci- après, les différentes classifications ainsi que les degrés de plasticité des sols argileux suivant leur indice de plasticité  $I_P$  :

Tableau 53 : Classification et degré de plasticité des sols argileux, suivant la norme NF P 94 051

| Indice de plasticité (%) | Type du sol           |
|--------------------------|-----------------------|
| $1 \leq I_P \leq 7$      | Sable argileux        |
| $7 \leq I_P \leq 17$     | Argile sablonneuse    |
| $17 \leq I_P$            | Argile                |
| Indice de plasticité (%) | Degré de plasticité   |
| $0 < I_P \leq 5$         | Non plastique         |
| $5 \leq I_P \leq 17$     | Moyennement plastique |
| $17 \leq I_P \leq 40$    | Plastique             |
| $40 \leq I_P$            | Très plastique        |

Donc, si on se réfère à ce tableau ainsi qu'aux différentes valeurs de comportement mécanique de l'argile parues dans la figure 81 ci-dessous, le sol destiné pour la fabrication des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka est une argile plastique, dont leur teneur en eau dans son état plastique varie entre 35 % pour  $W_P$  et 55 % pour  $W_L$ , soit un indice de plasticité  $I_P$  de 20 %.

Par rapport aux références de taux d'humidité (entre 25 % et 30 %) fixées dans [le graphe 6 du sous paragraphe II-4-4 du chapitre II de la première partie](#) de cet ouvrage, relatif à l'influence de la consistance

sur la durée de séchage de la brique artisanale en terre cuite, la teneur en eau de l'argile utilisée pour la fabrication des briques artisanale en terre cuite d'Ambohitrimanjaka est très élevée, les résultats de leurs degrés de plasticité cités ci-dessus en témoignent.

On a constaté sur place que le briquetier d'Ambohitrimanjaka n'a ni de matériel adéquat ni de formule de dosage précise pour diminuer cet excès d'eau. En effet, pour remédier à cette situation, il procède à un séchage de leur pâte d'argile à l'air libre. Dans ce cas, la condition de la maniabilité de ce matériau se base sur la propre expérience de chaque briquetier. Ce phénomène justifie les [suggestions géotechniques](#) avancées dans le sous-paragraphe IV-2 du chapitre II de la première partie ci-haut.

Quant à sa condition de dessiccation, toujours d'après la théorie exposée dans la référence de taux d'humidité sus-annoncée, la brique artisanale en terre crue d'Ambohitrimanjaka est donc sèche quand sa teneur en eau atteint la limite de retrait  $W_s$  égale à 25,55 %. Cette limite est atteinte dans une condition de séchage normal de sept (7) jours.

## CHAPITRE II- ÉVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DES PAROIS DU BÂTIMENT

### I - DESCRIPTION ARCHITECTURALE DU BÂTIMENT

La définition architecturale du bâtiment est une étape inévitable dans le processus de la simulation thermique d'un bâtiment, parce qu'elle attache les [paramètres architecturaux](#), liés aux paramètres de base de l'architecture bioclimatique du modèle, déballé dans V-5-6 du III<sup>e</sup> chapitre de la première partie de cet ouvrage. En répercussion, le modèle à étudier s'agit d'un bâtiment familial disposé de 3 niveaux (R+2), de forme rectangulaire, ayant une longueur de 15,95 m et d'une largeur de 8,25 m, épouse le type architectural traditionnel de la capitale de Madagascar. L'aspect extérieur de ses différentes façades comporte :

- Des murs porteurs en brique artisanale en terre cuite, d'épaisseur 35 cm, enduits sur les deux faces, conformes à l'article C- 1.126 de la section B, conformes aux règlements sanitaires relatifs à l'habitation, du TBM ;
- Des fenêtres extérieures en bois dur et des châssis vitrés, surmontées par des auvents de 40 cm de profondeur dans les parties saillantes de la façade principale ainsi que dans les deux façades latérales ;
- Des portes en bois dur ;
- D'un éclairage en brique de verre dans la façade postérieure de la RDC ;
- Deux mini-fenêtres persiennées pour la ventilation des salles des douches et w.c. de l'étage ;
- D'une véranda pour le premier étage ;
- D'une terrasse pour le deuxième niveau ;
- D'une toiture à deux versants en Tôle Galvabac, et ayant un débord de 40 cm par rapport aux murs extérieurs ;
- Une grande cheminée pour l'évacuation des fumées de la cuisine.

Comme illustrent les plans de la page suivante.

Et les différentes hauteurs sous plafond de chaque niveau, données dans le tableau ci-après, prises pour la simulation thermique du model de bâtiment sont conformes à l'article 158 de la section IV, relatives aux règles sanitaires et de sécurité, du code de l'urbanisme et de l'habitat de Madagascar.

Tableau 54 : Hauteur de chaque niveau du bâtiment

| Niveau du bâtiment         | Hauteur du niveau |
|----------------------------|-------------------|
| RDC                        | 3,00 m            |
| Étage 01                   | 3,00 m            |
| Étage 02                   | 2,50 m            |
| Pignons (Toiture rampante) | 1,50 m            |



Photo 31 : Façade principale



Photo 32 : Façade latérale droite



Photo 33 : Façade postérieure



Photo 34 : Façade latérale gauche

## II - HYPOTHÈSES THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX CONSTITUANT L'ENVELOPPE DU MODÈLE DU BÂTIMENT

### II-1- POUR LES PAROIS OPAQUES

La théorie des [paramètres physicothermiques](#), détaillée dans f du sous-paragraphe IV-7-2 du chapitre III de la partie I précédente, montre que la détermination des autres paramètres thermiques d'un matériau dépend essentiellement de la connaissance de leur capacité thermique ainsi que de leur conductivité thermique. Par conséquent, la masse volumique, les capacités ainsi que la conductivité thermique des autres matériaux composites constituant chaque type d'enveloppe comme les dallages, les planchers, les toitures, etc. retenues dans l'hypothèse du logiciel, se baseront sur les valeurs standards dans le catalogue préétabli et déjà incorporé par l'ASHRAE dans le logiciel Archicad. Tandis que pour les murs, on a intégré dans le paramètre du logiciel les valeurs estimées de ces paramètres des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, retenues comme hypothèse et constituent aussi le centre d'intérêt de l'étude de la présente thèse, dans la constitution des parois opaques du modèle de bâtiment étudié. Donc avant de fixer

les paramètres physicothermiques des autres matériaux composites constituant chaque type de l'enveloppe du bâtiment, on va estimer d'abord ceux des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka.

Puisqu'Ambohitrimanjaka est la première productrice de briques artisanales en terre cuite utilisées dans la construction des bâtiments de la capitale de Madagascar, c'est la raison pour laquelle nous avons opté pour les échantillons des briques choisis pour l'estimation, dont leurs caractéristiques physiques sont données par le tableau 55 ci-dessous.



Photo 35 : Échantillon des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka

Tableau 55 : Caractéristiques physiques des échantillons

| Caractéristiques physiques | Norme maximale décrite dans le TBM | Échantillon N° 01       | Échantillon N° 02       | Échantillon N° 03       |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Longueur (L)               | 0,20 m                             | 0,17 m                  | 0,17 m                  | 0,17 m                  |
| Largeur (l)                | 0,10 m                             | 0,08 m                  | 0,08 m                  | 0,08 m                  |
| Épaisseur (e)              | 0,09 m                             | 0,08 m                  | 0,08 m                  | 0,08 m                  |
| Masse (M)                  | 2, 50 Kg                           | 1,60 Kg                 | 1,34 Kg                 | 1,32 Kg                 |
| Masse volumique ( $\rho$ ) | 1 389 kg/m <sup>3</sup>            | 1 418 kg/m <sup>3</sup> | 1 237 kg/m <sup>3</sup> | 1 234 kg/m <sup>3</sup> |

On retient à partir du tableau ci-dessus que les dimensions physiques des briques artisanales d'Ambohitrimanjaka sont inférieures à celles qui sont inscrites dans le TBM. Pourtant, l'ASHRAE, par l'intermédiaire du catalogue des paramètres thermophysiques de matériaux de l'Archicad, définit la masse volumique des briques en terre cuite entre l'intervalle 600,00 kg/m<sup>3</sup> à 1500,00 kg/m<sup>3</sup>. De cette manière, la masse volumique des briques malgaches prédéfinie par le TBM ainsi que celle des échantillons des briques retenues (en moyenne 1 296 Kg/m<sup>3</sup>) sont donc valides. Et ces types de matériau peuvent être utilisés pour estimer la conductivité thermique ainsi que la capacité thermique des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, pris comme hypothèse dans la constitution des parois composites du modèle du bâtiment étudié.

Puisque la densité ainsi (que) la porosité des briques en terre cuite dépendent essentiellement de la condition de pressage durant le processus de la construction. Elhusna, Ade Sri Wahyuni et Agustin Gunawan justifient cette hypothèse dans leur publication relative au « 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials 2014 (SCESCM 2014) », intitulée : « Performance of clay brick of Bengkulu ». Dans laquelle ils mettent en exergue les compressibilités, mesurées des échantillons des briques artisanales en terre cuite de Selebar et Muara Bangkahulu. Cette situation a des percussions sur les propriétés physiques et thermophysiques de ces matériaux, notamment

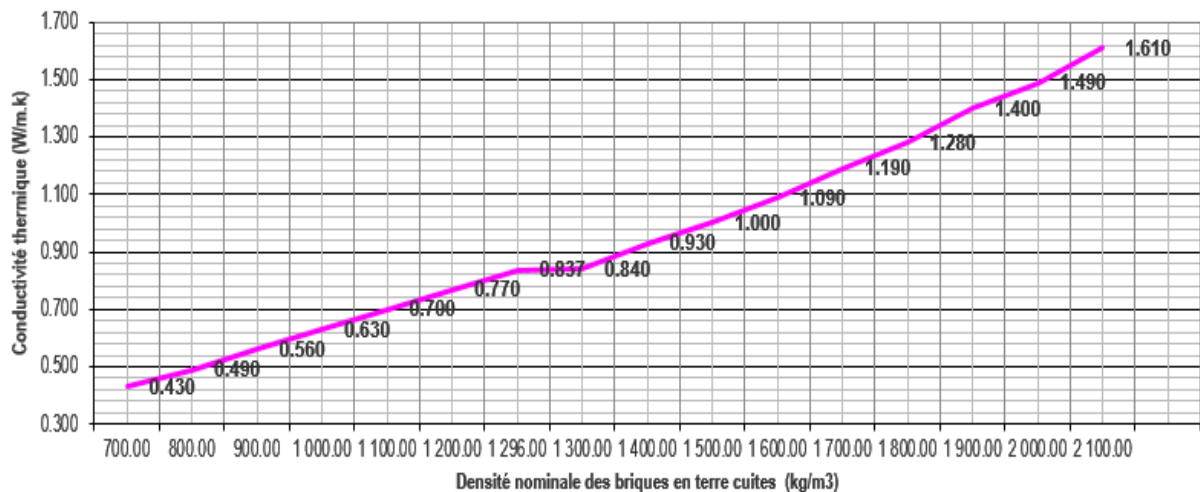
sur leur capacité thermique ainsi que leur conductivité thermique. Cette deuxième hypothèse est justifiée par les données relatives à la capacité thermique ainsi que la conductivité thermique, en fonction de leurs masses volumiques, des briques en terre cuite, énoncées dans le tableau 59 ci-dessous, extrait par EnergyPlus dans l'AGW du 17 avril 2008, Annexe A de l'Annexe VII, consultable sur : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348>, et agréée par la NBN B 62-002 + addenda, Agrément consultable sur : <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10270>, largement utilisés dans les logiciels de simulation de confort thermique comme : Archicad ,par l'intermédiaire de l'ASHRAE, EnergyPlus, Codynrun, CypeTherm (s), etc.

Tableau 56 : Conductivité thermique et capacités thermiques des briques artisanales en terre cuite selon EnergyPlus

| La chaleur massique C : 1 000 J/ (kg. K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                           |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m <sup>3</sup> )                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $\lambda_{ui}$<br>W/(m.K) | $\lambda_{ue}$<br>W/(m. K) |
| Masse volumique nominale <sup>75</sup> 700 : $\rho \leq 700$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,22                      | 0,43                       |
| Masse volumique nominale 800 : $700 < \rho \leq 800$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,25                      | 0,49                       |
| Masse volumique nominale 900 : $800 < \rho \leq 900$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,28                      | 0,56                       |
| Masse volumique nominale 1 000 : $900 < \rho \leq 1\,000$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,32                      | 0,63                       |
| Masse volumique nominale 1 100 : $1\,000 < \rho \leq 1\,100$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,35                      | 0,70                       |
| Masse volumique nominale 1 200 : $1\,100 < \rho \leq 1\,200$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,39                      | 0,77                       |
| <b>Masse volumique nominale 1 300 : <math>1\,200 &lt; \rho \leq 1\,300</math></b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>0,42</b>               | <b>0,84</b>                |
| Masse volumique nominale 1 400 : $1\,300 < \rho \leq 1\,400$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,47                      | 0,93                       |
| Masse volumique nominale 1 500 : $1\,400 < \rho \leq 1\,500$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,51                      | 1,00                       |
| Masse volumique nominale 1 600 : $1\,500 < \rho \leq 1\,600$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,55                      | 1,09                       |
| Masse volumique nominale 1 700 : $1\,600 < \rho \leq 1\,700$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,60                      | 1,19                       |
| Masse volumique nominale 1 800 : $1\,700 < \rho \leq 1\,800$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,65                      | 1,28                       |
| Masse volumique nominale 1 900 : $1\,800 < \rho \leq 1\,900$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,71                      | 1,40                       |
| Masse volumique nominale 2 000 : $1\,900 < \rho \leq 2\,000$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,76                      | 1,49                       |
| Masse volumique nominale 2 100 : $2\,000 < \rho \leq 2\,100$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0,81                      | 1,61                       |
| <p>Rappelons que :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\lambda_{u,i}</math> : est la conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi intérieure ou dans une paroi extérieure, à condition que ce matériau soit protégé contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation ; tandis que</li> <li>- <math>\lambda_{u,e}</math> : la conductivité thermique utilisée pour un matériau dans une paroi extérieure qui n'est pas protégée contre l'humidité due à la pluie ou à la condensation, comme le cas du modèle de bâtiment de la présente thèse.</li> </ul> |                           |                            |

<sup>75</sup> Dénomination issue de la réglementation Thermique 2000 : « Règles Th-U - Fascicule 2 : Matériaux »

En comparant les valeurs déclarées par EnergyPlus, dans le tableau ci-dessus, avec les données, relatives aux conductivités thermiques, des briques en terre cuite, soulevés dans la réglementation Thermique 2000 : « Règle Th-U - Fascicule 2 : Matériaux », page 07, (cf. document du CDREEF V.03.00) ainsi que les catalogues intégrés dans les logiciels suscités, nous nous sommes rendu compte que les valeurs des capacités thermiques mises en exergue ainsi qu'exploitées par lesdits logiciels correspondent aux grandeurs de  $\lambda_{u,i}$  liées aux densités sèches des briques. J.A. Clarke, P. P. Yaneske, et A. A. Pinney donnent des plus amples informations dans leur publication intitulée « The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials » sur les normes utilisées ainsi que les températures des mesures des densités sèches des briques, relatives à leurs poids volumiques respectifs, pris pour obtenir ces valeurs. Alors que les échantillons des briques retenues, dont leurs caractéristiques intégrées dans les murs de modèle du bâtiment, n'ont subi aucune dessiccation pour dégager la teneur en eau qui y est contenue. De plus, pour être considéré comme étanche à la pluie, un mur plein traditionnel en brique doit être protégé par un enduit imperméable à sa face extérieure. En effet, dans une maçonnerie en brique, l'eau s'infiltre par les défauts des joints ou entre joints et briques ainsi que par les microfissures présentes dans les briques. D'autre part, les briques et les joints absorbent l'eau par capillarité. Ainsi, un mur d'une brique, surtout s'il est exposé aux pluies battantes, ne peut, à lui seul, empêcher les infiltrations [Energyplus]. C'est pourquoi on a décidé de prendre les grandeurs des conductivités thermiques  $\lambda_{u,e}$  déclarées par EnergyPlus pour étudier les performances thermiques des parois de modèle du bâtiment. L'extrapolation mathématique des densités autour du poids volumique moyenne, de 1296 kg/m<sup>3</sup>, des échantillons des briques d'Ambohitrimanjaka, liés à leurs conductivités thermiques respectives, à partir des données révélées par EnergyPlus ci-dessus a permis de sceller la valeur estimative des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka équivaut à 0,837 W/m. K. En effet, les différentes valeurs des conductivités thermiques des briques artisanales en terre cuite, soulevées par EnergyPlus en fonction de leur poids volumique, avec la prise en compte de la conductivité thermique estimée des briques artisanales en terre cuite peuvent être maintenant lues dans la courbe ci-après :



Graph 30 : Variation de la conductivité thermique des briques artisanes en terre cuite, selon EnergyPlus, avec la prise en compte de la valeur estimée de celui d'Ambohitrmanjaka.

Quant à la capacité thermique des briques en terre cuite, la réglementation Thermique 2000, EnergyPlus ainsi que les catalogues de matériaux exploités par les logiciels EnergyPlus, Codyrun, CypeTherm (s) déclarent une même valeur de 1 000 J/ (kg. K). Donc on va prendre aussi cette valeur pour évaluer la qualité isolante des parois de modèle du bâtiment et pour estimer, en conséquence, l'orientation optimale recherchée.

Pour obtenir, ainsi, [les performances thermophysiques des parois](#), il faut d'abord modéliser l'enveloppe structurelle et le fenêtrage du bâtiment ainsi que toutes les structures intérieures principales qui présentent une inertie thermique importante dans chaque local. Par conséquent, la nature, les dimensions respectives de chaque couche constituant les structures composites de chaque type d'élément de l'enveloppe et propre à chaque corps d'ouvrage du bâtiment, avec leurs conductivités thermiques, leurs capacités thermiques ainsi que leurs densités prisent comme hypothèses pour évaluer les performances des parois, développées dans le sou-paragraphe III de la présente partie, seront inventoriées dans le tableau 57 ci-après

Tableau 57 : Les éléments constructifs du bâtiment

| Corps d'ouvrage   | Élément            | Nature des matériaux/Épaisseur nominale                                               | Conductivité thermique ( $\lambda$ ) (W/m. K) | Capacité thermique (Cp) (J/(Kg. K)) | Masse volumique ( $\rho$ ) (kg/m³) |
|-------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Parois verticales | Parois extérieures | Enduit en mortier de ciment dosé à 350 Kg/m 3 de ciment CEM I 42,5 MPa, ép. : 1,50 cm | 1,00                                          | 1 000,00                            | 1 800,00                           |

|  |                                                                |                                                                                                        |                     |          |          |
|--|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------|----------|
|  |                                                                | Brique artisanale en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, hourdée au mortier de terre rouge, ép. : 32,00 cm | 0,837 <sup>76</sup> | 1 000,00 | 1 296,00 |
|  |                                                                | Enduit en mortier de ciment dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,5 MPa, ép. : 1,50 cm       | 1,00                | 1 000,00 | 1800,00  |
|  |                                                                | Couche de finition en enduit de type baissier, ép. : 2,00 mm                                           | 0,57                | 1 000,00 | 1 300,00 |
|  | Paroi interne                                                  | Couche de finition en enduit de type baissier, ép. : 2,00 mm                                           | 0,57                | 1 000,00 | 1 300,00 |
|  |                                                                | Enduit en mortier de ciment dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,5 MPa, ép. : 1,50 cm       | 1,00                | 1 000,00 | 1800,00  |
|  |                                                                | Brique artisanale en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, hourdée au mortier de terre rouge, ép. : 32,00 cm | 0,837               | 1 000,00 | 1 296,00 |
|  |                                                                | Enduit en mortier de ciment dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,5 MPa, ép. : 1,50 cm       | 1,00                | 1 000,00 | 1800,00  |
|  |                                                                | Couche de finition en enduit de type baissier, ép. : 2,00 mm                                           | 0,57                | 1 000,00 | 1 300,00 |
|  | Paroi interne :<br>Séparation entre<br>Sanitaire et<br>couloir | Couche de finition en enduit de type baissier, ép. : 2,00 mm                                           | 0,57                | 1 000,0  | 1 300,00 |
|  |                                                                | Enduit en mortier de ciment dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment                                     | 1,00                | 1 000,00 | 1800,00  |

<sup>76</sup> Valeur estimée pour les briques artisanales en terres cuites d'Ambohitrimanjaka

|           |                                                           |                                                                                                                 |       |          |          |
|-----------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|----------|
|           |                                                           | CEM I 42,5 MPa, ép. :<br>1,50 cm                                                                                |       |          |          |
|           |                                                           | Brique artisanale en terre<br>cuite d'Ambohitrimanjaka,<br>hourdée au mortier de terre<br>rouge, ép. : 32,00 cm | 0,837 | 1 000,00 | 1 296,00 |
|           |                                                           | Enduit en mortier de ciment<br>dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment<br>CEM I 42,5 MPa, ép. :<br>1,50 cm       | 1,00  | 1 000,00 | 1800,00  |
|           |                                                           | Couche de finition en enduit<br>de type baissier, ép. :<br>2,00 mm                                              | 0,57  | 1 000,00 | 1 300,00 |
|           | Garde-corps                                               | Enduit en mortier de ciment<br>dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment<br>CEM I 42,5 MPa, ép. :<br>1,50 cm       | 1,00  | 1 000,00 | 1800,00  |
|           |                                                           | Brique artisanale en terre<br>cuite d'Ambohitrimanjaka,<br>hourdée au mortier de terre<br>rouge, ép. : 8,00 cm  | 0,837 | 1 000,00 | 1 296,00 |
|           |                                                           | Enduit en mortier de ciment<br>dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment<br>CEM I 42,5 MPa, ép. :<br>1,50 cm       | 1,00  | 1 000,00 | 1800,00  |
| Planchers | Dallage avec<br>carreaux sur<br>terre pleine<br>(Couloir) | Carreaux de classe PEI 3<br>ép. : 8,00 mm                                                                       | 1,500 | 900,00   | 2 000,00 |
|           |                                                           | Dallage en Béton ordinaire<br>dosé à 300 Kg/m <sup>3</sup> de ciment<br>CEM I, ép. : 10,00 cm, MPa              | 1,70  | 800,00   | 2300,00  |
|           |                                                           | Hérissonnage en pierre sèche<br>de dimension 40/70, ép. :<br>10,00 cm                                           | 1,400 | 1 000,00 | 1 800,00 |
|           |                                                           | Remblai en terre compacté<br>(argile limoneuse), ép. :<br>20,00 cm                                              | 1,400 | 1400,00  | 1 900,00 |

|  |                                                                                    |                                                                                                                                                              |       |          |           |
|--|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|-----------|
|  | Dallage sans carreaux sur terre pleine<br>(Chambres RDC et grande salle)           | Chape en béton ordinaire dosé 400 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,50 MPa, ép. : 2,00 mm                                                                 | 1,70  | 800,00   | 2 300,00  |
|  |                                                                                    | Dallage en Béton ordinaire dosé à 300 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I, ép. : 10,00 cm, MPa                                                                 | 1,70  | 800,00   | 2 300,0   |
|  |                                                                                    | Hérissonnage en pierre sèche de dimension 40/70, ép. : 10,00 cm                                                                                              | 1,40  | 1 000,00 | 1 800,00  |
|  |                                                                                    | Remblai en terre compacté (argile limoneuse), ép. : 20,00 cm                                                                                                 | 1,40  | 1400,00  | 1 900,00  |
|  | Plancher en dalle pleine, intermédiaire<br>(Couloir, véranda, terrasse et cuisine) | Carreaux de classe PEI 3 <sup>77</sup> ép. : 8,00 mm                                                                                                         | 1,50  | 900,00   | 2 000,00  |
|  |                                                                                    | Dalle pleine en béton armé dosé à 350 Kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,50 MPa, ép. : 10,00 cm                                                            | 2,50  | 2 400,00 | 1 000,00  |
|  |                                                                                    | Enduit de pose de carreaux en mortier de ciment dosé à 400 Kg/m <sup>3</sup> de ciment dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,50 MPa, ép. : 1,50 cm | 1,00  | 1 000,00 | 1 8000,00 |
|  | Plancher en parquet, intermédiaire<br>(chambres)                                   | Parquet en bois dur ayant un taux d'humidité relative inférieur à 12%, ép. : 1,50 cm                                                                         | 0,140 | 600,00   | 2 300,00  |
|  |                                                                                    | Vide sous plancher, ép. : 17,00 cm                                                                                                                           | 0,15  | 1 008,00 | 1,20      |
|  |                                                                                    | Plafond en lattes, crépissé puis enduisé avec un mortier de ciment dosé à 350 kg/m <sup>3</sup> de ciment CEM I 42,50 MPa, ép. : 1,50 cm                     | 2,30  | 1 000,00 | 2 300,00  |

<sup>77</sup> Selon la norme NF EN 14411

|         |                  |                                                                                           |        |          |           |
|---------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|-----------|
|         |                  | Couche de finition en enduit de type baissier, ép. : 2,00 mm                              | 0,57   | 1 000,00 | 1 300,000 |
| Toiture | Toiture rampante | Tôle ondulée de type galvabac, ép. : 30/100 <sup>e</sup>                                  | 110,00 | 380,00   | 7 200,00  |
|         |                  | Vide sous toiture, ép. : 17,00 cm                                                         | 0,15   | 1 008,00 | 1,20      |
|         |                  | Plafond en volige de pin ayant un taux d'humidité relative inférieur à 12%, ép. : 1,50 cm | 0,13   | 1 600,00 | 500,00    |

Et enfin pour l'[infiltration](#) de ces mêmes parois, le futur bâtiment est un logement individuel, en effet selon les informations fournies par le tableau 17 ci-dessus, on va prendre la valeur d'infiltration obligatoire, de 0,6 m<sup>3</sup>/ (h.m<sup>2</sup>), fixée à la fois par le Label Effinergie ainsi que la norme RT 2012.

Les paramètres thermophysiques des matériaux conditionnent les performances thermiques des parois, donc influent aussi sur les confort thermiques de l'ensemble du bâti. C'est pourquoi l'évaluation des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment, développée ci-dessous, est un passage obligatoire pour atteindre le but fixé dans l'[objectif et intérêt scientifique du sujet](#).

## II-2- POUR LES OUVERTURES

Puisque les parois opaques ainsi que les ouvertures du bâtiment interagissent pour conditionner le confort thermique d'un local. En conséquence, [le coefficient de transmission thermique \(U\)](#) de chaque type de matériaux constituant les ouvertures du bâtiment, données par le tableau 58 ci-dessous, doit être défini pour raffiner [la simulation du confort thermique du bâtiment](#) réalisée et exhortée dans le chapitre III de la présente partie, ci-dessous. Pour cela, on a utilisé également les données standards du catalogue de l'ASHRAE déjà intégrées dans le logiciel Archicad.

Tableau 58 : Coefficient de transmission thermique des ouvertures

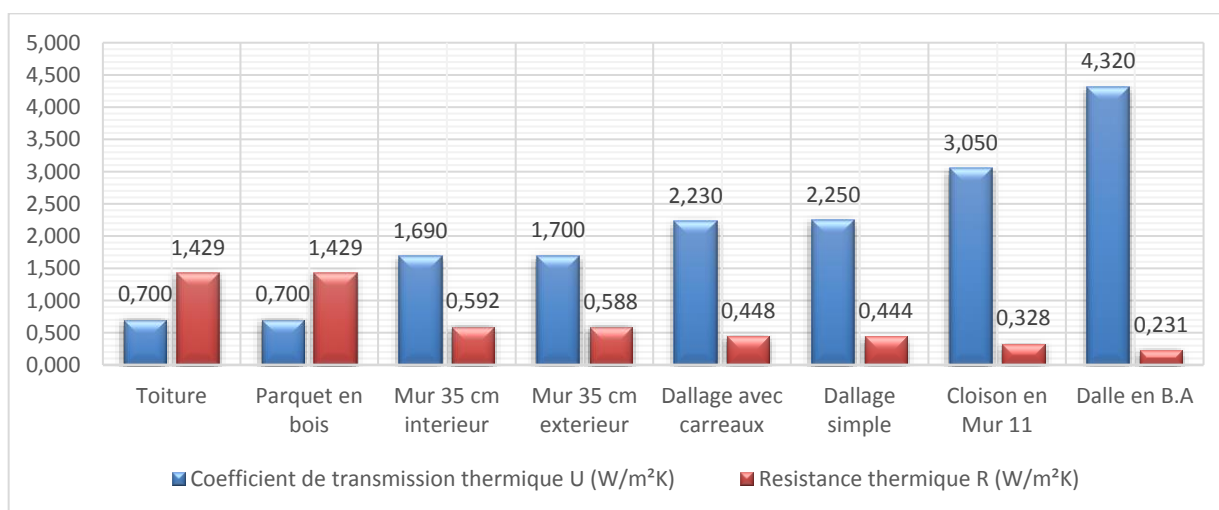
| Matériaux                                       | Coefficient de transmission thermique U (W/m <sup>2</sup> . K) |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Vitrage des portes et fenêtres internes (clair) | 5,8                                                            |
| Cadre des portes et fenêtres vitrées            | 1,8                                                            |
| Portes en bois                                  | 3,17                                                           |

Et pour les surfaces de ces types d'ouvertures, on a pris le critère fixé destiné pour la surface ouvrante des baies des pièces d'habitation, égale à au moins au huitième (1/8<sup>e</sup>) de celle de la pièce, sans pouvoir être inférieure à 1 m<sup>2</sup>, fixé à la fois par l'article 160 de la section IV, relatif aux règles sanitaires et de sécurité, du code de l'urbanisme et de l'habitat de Madagascar ainsi que par l'article 17.4 de la section B du TBM.

### III - PERFORMANCE THERMOPHYSIQUE DES PAROIS DU MODÈLE DE BÂTIMENT

#### III-1- POUR LES PAROIS OPAQUES

À part l'exploitation des données mises en vigueur par l'hypothèse thermophysique ci-dessus, pour obtenir les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment, on a emprunté aussi les coefficients de transfert de chaleur externe ( $h_e$ ) et interne ( $h_i$ ) selon l'hypothèse prédite dans le tableau 17 ci-haut. Dans cette condition, on fixe  $h_e = 16,70$  pour les murs externes ayant un contact direct avec le rayonnement solaire et  $h_i = 9,00$  pour les murs intérieurs. En effet, en exploitant la relation 29 pour la résistance thermique, la relation 31 ou 32 pour le coefficient de transmission thermique, l'ASHRAE, par l'intermédiaire d'Archicad, a procuré les performances thermophysiques de chaque type de l'enveloppe du bâtiment allant du sol d'assise à la couverture, dont leur valeur classée par ordre de performance de transmission thermique respective est donnée par le graphe 31 ci-après :



Graphe 31: Performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment

Pour l'[absorbance solaire](#) des parois exposées directement ou par l'intermédiaire des ouvertures, comme les murs extérieurs, la toiture, les parquets en bois dur, les dallages ainsi que les dalles pleines en béton armé, sa valeur dépend à la fois de la résistance thermique, du coefficient de transmission thermique ainsi que du coefficient d'absorption «  $\alpha$  » de ces mêmes parois, parce qu'elle est le produit de ces trois paramètres. Et par supposition, le futur bâtiment aura en général une couleur foncée, donc on va prendre  $\alpha = 0,7$  selon l'information fournie par le tableau 16 ci-haut. En effet, à partir de la relation 37, on obtient l'absorbance solaire de 70,00% à utiliser comme hypothèse dans la simulation thermique du modèle du bâtiment étudié. Cette valeur signifie que 70,00 % du rayonnement solaire transmis et intercepté par l'enveloppe extérieure du bâtiment seront [absorbés](#) par le mur. En effet, 30 % de ce rayonnement sont soit [réfléchis](#), soit [diffus](#). Ce rayonnement diurne sera donc prisonnier dans la paroi, se transforme en chaleur par convection et augmentera en effet la température nocturne du local. L'absorbance solaire des murs internes est nulle parce qu'ils ne subissent pas le rayonnement direct du soleil.

### III-1-1-Validation, analyse et interprétation des résultats

Premièrement, pour le coefficient de transmission thermique ( $U$ ) de l'enveloppe d'un bâtiment, la norme de l'ASHRAE prévoit leur valeur théorique entre l'intervalle de  $[0,04 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ à } 28,01 \text{ W/m}^2\text{K}]$ . En conséquence, les résultats de ce paramètre thermique, compris entre  $0,700 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ à } 4,320 \text{ W/m}^2\text{K}$ , figurés dans le diagramme du graphique 30 ci-haut sont valides. Et on déduit à partir du graphique ci-dessous que la toiture ainsi que le parquet en bois sont le plus performants, quant à la transmission thermique des flux thermiques, égale à  $0,700 \text{ W/m}^2\text{K}$ , au niveau des parois des locaux du bâtiment, à cause de la présence des vides ainsi que des densités massiques les couche de matériaux composites qui lui compose. Et la dalle pleine en béton armé est le moins performant, avec une valeur de coefficient thermique de  $4,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ , dus aux densités massiques plus élevées dans leur composition.

Deuxièmement, ce qui est de la résistance thermique ( $R$ ) des parois des locaux du bâtiment, sa valeur dépend du coefficient de transmission thermique  $U$  puisqu'elle est l'inverse de cette dernière. La norme citée ci-dessus retient les valeurs théoriques de ce paramètre thermophysique des parois entre  $[0,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \text{ et } 2,66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}]$ . En conséquence, par analogie à la validation des résultats des coefficients de transmission thermiques des parois ci-dessus, les résultats des résistances des parois du bâtiment figurées dans le graphique ci-dessus sont aussi homologués. La classification de la capacité à ralentir le transfert de chaleur par conduction aux parois du bâtiment est donc inversement proportionnelle à celui des résultats obtenus de leurs coefficients de transmission thermiques.

Et enfin, puisque le thème de la présente thèse est l'« étude de confort thermique d'un bâtiment en briques artisanales d'argile cuite naturellement ventilée : détermination de l'orientation optimale ». Cela signifie que l'intérêt de la recherche mis en exergue dans le présent ouvrage, va se focaliser aussi sur la connaissance des performances thermophysiques des murs maçonnés avec les briques artisanales en terre cuite, notamment celui d'Ambohitrimanjaka, dont leur conductivité thermique, leur capacité thermique ainsi que leur densité massique, prises pour conduire la simulation thermique du modèle de bâtiment, ont été estimées dans la partie II, concernant l'[hypothèse thermophysique des matériaux](#), ci-dessus. De plus, les performances thermiques des parois du bâtiment fournies dans le graphique 30 ci-haut, à part celles des murs en briques artisanales en terre cuite, sont attachées aux valeurs des conductivités thermiques, des capacités thermiques ainsi que des masses volumiques standards fixées dans l'hypothèse citée ci-haut. C'est pourquoi l'analyse et l'interprétation des résultats du présent objet d'étude de l'actuel chapitre foncent un peu plus profond sur ce type de l'enveloppe. Dans cette optique, premièrement, on reçoit à partir de la partie de la connaissance théorique que la résistance thermique globale d'un mur composite dépend de la conductivité de chaque matériau constituant ce mur (cf. la relation 30). Or on a vu dans l'hypothèse, exposée dans le tableau 57 ci-dessus que même si le mur extérieur ainsi que le mur intérieur de chaque local du bâtiment sont de même épaisseur de 35 cm, ils sont différenciés par le type de leur enduit : en

mortier de ciment simple pour l'extérieur et en mortier de ciment surmonté d'enduit de plâtre pour l'intérieur, de même pour la cloison en mur 11 cm de la douche et les w.c. En effet, on en déduit que la résistance thermique d'une paroi ne dépend pas seulement de la conductivité thermique des matériaux qui la constituent, mais aussi de la nature ainsi que l'épaisseur de l'enveloppe considérée. En outre, les résultats obtenus des coefficients de transmission thermique de  $1,70 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour les murs extérieurs ;  $1,69 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour les murs intérieurs et  $3,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour le mur 11 exposés dans le graphe 33 ci-dessus, soulèvent la meilleure performance thermique, par rapport aux valeurs extrêmes fixées par l'ASHRAE énumérés ci-haut, des murs construits avec les briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka. Mêmes circonstances pour les résultats obtenus des résistances thermiques de ces mêmes types des murs :  $0,588 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour les murs externes et  $0,592 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour les murs internes d'épaisseurs 35 cm et  $0,328 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  pour les murs internes d'épaisseurs 11 cm et la non-déperdition des chaleurs dans les parois des locaux constitués par les murs en briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka sera garantie.

Pour l'ensemble des résultats de coefficient de transmission thermique trouvés, on déduit à partir des grandeurs avancées par l'ASHRAE, dans f-1-5 du sous-paragraphe IV-7 du III<sup>e</sup> chapitre de la partie théorique, que les valeurs obtenues sont très élevées, dont leurs surplus par rapport aux performances des murs de modèle du bâtiment exploité dans la présente thèse sont donnés par le tableau ci-après :

Tableau 59 : Différence entre les valeurs de conductivités thermiques des murs de modèle du bâtiment par rapport aux valeurs déclarées par l'ASHRAE

| Épaisseur (cm) de mur en brique en terre cuite | U (W/ K. m <sup>2</sup> ) selon l'ASHRAE | U trouvé (W/ K. m <sup>2</sup> )                             | Différence (W/ K. m <sup>2</sup> )                              |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 11,00                                          | 0,689                                    | 3,050                                                        | + 2 ,361                                                        |
| 35,00                                          | 0,389                                    | 1,700 pour les murs externes et 1,690 pour les murs internes | + 1,306 pour les murs externes et +1,301 pour les murs internes |

Par analogie à l'analyse effectuée relative aux valeurs des conductivités thermiques exposées dans le sous-paragraphe III-1, relatives aux hypothèses thermophysiques des matériaux, du chapitre II de la présente partie, les valeurs déclarées par cette association sont aussi des coefficients de transmission thermique des briques en terre cuite étuvées, dont leur teneur en eaux, est nulle. Cette hypothèse intensifie la validité des valeurs des coefficients de transmission thermique trouvées.

### III-2- POUR LES OUVERTURES

Comme dans les structures, la détermination préalable du coefficient de transmission thermique (U) des matériaux constituant les baies ainsi que les portes du bâtiment, en exploitant respectivement la relation 39, 46 et 47, relatives à la théorie des parois vitrées annoncée dans f-2-1 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, dans les hypothèses de la simulation, permet aussi d'accéder et d'obtenir, en

conséquence, les résultats de l'analyse solaire des vitrages notamment [les facteurs solaires \(S\)](#) ainsi que [la perméabilité à l'air \(Q\)](#) propre à chaque type d'élément d'ouverture.

## V-2- SUGGESTION POUR LES OUVERTURES

On a vu dans la partie théorique que même si la surface des ouvertures d'un bâtiment est en faible quantité par rapport à la paroi opaque, elle conditionne aussi les performances thermiques d'un bâtiment, par l'intermédiaire des taux de [renouvellement d'air](#) largement développés dans la partie théorique, notamment dans a-2 du sous-paragraphe IV-7-3 du chapitre III de la première partie ci-dessus. En effet, leurs dispositions ainsi que leurs natures devraient être aussi bien étudiées minutieusement pour profiter [des apports dus aux rayonnements solaires](#) ainsi que [les principaux paramètres de base de l'architecture bioclimatique](#) engendrés par le site destiné pour l'emplacement du projet. Malgré ceux-là, ce type de parois ne suscite pas notre intérêt dans le domaine de notre recherche. En effet, nous suggérons, par l'intermédiaire de cet ouvrage, d'autres chercheurs à diriger leur approfondissement dans l'étude des liaisons entre l'orientation et les performances thermiques de ces éléments architecturaux d'un bâtiment.

# CHAPITRE III- SIMULATION DU CONFORT THERMIQUE DU BÂTIMENT

## I - INTRODUCTION

Selon Vitruve, les quatre (04) principes de l'architecture d'un bâtiment [CLAUDE- ALAIN ROULET, dans « CONDITION DE CONFORT ET DE LOGEMENT SAIN », page V.], cités ci-dessous, doivent être traités de manière équilibrée :

- ▶ Localitas : Bien situé, intégré à son environnement ;
- ▶ Voluptas ou Venustas : Être beau, esthétiquement bien conçu ;
- ▶ Firmitas ou Necessitas : Tenir debout, au besoin pendant longtemps ;
- ▶ Comoditas : Être confortable et fonctionnel, conforme aux besoins de l'utilisateur.

Les deux premières qualités sont traitées par les architectes, la troisième par l'Ingénieur de construction à l'aide du calcul des structures ou statique. Ainsi nous allons envisager ici la quatrième condition : « Comoditas », en étudiant l'orientation optimale, à l'aide de la réalisation des simulations thermiques, d'un bâtiment d'habitation naturellement ventilé.

## II - LES RAISONS DE CHOIX DU LOGICIEL ARCHICAD POUR LA RÉALISATION DE SIMULATION THERMIQUE DU BÂTIMENT OBJET DE L'ÉTUDE

### II-1- UN LOGICIEL DE CAO ARCHITECTURE DE RÉFÉRENCE

Depuis sa création, le logiciel Archicad n'a cessé d'innover, en termes de dessin et de modélisation, pour assurer toutes ces tâches fastidieuses. Il permet ainsi d'exercer pleinement un métier de conception d'un bâtiment. En effet, ce logiciel permet de dessiner des murs simples ou complexes en ajustant automatiquement leurs hauteurs ainsi que la représentation automatique et paramétrable des ouvertures (quel que soit le support), des poteaux et des poutres (courbes, droites, inclinées, en fruit ou même en dévers), sur lignes droites ou sur courbes.

Pour une meilleure interconnexion de tous les éléments architectoniques, le logiciel Archicad permet de paramétrer aussi les dallages, les dalles ainsi que les toitures : ajustement des inclinaisons, modification sélective des matériaux, automatisation des raccordements de toitures complexes entre elles et en intersection d'autres éléments (murs, dalles, coques, etc.), association d'éléments constructifs à un étage, etc.

Bien attendu, la fonctionnalité raccords intelligents et automatiques des éléments constructifs de ce logiciel (murs, dalles, colonnes et poutres) est effective sur les plans, comme sur les sections ou sur les vues 3D.

Grâce à une gestion très aboutie des matériaux du projet BIM, le logiciel peut afficher les détails des intersections et jonctions avec une extrême précision jusqu'au 1/50<sup>e</sup>.

Avec Archicad, on peut paramétrer aussi les isolants des différentes parois et les revêtements du bâtiment.

Pour les Ingénieurs, les calculs des quantités sont encore plus rigoureux, et la documentation générale du projet généré par ce type de logiciel est ainsi plus précise.

## II-2- UN LOGICIEL PERMETTANT DE MODÉLISER RAPIDEMENT DES STRUCTURES COMPOSITES

Archicad permet de modéliser des structures composites sans couche ou « âme<sup>78</sup> » et de conserver les attributs des couches d'un composite lors de la création d'un profil, tout en évitant la fusion des matériaux identiques dans les profils.

Le statut rénovation de l'Archicad est attribuable à toutes les composantes des différents projets, pour distinguer les plans 2D comme en 3D, les éléments à conserver, à démolir, à construire. En effet Archicad dispose déjà des plans types aux normes standards et ceux-là permettent également de créer des filtres de rénovation personnalisés.

## II-3- UN LOGICIEL D'ESTIMATION ÉNERGÉTIQUE IDÉALE POUR LA SIMULATION THERMIQUE D'UN BÂTIMENT

L'espace BIM de l'Archicad est un puissant moteur de simulation énergétique et dynamique. Cette technologie d'estimation bioénergétique en temps réel des bâtiments à partir de leur géométrie et de leurs différentes caractéristiques (orientation, situation géographique, climat, matériaux de construction avec leurs caractéristiques thermiques paramétrables) a fait ce logiciel un outil efficace pour l'étude de confort thermique d'un bâtiment. De plus, Archicad permet d'utiliser des blocs thermiques différents adaptés aux scénarios d'occupation pour une estimation énergétique interactive plus fine depuis la phase d'esquisse jusqu'à la phase de la réalisation du projet.

## II-4- LA FONCTIONNALITÉ DU LOGICIEL ARCHICAD

La fonctionnalité du logiciel Archicad au cours de la réalisation de l'étude du Confort thermique d'un bâtiment se divise en deux grandes étapes, dont :

- **De la maquette à l'étude thermique experte** : Cette première phase du processus se consacre essentiellement sur :
  - ☞ La récupération automatique des données thermiques nécessaires depuis la maquette de l'Archicad : géolocalisation précise du projet, composition exacte du bâti, métré ;

---

<sup>78</sup>Selon la norme NF EN 14 411

- ☞ La qualification des objets architectoniques intervient dans les calculs thermiques et climatiques avec les catalogues de l'ASHRAE, tels que l'enveloppe (parois et baies) ainsi que les flux thermiques selon les règles ThU assignées sur les éléments détectés ; ainsi que
- ☞ L'accès à toutes les bibliothèques numériques et les Catalogues détaillés de systèmes de ventilation.
- **Puis les calculs et simulations thermiques** : Les processus de calcul et de simulation thermique de l'Archicad consistent principalement :
  - ☞ À l'étude de l' [évaluation des performances thermiques des parois du bâtiment](#) selon la réglementation en vigueur, comme celles qui ont été développées dans le sous-paragraphe II ci-haut de la présente partie ;
  - ☞ Aux [analyses solaires](#) ou FLJ (Facteur Lumière Jour) des ouvertures ;
  - ☞ À la détermination du bilan thermique et climatique : calculs des pertitions et apports ;
  - ☞ À la réalisation de la Simulation Thermique Dynamique (STD) ainsi que la Simulation Énergétique Dynamique (SED).

## II-5- LA VALIDATION DE LA PRÉCISION DES CALCULS DE LA SIMULATION THERMIQUE DU LOGICIEL ARCHICAD

L'estimation énergétique de ce type de logiciel utilise le même moteur de simulation que l'extension « Éco Designer STAR » de l'Archicad. Ce moteur a été validé par l'ANSI/ASHRAE selon la norme 140-2007, relative à la « méthode standard de test pour l'évaluation des logiciels d'analyse énergétique de bâtiment ». En effet, le produit indépendant VIP Energy, qui utilise le même moteur de simulation que l'Estimation énergétique de l'Archicad et Éco Designer STAR est également validé par les tests suivant les normes EN-15 265, IEA-BESTEST, ASHRAE-BESTEST (ANSI/ASHRAE Standard 140-2001) et StruSoft-BESTEST. Les détails de la validation de ce logiciel sont disponibles sur le site : <http://www.strusoft.com/index.php/en/validationvip>.

## III - DÉFINITION DES BLOCS THERMIQUES DU BÂTIMENT

Pour avoir l'estimation énergétique, des zones doivent être placées dans chaque espace concerné du bâtiment, car l'analyse géométrique du modèle est fondée sur ces zones. Ce zonage permet ainsi de fournir au logiciel les renseignements relatifs à chaque pièce, décrite ci-dessous, et de les regrouper en « blocs de zones thermiques ».

Les blocs thermiques sont des ensembles constitués par une ou plusieurs pièces ou espaces d'un bâtiment ayant une même orientation, un même profil d'usage et des exigences de température interne identique (que l'on appelle également exigences de contrôle par thermostat). Il n'est pas nécessaire que les zones soient adjacentes pour être combinées en un bloc thermique.

En effet, après avoir défini les blocs thermiques, le modèle architectural (BIM) est transformé en un modèle énergétique de bâtiment (BEM) par la fonction d'analyse automatique de la géométrie du modèle et des propriétés des matériaux par le moteur d'« Éco Designer STAR » de l'Archicad. Cette analyse fonctionne de la manière suivante :

- ☞ Analyse des structures et des ouvertures visibles en fonction de leur orientation et de leur position relative aux zones et génère leurs bordures (ou limites) des espaces<sup>79</sup> que représentent les zones ;
- ☞ Génération des listes de bordure d'espace. Dans cette action, les structures et les ouvertures sont automatiquement répertoriées avec leurs propriétés appropriées pour l'estimation énergétique.

Ainsi, les informations, fournies par le logiciel, liées aux blocs thermiques pris et traités pour la simulation thermique du bâtiment sont les suivantes :

Tableau 60 : Zonage du bâtiment

| Blocs thermiques | Surfaces étage brut (m <sup>2</sup> ) | Surface de sol traité (m <sup>2</sup> ) | Surface gros œuvre (m <sup>2</sup> ) | Volumes aérés(m <sup>3</sup> ) | Taux de brillance (%) | Emplacement et Zones                    |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| Chambres         | 120,25                                | 86,56                                   | 323,74                               | 413,43                         | 7,00                  | RDC : Ch 01 et Ch 02                    |
|                  |                                       |                                         |                                      |                                |                       | Étage 01 : Ch 03, Ch 04 et Ch 05        |
|                  |                                       |                                         |                                      |                                |                       | Étage 02 : Ch 06, Ch 07, Ch 08 et Ch 09 |
| Dépôt            | 11,44                                 |                                         |                                      | 27,15                          |                       | RDC : Dépôt                             |
| Couloirs         | 22,34                                 |                                         |                                      | 114,72                         |                       | RDC : Couloir                           |
|                  |                                       |                                         |                                      |                                |                       | Étage 01 : Couloir                      |
|                  |                                       |                                         |                                      |                                |                       | Étage 02 : Couloir                      |
| w.c. & douche    | 5,38                                  |                                         |                                      | 20,33                          |                       | Étage 01 : w.c. & douche                |
|                  |                                       |                                         |                                      |                                |                       | Étage 02 : w.c. & douche                |
| Grande salle     | 53,60                                 | 42,91                                   | 102,19                               | 114,53                         | 7,00                  | RDC : grande salle                      |
| Cuisine          | 11,27                                 |                                         |                                      | 23,40                          |                       | Étage 01 : Cuisine                      |
| Salon            | 30,73                                 | 24,71                                   | 50,02                                | 55,14                          | 7,00                  | Étage 01 : Salon                        |

<sup>79</sup>Les bordures d'espace décrivent la géométrie du bâtiment dans un format adapté à la mise en œuvre de la simulation énergétique.

En fonction des données sus-énoncées, l'organisation interne ainsi que les informations de chaque zone constituant les blocs thermiques du bâtiment objet de l'étude sont illustrées dans les plans ci-après :

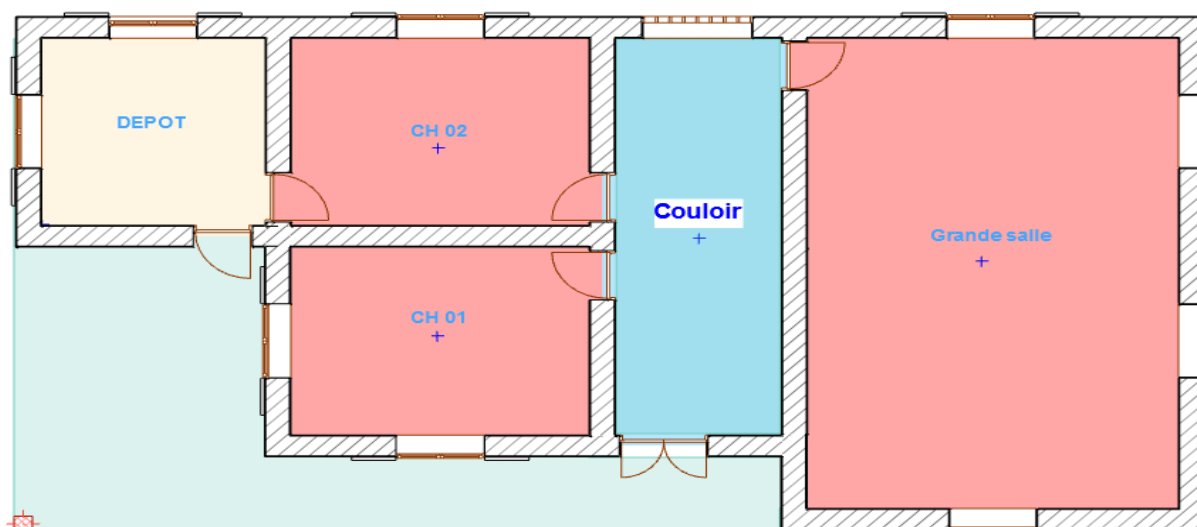


Photo 36 : Plan du rez-de-chaussée

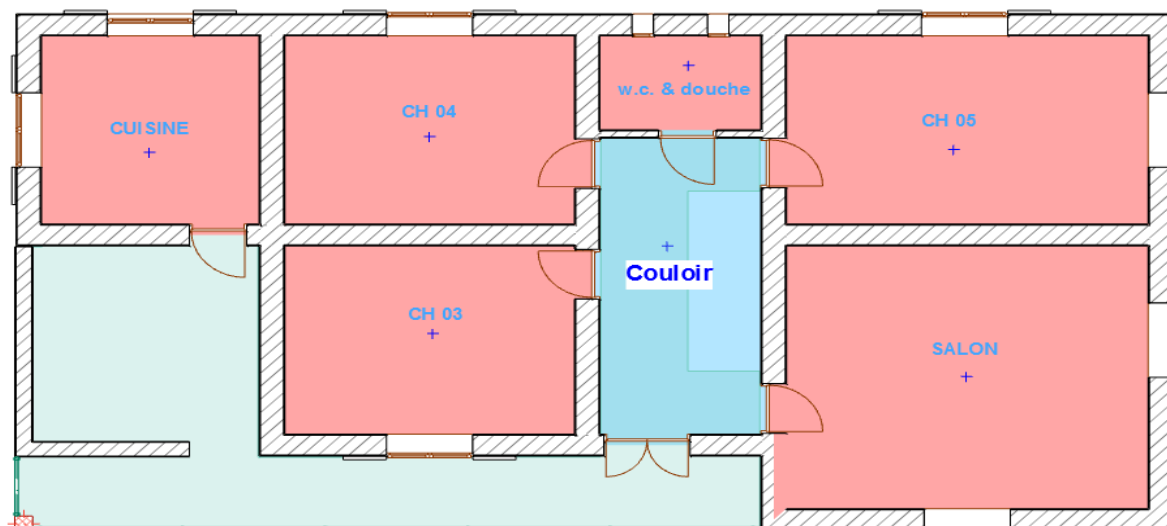


Photo 37 : Plan du premier étage

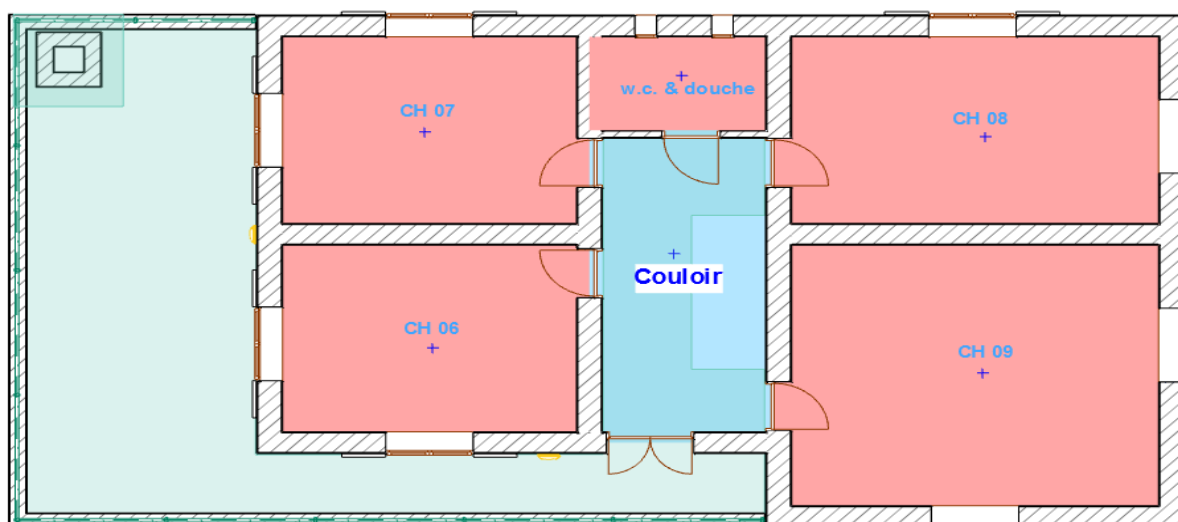


Photo 38 : Plan du comble habitable

## IV - DÉFINITION DES SOURCES ET PLANNING DES VENTILATIONS

L'objectif principal de la simulation thermique de la présente thèse est d'étudier l'orientation optimale d'un bâtiment naturellement ventilé. Ainsi, le processus de la simulation thermique du bâtiment se basera donc sur l'exploitation du vent naturel de leur site d'implantation. Dont, les plannings de l'opérationnalisation des trois Zones considérées pour l'étude, en respectant les normes NBN D50- 001 données par le tableau 30, en fonction de la surface de plancher de chaque bloc thermique ainsi que les [taux de renouvellement d'air](#) correspondant, sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 61 : Planning des ventilations de chaque bloc thermique

| Blocs thermiques | Surface du plancher (m <sup>2</sup> ) | Ravitaillement (m <sup>3</sup> /h) | Heure d'application | Réurrence <sup>80</sup> | Date          |
|------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------|
| Chambres         | 86,56                                 | 72,00                              | 5 : 00 h- 18 : 00 h | Tous les jours          | Toute l'année |
| Salon            | 24,71                                 | 88,96                              | 5 : 00 h- 18 : 00 h | Tous les jours          | Toute l'année |
| Grande salle     | 42,91                                 | 72,00                              | 8 : 00 h- 18 : 00 h | Lundi au vendredi       | Toute l'année |

Les taux de renouvellements pris : 72,00 m<sup>3</sup>/h pour les chambres, 88,96 m<sup>3</sup>/h (en raison de 3,6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>) pour le salon et 72,00 m<sup>3</sup>/h correspondent respectivement aux surfaces de plancher de plus de 20,00 m<sup>2</sup> pour les chambres et la grande salle (considérée comme bureau), tandis que plus de 42,00 m<sup>2</sup> pour le salon.

Les chambres ainsi que le salon seront disponibles pour la circulation d'air naturel pour toute la journée entière. De mêmes cas pour la grande salle, elle est circulable par le vent naturel pendant le jour de travail dans toute l'année.

## V - LES APPORTS INTERNES DANS CHAQUE PIÈCE DU BÂTIMENT

À part les températures des parois internes de chaque local du bâtiment, [les apports internes](#), développés dans le sous-paragraphe IV-7-3 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, engendrés par les machines et appareillages, les thermiques des occupants ainsi que les éclairages, conditionnent également le confort thermique d'un bâtiment. Dans cette situation, la définition des hypothèses du profil d'usage du bloc thermique, associée aux données de la plage des températures internes requises par heure pour une année<sup>81</sup> entière, dépend essentiellement des apports internes de chaque pièce du bâtiment. Pour cela, nous avons choisi d'associer un profil d'usage séparé à chacun des blocs thermiques

<sup>80</sup>Jours de la semaine durant lesquels l'horaire donné est en vigueur

<sup>81</sup>C'est-à-dire 8760 heures au total

suivant la norme DIN 18 599, relative à l'« Efficacité énergétique des bâtiments ». Le tableau 62 ci-après donne les apports internes avec le planning d'exploitation relatif à chaque pièce du bâtiment associé aux trois principaux blocs thermiques, considérés comme habitables, du bâtiment objet de l'étude :

Tableau 62 : Apports internes dans chaque local du bâtiment

| Apports                                           |                                                                                                        | Scénarios d'utilisations |                                                                     |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <a href="#">Dus aux occupants</a>                 | 114,00 (W/pers) pour les chambres et salon, 128 (W/pers) pour la grande salle                          | Chambres                 | 00 h 00-08 h 00<br>12 h 00-14 h 00<br>17 h 00-00 h 00               |
|                                                   |                                                                                                        | Salon                    | 07 h 00-08 h 00<br>17 h 00-22 h 00<br>08 h 00-22 h 00 <sup>82</sup> |
|                                                   |                                                                                                        | Grande salle             | 08 h 00-17 h 00                                                     |
| <a href="#">Par l'éclairage</a>                   | 8,00 (W/m <sup>2</sup> ) pour les chambres et 16,00 W/ pour le salon                                   | Chambres                 | 04 h 00- 06 h 00<br>17 h 00-22 h 00                                 |
|                                                   |                                                                                                        | Salon                    | 17 h 00-22 h 00                                                     |
|                                                   |                                                                                                        | Grande salle             |                                                                     |
| <a href="#">Par les machines et appareillages</a> | 15,00 (W/m <sup>2</sup> ) pour les chambres et salon et 25,00 (W/m <sup>2</sup> ) pour la grande salle | Chambres                 | 04 h 00-8 h 00<br>12 h 00-14 h 00<br>17 h 00-22 h 00                |
|                                                   |                                                                                                        | Salon                    | 07 h 00-08 h 00<br>17 h 00-22 h 00<br>08 h 00-22 h 00 <sup>83</sup> |
|                                                   |                                                                                                        | Grande salle             | 08 h 00-17 h 00                                                     |

Pour les apports internes dans le bâtiment :

- ☞ La valeur des apports engendrés par l'occupant prise, égale à 128,00 W/pers pour les chambres et salon, correspond à l'activité en assise ou au repos de l'habitant du bâtiment, tandis que les 128 W/pers de la grande salle sont conformes à des activités en assise, debout, et travail léger des travailleurs prévus pour cette localité (cf. tableau 66) ;
- ☞ Les apports issus de l'éclairage de 6,00 W/m<sup>2</sup> pour les chambres et 16,00 W/m<sup>2</sup> pour le salon sont aussi choisis selon les critères d'exploitation du futur bâtiment : habitats pour les chambres et le salon, alors que la grande salle sera utilisée comme bureau (cf. tableau 67) ;

<sup>82</sup> Pour le week-end

<sup>83</sup> Idem

☞ Les apports générés, 15 W/m<sup>2</sup> (pour les chambres et salon) et 25,00 W/m<sup>2</sup> (pour la grande salle), sont des valeurs estimatives des puissances des machines et appareillages prévus à être utilisés par les locataires du futur bâtiment (cf. tableau de l'annexe 04 ).

Concernant les scénarios de l'exploitation de ces apports :

- ☞ Les chambres du bâtiment sont considérées occupées pendant toute la nuit de l'année et pendant la pause du midi ;
- ☞ Le salon est disponible seulement une heure la matinée, surtout le jour ouvrable, et disponible dès 17 h 00 à 22 h 00 le soir. Par contre elle est disponible de 08 h 00 à 22 h 00 le week-end ;
- ☞ La grande salle sera considérée comme un espace de travail, elle est disponible pour toute la journée et les heures de travail.

Dans la recherche de la maîtrise de la consommation énergétique dans chaque local du bâtiment, on peut exploiter la relation 65 relative aux charges sensibles ( $Q_s$ ) totales et en charges latentes ( $Q_L$ ) totales générées par les différents apports internes cités ci-haut. Le recours à cette étude, suggéré par l'intermédiaire de cet ouvrage, permet, en effet, de trouver les types de matériaux pouvant empêcher les déperditions des flux de chaleur dans un local, les matériels/appareils électriques adéquats ainsi que l'occupation optimale d'un local pour diminuer l'émission des effets de serre dégradant l'environnement global de l'humanité.

## VI - ENVIRONNEMENT RELATIF AU SITE D'IMPLANTATION DU PROJET

### VI-1- EMBLACEMENT DU PROJET

Les [contextes géographiques et géologiques](#) de l'ensemble de la région, dans lequel se trouve le projet, avancés dans le chapitre I de la première partie de la présente thèse influent [les principaux paramètres de base du bioclimatique](#) de l'endroit destiné pour l'implantation du projet, notamment la protection et l'ensoleillement du bâti, la topographie ainsi que les directions des vents. La définition de la localisation exacte du site d'implantation dudit projet est alors le processus d'intégration du modèle du bâtiment dans son emplacement réel dans l'hypothèse de la simulation thermique du bâtiment. Donc cette étape est aussi très importante en combinaison avec les données climatiques, données dans la suite de la présente sous-partie, pour construire la meilleure distribution du rayonnement solaire ainsi que des luminances sur le ciel pour les estimations annualisées des différentes données nécessaires pour l'auscultation de l'orientation optimale du bâtiment étudié dans la présente thèse. En plus, la position du soleil à chaque instant dépend d'une bonne définition de la localisation du projet. En conséquence, les coordonnées géographiques du site d'emplacement du projet sont le suivant :

☞ Latitude : 19, 924 ° S

☞ Longitude : 47,571 ° E

☞ Altitude : 1 276 m

☞ Décalage horaire +3 h

Les coordonnées topographiques du site ci-dessus ont été fournies par « Google Earth », mais on peut les avoir également dans le cas de l'utilisation d'un GPS. Pour ceux-là, la photo aérienne ci-dessous montre et illustre l'emplacement du bâtiment objet de l'étude :



Photo 39 : Site d'emplacement du projet

## VI-2- DONNÉES CLIMATIQUES

Les fichiers météo sont des fichiers textes qui contiennent les enregistrements des paramètres climatiques réels pour une période d'un site donné, notamment : les températures externes de l'air, l'humidité relative, l'ensoleillement, ainsi que les vents explicités théoriquement dans le sous-paragraphe V-5-5 du III<sup>e</sup> chapitre de la première partie de cet ouvrage. Le pas de changement de temps de ces fichiers est d'une heure, et ils contiennent des données moyennes sur toute l'année. Le format utilisé dans la simulation de la présente thèse est celui de l'extension « . epw ». Pour avoir les fichiers météo, on peut :

- Soit télécharger à partir de serveur StruSoft Climate. Puisque toutes les données météorologiques StruSoft sont créées à partir des données NCEP Reanalysis fournies par le NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA, à partir de leur site web « <http://www.cdc.noaa.gov/> ».

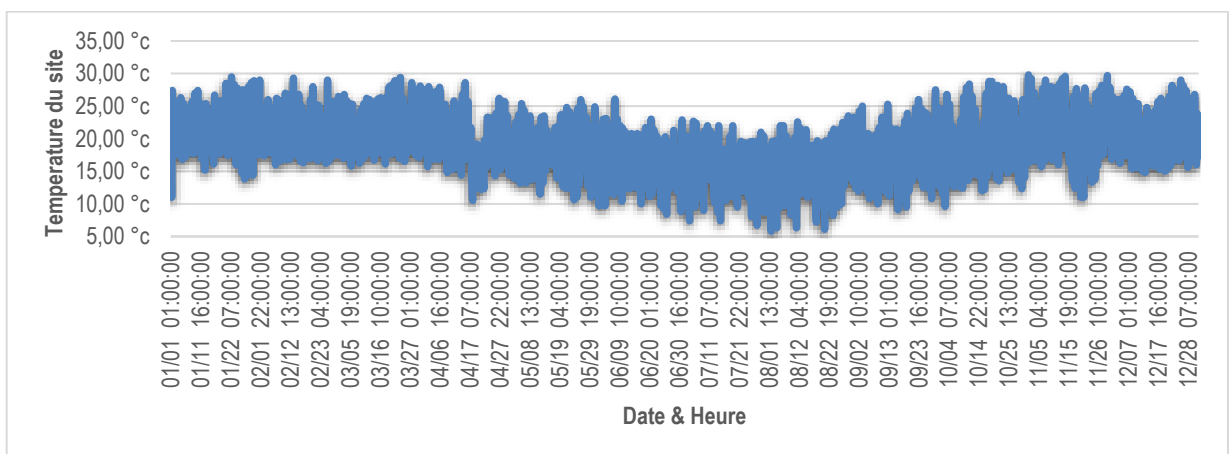
► Soit utiliser le fichier d'ASHRAE IWEK, TMY, WTEC2. Ce sont des fichiers de données météorologiques analytiques obtenus à partir d'une source externe (une source gratuite comme « <https://energyplus.net/weather> »).

Pour la simulation thermique, nous avons utilisé le fichier d'extension « MDG\_Antananarivo.670830\_IWEK.epw », extrait du site d'Energy Plus.

Le modèle d'ASHRAE utilisé dans [la simulation thermique du bâtiment](#) ci-dessous se base sur les températures du site ainsi que celles des blocs thermiques considérés. En effet, les données climatiques du site extrait du fichier Excel contenant les détails de ladite simulation, sont données et analysées dans les sections qui suivent.

### VI-2-1- Température de l'air

Le graphe 32 suivant représente l'intervalle, entre 5,80 °C (aout) et 29,80 °C (janvier), des températures journalières, pour une année, du site d'emplacement du projet. Dans lequel on observe une température et une variation moyenne annuelle respectivement de 18,35 °C et  $\Delta T = \pm 24$  °C.



Graphe 32: Température de l'air dans le site d'implantation du projet

Les résultats exposés dans ce graphique mettent en clarté la [température moyenne mensuelle](#) des différentes saisons de la capitale de Madagascar, prédisent dans le sous-paragraphe III-1 du chapitre I de la première partie de la présente thèse, dont :

- Chaude pendant 5 mois, novembre à mars, près d'une température moyenne mensuelle de 20,72 °C : 20,76 °C en novembre, 20,43 °C en décembre, 20,81 °C en janvier, 20,56 °C en février et 21,50 °C en mars ;
- Une intersaison de 4 mois, avril et, mai puis septembre et octobre, composée d'une température moyenne mensuelle de 18,08 °C : 18,52 °C en avril, 17,44 °C en mai, 15,20 °C en septembre et 18,71 °C en octobre ; et
- Froide allant de juin en aout, qui comporte une température moyenne mensuelle de 14,80 °C : 5,43 °C en juin, 14,39 en juillet et 14,58 °C en aout.

Le mois le plus chaud est le mois de mars, avec une température moyenne de 21,50 °C et le plus froid c'est le mois de juillet, avec une température moyenne de 14,39 °C. On en déduit que :

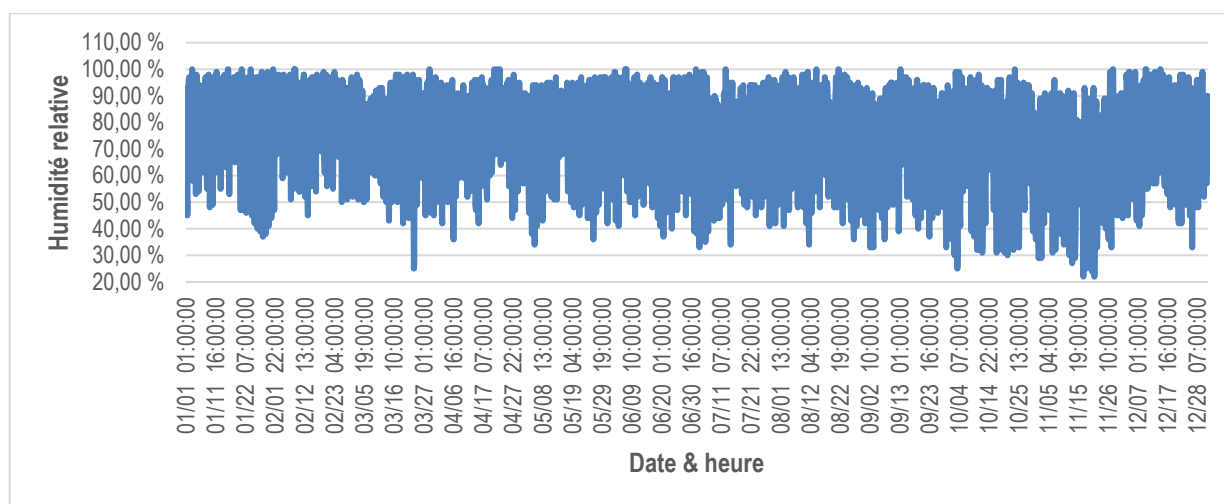
☞ Par rapport à l'ensemble de la région :

- Pour la température maximale du site : On constate une légère augmentation de 1,80 °C ;
- Pour la température minimum : On aperçoit une diminution de 4,22 °C ;
- Pour la température moyenne : On sent une différence de 1,20 °C, c'est-à-dire inférieure par rapport à l'ensemble de la région.

☞ La température moyenne journalière du site est comprise entre 10 °C et 20 °C. Donc d'après le Traité d'Architecture bioclimatique, relatif aux [températures externes](#), annoncé dans a du paragraphe V-5-5- du chapitre III de la première partie de la présente thèse, le site d'implantation du bâtiment est classé tempéré. Ce contexte engendra, en effet, la température dans le local du bâtiment édifié dans ledit site dans une situation d'inconfort, surtout dans la période d'été.

## VI-2-2- Humidité relative

Le taux moyen journalier de l'humidité, illustré par le graphe 33 ci-après, du site d'implantation du bâtiment, est de 75,80 % pour toute l'année. Le taux d'humidité est donc varié entre un maximum de 100 % et un minimum de 22 % (+10 % et -18 % respectivement par rapport à l'ensemble de la région) (cf. le tableau 2 ci-haut). En effet, durant toute l'année, on observe que le taux d'humidité relative maximale journalière du site s'oscille autour de cette valeur optimale, sauf durant le mois de novembre. C'est-à-dire durant la période la plus chaude de l'année aussi bien dans le site que dans l'ensemble de la région. Par contre, elle est très variable pour les taux minimaux journaliers.

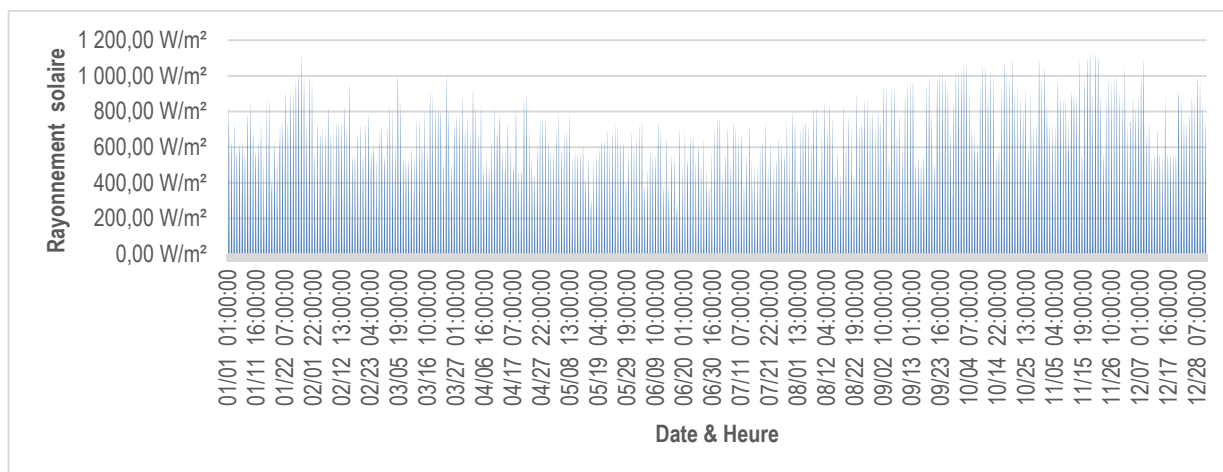


Graphe 33: Humidité relative du site d'implantation du projet

Le « Traité d'Architecture bioclimatique », annoncé dans b du paragraphe V-5-5 de la partie III du présent ouvrage, classe un site humide, pour une [humidité relative](#) supérieure à 55 %. En effet, on constate que le taux d'humidité moyenne annuelle du site (75,80 %) est dépassé de +5,80 % par rapport à la limite

maximale fixée par la Norme européenne NBN EN 13 779, c'est-à-dire dans une plage d'humidité relative de 30 %-70 %. On peut déclarer donc que le site est humide dans l'ensemble de l'année. Dans ce cas-là, avec les taux d'hygrométrie occasionnés par les différents apports internes, [les effets indésirables de l'existence d'humidité dans un local](#), cités dans c- 5 du sous-paragraphe IV-7-2 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, pourraient affecter le bâtiment dans le cas où leur renouvellement d'air ainsi que leur ensoleillement ne seront pas bien étudiés.

### VI-2-3- Le rayonnement solaire



Graphe 34: Rayonnement solaire du site

À partir des données ainsi que le graphe ci-dessus le rayonnement moyen annuel dans le site est estimé à 209,35 W/m<sup>2</sup>. La durée d'ensoleillement la moins importante, dans laquelle la couverture nuageuse du ciel est cruciale, se trouve durant le mois de juin, avec une moyenne de 147,01 W/m<sup>2</sup>, tandis que les mois d'octobre et novembre sont les plus ensoleillés de l'année, avec une moyenne respective de 261,71 W/m<sup>2</sup> et 271,84 W/m<sup>2</sup>. On en conclut que l'allure du diagramme du rayonnement solaire du site épouse à celui (i) du diagramme de [la précipitation mensuelle d'Antananarivo](#), exposée dans III-2 du chapitre I de la première partie de ce manuscrit ainsi que (ii) l' [ensoleillement](#) de l'ensemble de la région, présenté dans le sous-paragraphe III-4 du même chapitre que la référence citée ci-dessus. Donc, tout le jour, le futur bâtiment pourra profiter du rayonnement ainsi que l'ensoleillement de leur site d'implantation. Mais ces paramètres ne sont pas suffisants pour définir et étudier leur orientation optimale.

### VI-2-4- La vitesse du vent

Pour sa direction, le vent qui prédomine dans le site d'implantation du futur bâtiment provient de l'est comme dans l'ensemble de la région d'Analamanga, illustrée par le rose du vent de la figure 82 ci-dessous. Dans ce diagramme polaire, la longueur de chaque segment représente la fréquence du vent et l'intensité de la couleur représente sa vitesse. La vitesse moyenne journalière du vent enregistrée est de l'ordre de 10,15 km/h.

Le vent du site souffle plus fort durant la période d'été, notamment le mois d'octobre, décembre, janvier et Février, avec une vitesse moyenne mensuelle respective de 16,02 km/h, 13,56 km/h, 11,73 km/h et 13,45 km/h. Cette vitesse peut atteindre 48,24 km/h durant cette période. Tandis qu'elle est variable durant les autres mois, voire très faible durant le mois de juin, avec une vitesse moyenne mensuelle de 6,37 km/h. Le graphe 35 ci-dessous illustre la variation moyenne-journalière, annoncée ci-dessus, pour une année de la vitesse de l'air dans le site destiné pour édifier le bâtiment objet de l'étude.

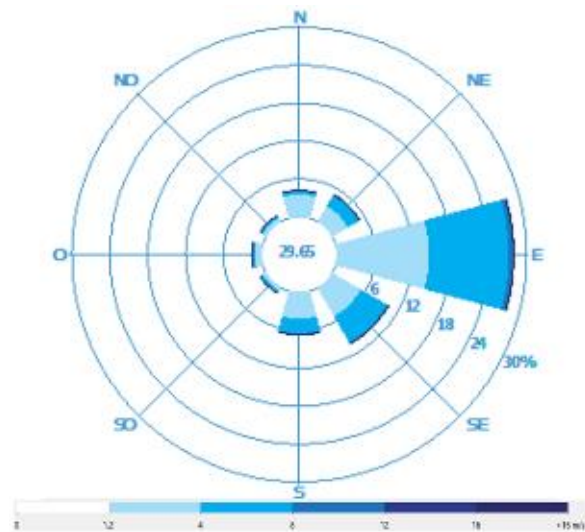
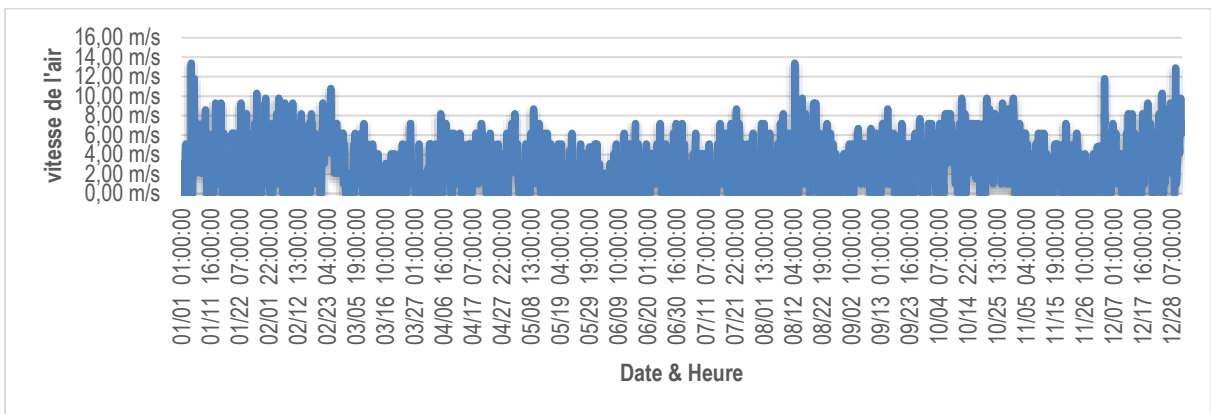


Figure 82 : Direction principale du vent du site



Graphe 35: Évolution de la vitesse d'air dans le site d'implantation du bâtiment

D'une part, par rapport au [vent](#) de l'ensemble de la région, exposé dans le sous-paragraphe III- 5 du chapitre I de la première partie du présent ouvrage, l'allure de la courbe de la vitesse du vent local est très sinueuse. Tandis que, l'activité du vent dans l'ensemble de la région est plus ou moins stable durant l'été, varie de 9 à 11 km/h, augmente en allant de 11 à 14 km/h durant la première intersaison (avril et mai), puis stable, de 14 à 15 km/h, durant l'hiver (juin à septembre), et enfin redescend, de 15 à 10 km/h, durant la deuxième intersaison, notamment le mois d'octobre.

D'autre part, par rapport à « la norme nationale de construction de bâtiment résistant aux aléas naturels à Madagascar » fixé par le décret N° 2019- 1957 du 16 octobre 2019 :

☞ Le site de construction du futur bâtiment se trouve dans la zone vent normale  $V_{N1}$  dans laquelle la vitesse de vent normale est fixée à 15 km/h. En effet la vitesse moyenne journalière du site, de 10,15 km/h, est inférieure en comparaison avec celle fixée par la norme ci-citée, dû aux infrastructures qui l'entoure ;

☞ Le respect des « règles relatives aux sites d'implantation des bâtiments », ainsi que l'application de la « règle de conception des bâtiments résistant aux aléas naturels » inscrits dans le contenu du décret susmentionné permettront au futur bâtiment de résister aux vents extrêmes, de  $V_{EX1}=120$  km/h, de la zone du site de leur construction.

L'analyse effectuée précédemment, des données climatiques engendrées par fichier météo d'Antananarivo est parmi l'étape cruciale dans le processus de la réalisation des simulations thermiques du bâtiment. Parce qu'elle constitue le travail de mise au bain du modèle du bâtiment dans [les paramètres climatiques](#), abordés sous paragraphe V-5-5 du chapitre III de la première partie de la présente Thèse, du site d'implantation du projet.

### VI-3- LA PROTECTION ÉOLIENNE

Nous savons que la vitesse ainsi que la température des vents peuvent varier respectivement en fonction de la [topographie](#) ainsi que la rugosité du [site](#) d'implantation du projet comme l'altitude (cf. le sous-paragraphe V-5-2 et V-5-1 du III<sup>e</sup> chapitre de la partie analytique ci-dessus). L'[occupation du sol](#) dans la zone d'influence du projet, comme les végétations ainsi que les infrastructures aux alentours du bâti définissent les taux d'urbanisation du local destiné pour l'implantation du projet. Ces paramètres ont des impacts directs sur la température de la paroi du bâtiment et indirects à l'aide des transferts thermiques à travers l'enveloppe. Plus loin il se trouve, plus le facteur de protection éolienne est élevé. En effet, pour chaque façade, le niveau de protection de chacune des 8 directions de la rose de vent, relatif au site d'implantation, du bâtiment est donné par le tableau 63 qui suit.

Tableau 63 : Niveau de protection aérienne du site d'implantation du bâtiment

| Orientation | Niveau de protection aérienne |
|-------------|-------------------------------|
| Nord        | Partiellement protégé         |
| Nord-Est    | Partiellement protégé         |
| Est         | Protégé                       |
| Sud-Est     | Partiellement protégé         |
| Sud         | Partiellement protégé         |
| Sud-ouest   | Partiellement protégé         |
| Ouest       | Protégé                       |
| Nord-ouest  | Partiellement protégé         |

### VI-4- L'OMBRAJE HORIZONTAL

La fonction d'analyse solaire de l'estimation énergétique de l'Archicad ne détermine pas automatiquement la quantité des ombres portées par les objets externes sur les éléments opaques de l'enveloppe du bâtiment. En effet, la prise en compte du taux de l'[urbanisation](#) ainsi que de [la couleur des revêtements proches](#) du

site d'implantation du bâtiment, est exposée respectivement dans le sous-paragraphe V-5-3 et V-5-4 du III<sup>e</sup> chapitre de la première partie de cet ouvrage. Il faut bien choisir les options qui décrivent le mieux la quantité d'ombre produite par les infrastructures externes. Par contre, si le site d'emplacement réel du projet est bien défini et précis<sup>84</sup>, le logiciel active automatiquement les paramètres d'ombrage, liés aux façades du bâtiment à régler. Par rapport à l'intégration du bâtiment à son milieu d'urbanisme, les hypothèses du tableau 64 ci-dessous ont été retenues dans le paramétrage de la simulation thermique du projet.

Tableau 64 : Paramètres des ombrages horizontaux du site d'implantation

| Orientation | Ombres  |
|-------------|---------|
| Est         | Moyenne |
| Nord- Est   | Bas     |
| Nord        | Bas     |
| Nord- ouest | Bas     |
| Ouest       | Élevée  |

## VII - CARACTÉRISATION DE SOL D'ASSISE

Et enfin, pour la considération de l'effet thermique lié au transfert de chaleur des surfaces sur [la nature du sol d'assise](#), on a repris la méthode développée dans le tableau 44 plus haut, ainsi les paramètres thermiques retenus relatifs au type du sol d'assise du bâtiment, et sont donnés dans le tableau 65 relatif aux caractéristiques thermiques du sol d'assise ci-après :

Tableau 65 : Caractéristique thermique du sol d'assise

| Paramètre thermique                                 | Valeur prise       |
|-----------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Transfert de chaleur de surface</b>              |                    |
| Convectif interne                                   | 5,52 (W/m²K)       |
| Combiné externe                                     | 10,31 (W/m²K)      |
| <b>Transfert de chaleur émanant du sol d'assise</b> |                    |
| Conductivité thermique (limon argileux)             | 2,30 (W/m²K)       |
| Capacité calorifique                                | 1 900,00 (J/kg. K) |
| Réactivité du sol                                   | 20,00 %            |

## VIII - SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES DU BÂTIMENT

Le moteur intégré certifié « VIP Core » est le responsable de la conduite de la simulation hygrothermique de l'Archicad. Durant ce processus, le logiciel calcule la balance hygrothermique horaire du bâtiment en fonction des différents paramètres bioclimatiques du site, des performances thermiques des parois bâties

<sup>84</sup>Parmi l'avantage de l'utilisation de ce logiciel

avec des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, incorporées dans l'enveloppe du bâtiment, à l'aide du modèle, ainsi que des apports fixés dans l'hypothèse ci-dessus.

À part les [données climatiques du site](#), déjà développées et analysées dans le sous-paragraphe VI-2 du présent chapitre, la simulation thermique du modèle du bâtiment génère également en même temps [l'humidité relative](#) produite par la relation 20, [l'humidité spécifique](#), procurée par la relation 21, les [températures ambiantes de l'air](#) ainsi que les [températures sèches](#) fournies par la formule 18 (ou opérative) internes horaires de chaque bloque thermique. Même si la température ambiante de l'air est utilisable dans la simulation thermique pour rechercher l'orientation optimale du bâtiment à cause de leur décriptations du [bilan énergétique](#), défini par la relation 69 ci-dessus, engendré par [l'apport thermique total](#), fourni par la relation 65 ci-haut, surtout si on veut apporter des solutions techniques pour atteindre les températures de référence/consigne des aérateurs d'un bâtiment climatisé en fonction de la destination de chaque locale, comme l'exemple des critères imposés par la réglementation générale française pour la protection du travail (RGPT), donnée par le tableau 09 ci-dessus, elle ne reflète pas parfaitement la sensation de confort des locataires d'un bâtiment. En conséquence, pour intégrer l'indicateur physique du confort thermique sur l'occupant du futur bâtiment ainsi que les différents taux d'humidité engendrés respectivement par les températures ambiantes de l'air, les températures des différentes parois du bâtiment ainsi que les différents apports, internes et externes, dans chaque bloc thermique, on va prendre les deux variables ci-après pour réaliser la simulation hygrothermique du modèle du bâtiment :

- Les températures sèches (ou opératives) intérieures [Saed RAJI, Thèse de doctorat intitulée « Caractérisation hygrothermique, par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale », 2006] de l'ensemble [des blocs thermiques du bâtiment](#) considéré comme habitable, sont données par le tableau 64 de l'hypothèse ci-dessus, du bâtiment sur toute l'année.
- L'humidité relative journalière de l'ensemble des blocs thermiques, du bâtiment sur toute l'année.

Ainsi avant d'étudier l'orientation optimale du bâtiment, objectif final de la recherche de la présente thèse, par rapport à chaque orientation de leur façade principale, nous allons voir d'abord l'évolution journalière de ces données.

Compte tenu de leurs capacités de traitement de confort thermique d'un bâtiment naturellement ventilé, l'auscultation de l'orientation optimale du bâtiment se réalisera, en effet, par l'exploitation :

- ☞ Du modèle de l'ASHRAE pour la simulation thermique ; et
- ☞ Le modèle de Givoni pour la simulation hygrométrie.

Et enfin, le critère d'adoption de l'optimisation de l'orientation de la façade principale du bâtiment sera basé sur l'analyse détaillée des divers résultats fournis par la simulation thermique du modèle du bâtiment. Dans cette condition :

- La simulation thermique sera fondée sur la variation ( $\Delta T$ ) mensuelle des températures opératives ainsi que les températures senties, lues sur le modèle de l'ASHRAE, par l'occupant du bâtiment ; tandis que
- La simulation hygrométrique sur la répartition des points dans les diagrammes de GIVONI ainsi que les taux d'humidité spécifique fournis par les mêmes diagrammes.

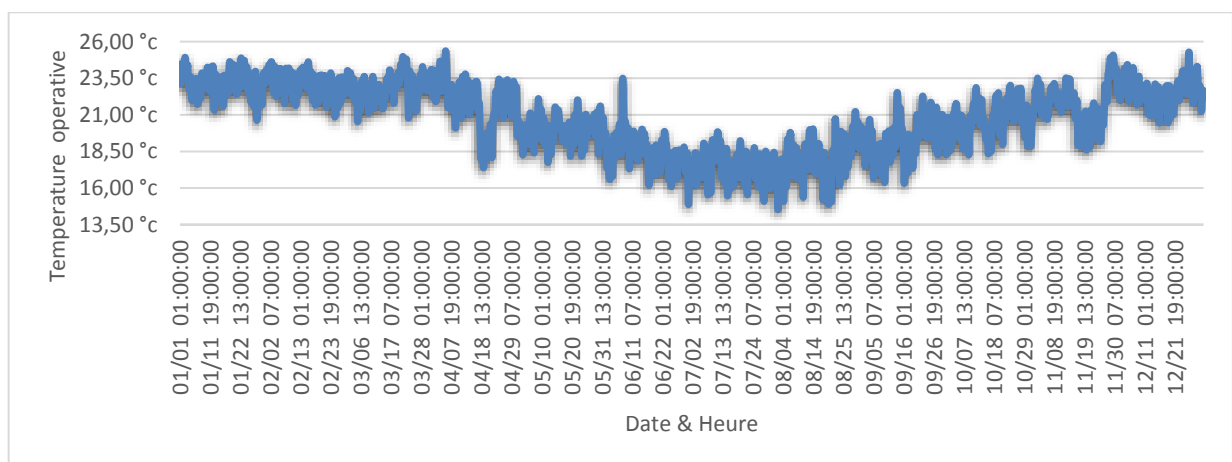
## VIII-1- RÉSULTATS DE LA SIMULATION THERMIQUE DU BÂTIMENT

Le principe du [modèle de confort adaptif de l'ASHRAE](#), approfondi dans le sous-paragraphe IV-11-3 du III<sup>e</sup> chapitre de la première partie cet ouvrage, démontre que la sensation de confort thermique dépend de l'adaptation d'un individu à son environnement. En effet, pour les bâtiments naturellement ventilés, la discordance entre la température opérative interne et externe d'un local prédispose le corps à une difficulté d'acclimatation accrue. Pourtant, la méthode d'ASHRAE met en interdépendance les températures horaires du site ainsi que les températures opératives des blocs thermiques considérés.

Étant donné que [les températures horaires de l'air](#) du site de l'implantation du projet sont déjà examinées dans le sous-paragraphe IV-2-1 du présent chapitre. Ainsi, pour chaque orientation choisie, avant de traiter les données dans le modèle choisi, on va envisager d'abord l'évolution des températures opératives horaires dans le bâtiment, notamment pour les différentes saisons de l'année.

Les Températures Effectives Standards (SET), approfondies dans b-1 du sous-paragraphe IV-7-2 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, relative à [la température opérative \( \$T\_{op}\$ \)](#) d'un local et donnée par le tableau 10 ci-haut, seront prises en compte pour analyser l'interaction entre les températures externes et les températures internes ressenties par l'occupant du bâtiment, par l'intermédiaire du modèle d'ASHRAE.

### VIII-1-1- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le nord

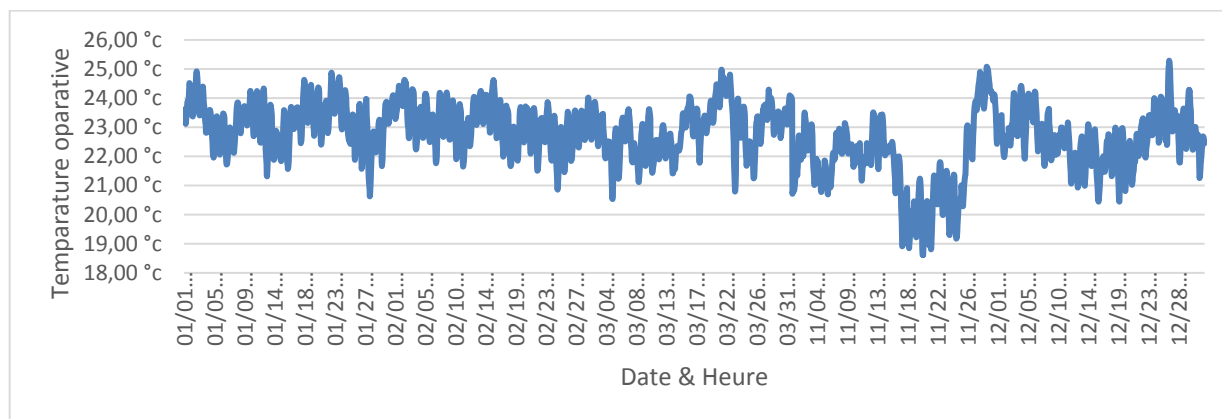


Graph 36 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers le nord

Annuellement, les températures opératives minimale et maximale dans les locaux du bâtiment, dans cette

orientation, est respectivement 14,52 °C et 25,36 °C. Ces deux valeurs extrêmes engendrent une température moyenne de 20,82 °C et une variation de  $\Delta T$  : 10,84 °C. Dans cet intervalle :

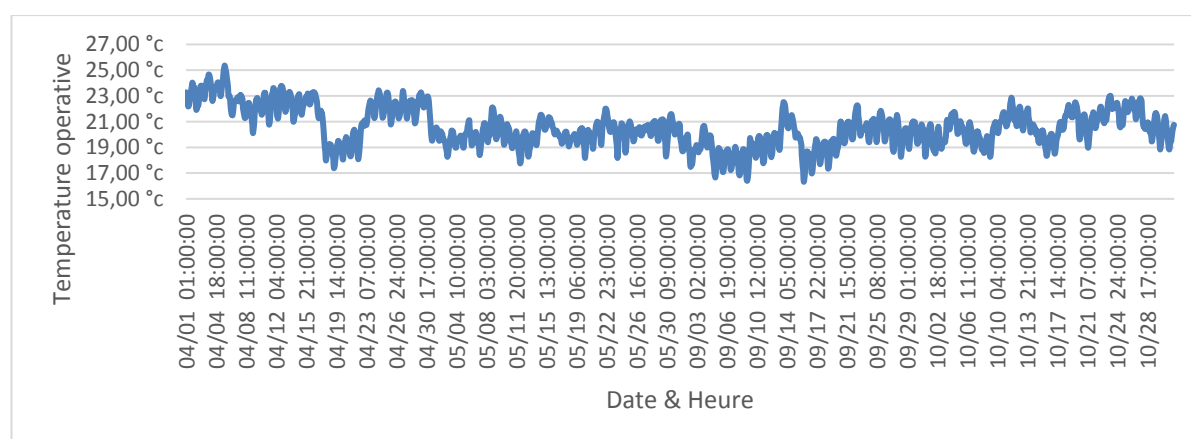
- ☞ Durant la période d'été de 5 mois, les températures opératives moyennes journalières internes varient entre 18,61 °C (mois de novembre) et 25,29 °C (mois de décembre), comme illustre la courbe du graphique 37 ci-après :



Graphique 37 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord

Dans cet intervalle, elles sont en moyenne respectivement de 21,72 °C [18,61 °C à 25,08 °C] durant le mois de novembre ; 22,65 °C [20,45 °C à 25,29 °C] pendant le mois de décembre ; 23,19 °C [20,63 °C à 24,92 °C] au cours du mois de janvier ; 23,13 °C [20,86 °C à 24,65 °C] en février et 22,94 °C [20,54 °C à 24,98 °C] dans le mois de mars. Ces valeurs engendrent une température opérative moyenne mensuelle de 22,94 °C.

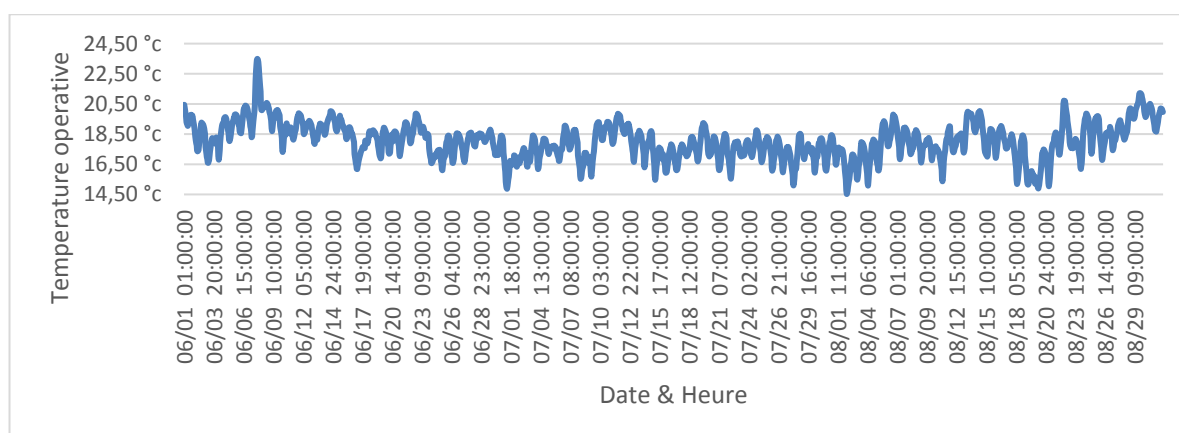
- ☞ Pendant l'intersaison de 4 mois, ces grandeurs diminuent, avec une température opérative moyenne de 20,55 °C, c'est-à-dire entre 16,32 °C (mois de septembre) et 25,36 °C (mois d'avril). Comme informe la courbe du graphique 38 suivant :



Graphique 38 : Températures opératives journalières dans le bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord

Dans laquelle on aperçoit 21,98 °C [17,38 °C à 25,36 °C] durant le mois d'avril ; 20,10 °C [17,75 °C à 22,23 °C] pendant le mois de mai ; 19,45 °C [16,32 °C à 22,52 °C] au sein du mois de septembre et 20,68 °C [18,27 °C à 23,01 °C] en octobre ; et

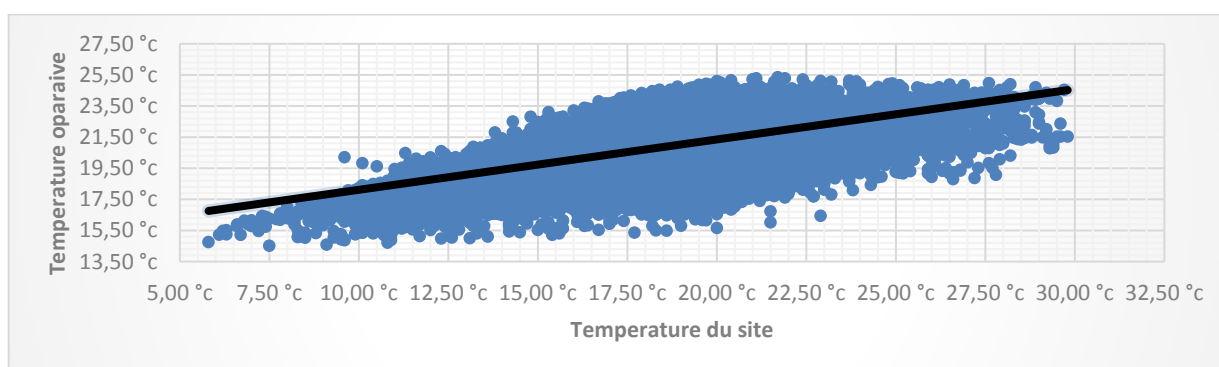
☞ En hiver, la température opérative moyenne dans le local est de 18,04 °C. Cette valeur est incluse entre 15,52 °C (en aout) et 23,49 °C (en juin), comme renseigne la courbe du graphique qui-suit :



Graph 39 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'hiver : orientation vers le nord

Durant cette période les températures opératives moyennes dans le bâtiment sont respectivement : 17,47 °C [15,19 °C à 22,16 °C] dans le mois de juin ; 16,28 °C [14,06 °C à 18,27 °C] en juillet et 16,69 °C [13,72 °C à 19,70 °C] durant le mois d'aout.

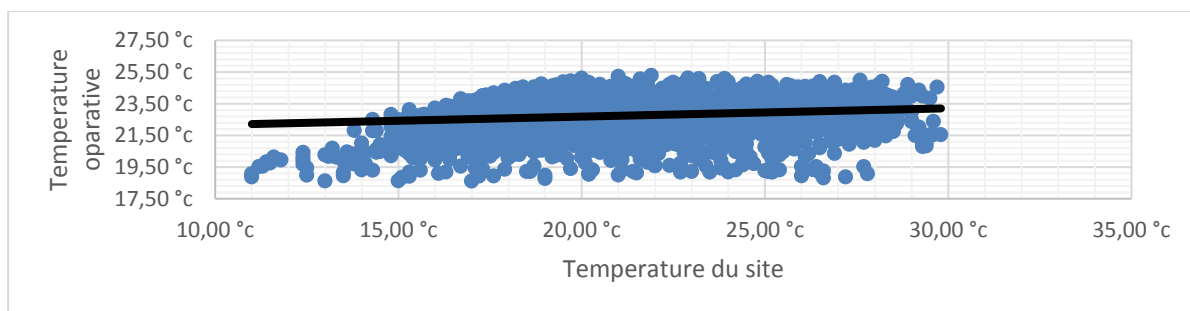
L'interposition des températures opératives journalières, internes, données par le graphe 36 ci-dessus, avec celle du site d'implantation du bâtiment, fournie par le graphe 32, permet d'acquérir le modèle d'ASHRAE ci-après.



Graph 40 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le nord

L'équation de la courbe de tendance des nuages de points dans ce graphique permet d'identifier les températures opératives journalières senties par l'occupant du bâtiment. Dans laquelle, elles sont comprises entre l'intervalle de 16,76 °C et 24,52 °C. Ces valeurs donnent une valeur moyenne annuelle de 20,82 °C, soit une de variation de température annuelle de  $\Delta T = 7,77$  °C.

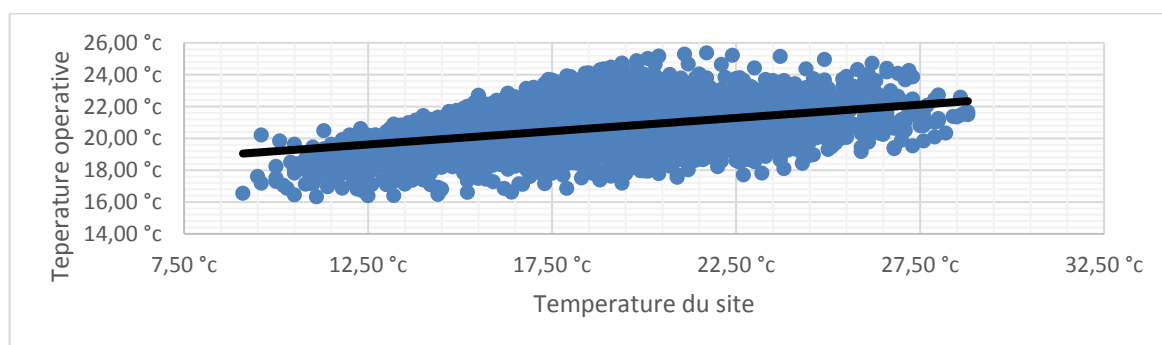
☞ Au long de la période d'été de 5 mois, les températures moyennes mensuelles senties par l'occupant du bâtiment varient entre 22,22 °C (mois de novembre) et 23,20 °C (idem) en suivant la courbe de tendance, donnée par le graphe 41 ci-après, et les nuages de points entre les températures moyennes journalières du site ainsi que le local du bâtiment durant la période considérée.



Grphe 41 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le nord

Dans cet espacement, les températures senties par le locataire du bâtiment sont en moyenne respectivement de 22,73°C [22,22 °C à 23,20 °C] durant le mois de novembre ; 22,71 °C [22,42 °C à 23,16 °C] pendant le mois de décembre ; 22,73 °C [22,36 °C à 23,19°C] au cours du mois de janvier ; 22,72 °C [22,48 °C à 23,18 °C] en février et 22,74 °C [22,47 °C à 23,18 °C] en mois de mars. Ces valeurs engendrent une température moyenne mensuelle de 22,73 °C.

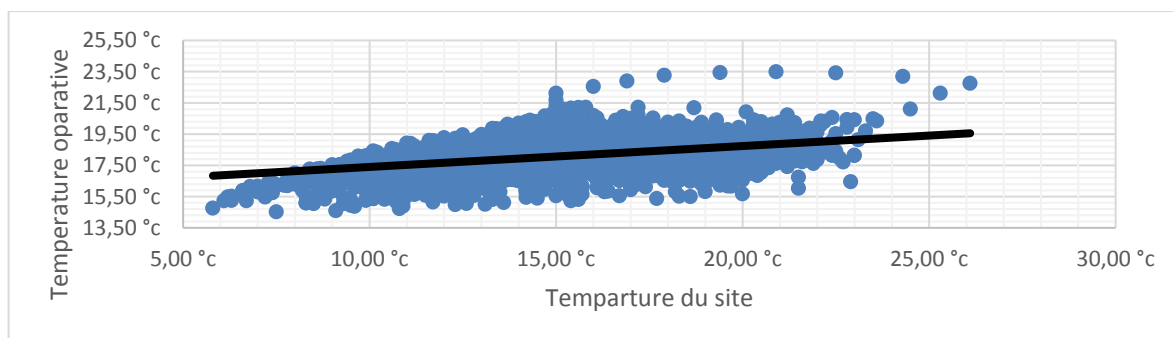
- ☞ Au cours de l'intersaison de 4 mois, les températures ressenties par l'occupant du bâtiment diminuent, avec une température moyenne de 20,55 °C, c'est-à-dire entre 19,05 °C (mois de septembre) et 22,34 °C (mois d'octobre). Comme informe la courbe du graphique 42 suivant :



Grphe 42 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord

Dans laquelle on aperçoit 20,79 °C [19,28 °C à 23,31 °C] durant le mois d'avril ; 20,44 °C [19,30 °C à 21,87 °C] pendant le mois de mai ; 20,31 °C [19,05 °C à 22,12 °C] au sein du mois de septembre et 20,65 °C [19,13 °C à 22,34 °C] en octobre ; et

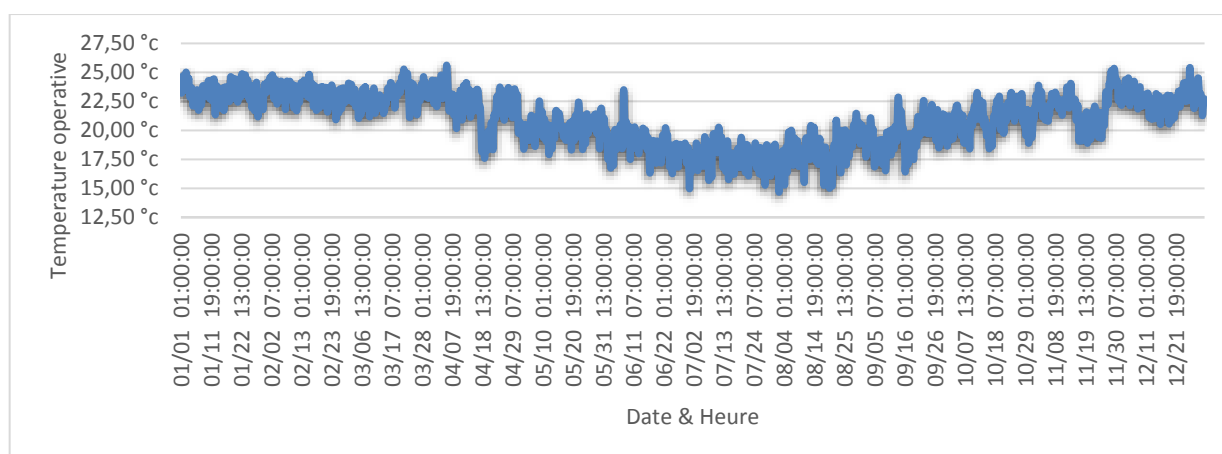
- ☞ Au cœur de l'hiver, la température moyenne journalière puée par le propriétaire du bâtiment dans le local est de 18,04 °C. Cette valeur est incluse entre 16,83 °C (mois d'aout) et 19,55 °C (mois de juin), comme renseigne le segment de droite de tendance des nuages de points du graphique qui suit :



Graph 43 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord

Dans cet interstice de température, les températures moyennes journalières cernées par l'occupant du bâtiment sont respectivement : 18,13 °C [17,18 °C à 19,55 °C] en mois de juin ; 17,99 °C [16,95 °C à 19,13 °C] en juillet et 18,01 °C [16,83 °C à 19,21 °C] durant le mois d'août.

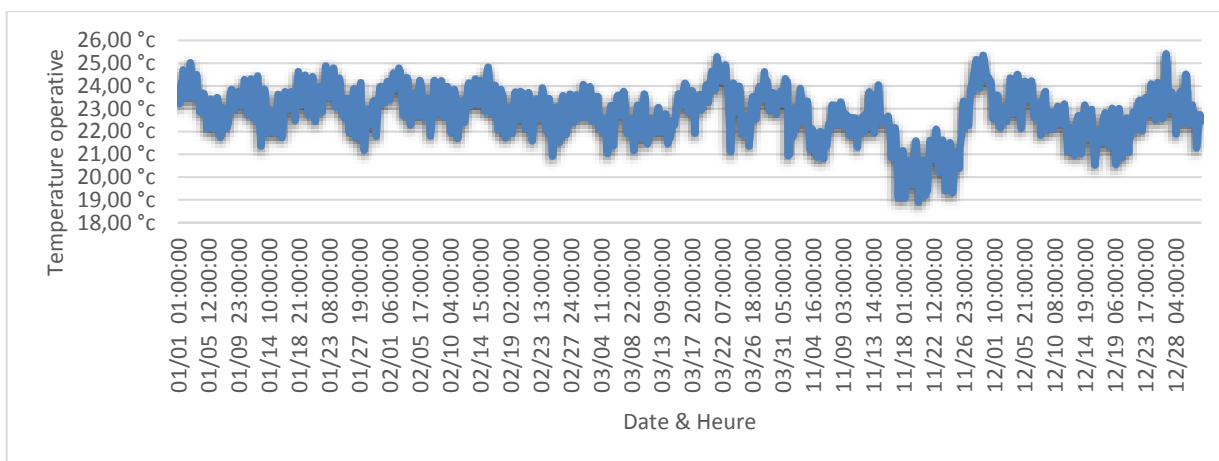
### VIII-1-2- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'est



Graph 44 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers l'est

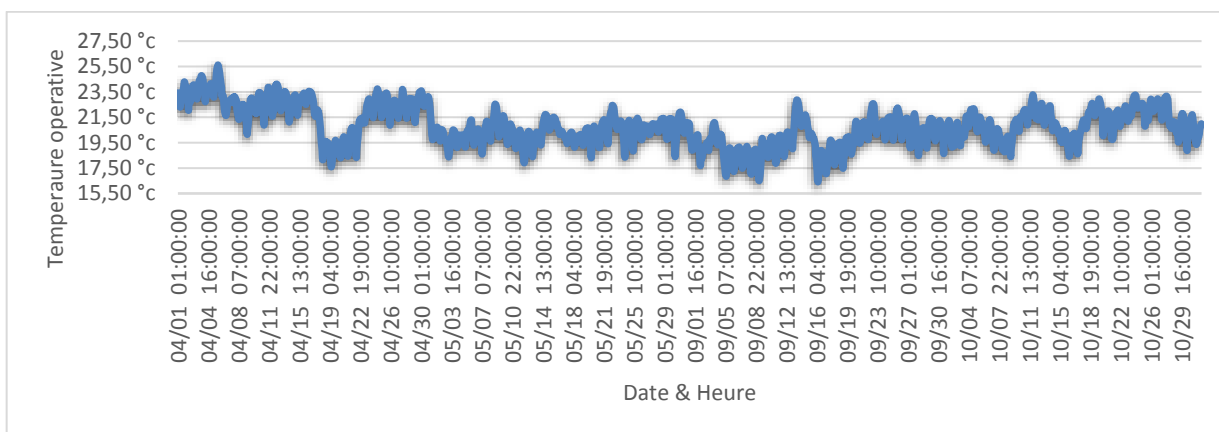
Dans cette exposition, la température opérative maximale et minimale annuelle dans le bâtiment est respectivement 25,62 °C et 14,67 °C, ou bien une température moyenne de 21,05 °C. Ces valeurs créent donc une amplitude de température  $\Delta T$  : 10,95 °C : on remarque une augmentation de + 0,11 °C à l'égard de l'orientation précédemment. En effet, pendant le temps suscité :

☞ Pour l'été, les températures opératives dans le bâtiment, d'après la courbe du graphe 45 ci-dessous, sont : de 22,01 °C [entre 18,89 °C et 25,35 °C] en novembre ; 22,77 °C [entre 20,52 °C et 25,42 °C] en décembre ; 23,29 °C [entre 21,17 °C et 25,02 °C] en janvier ; 23,21 °C [entre 20,91 °C et 24,83 °C] en février et 23,10 °C [entre 21,03 °C et 25,29 °C] en mars. Ces étendues, entre 18,89 °C et 25,42 °C, procréent une température moyenne de 22,87 °C.



Graphique 45 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est

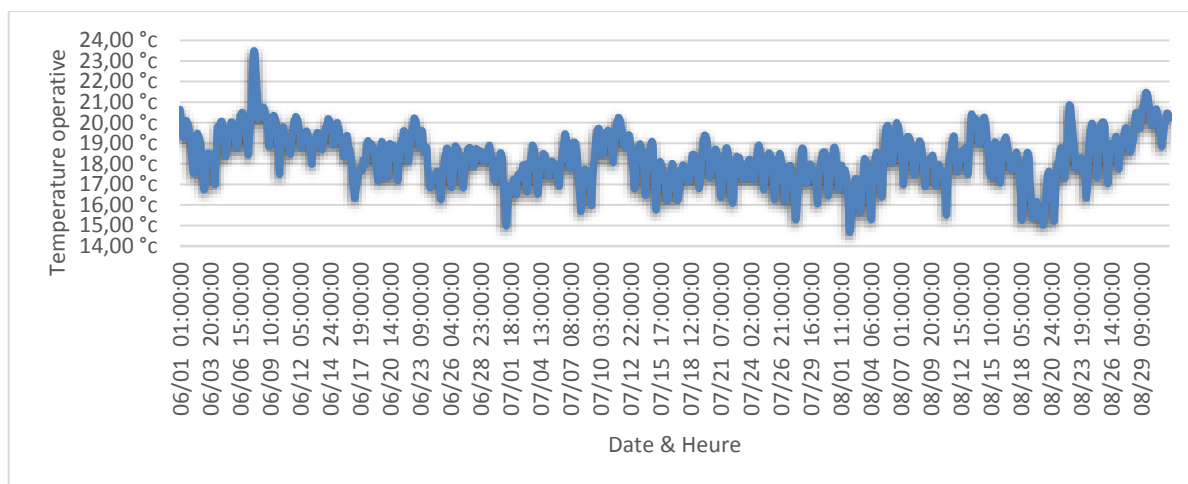
☞ Au-dedans de l'intersaison, elle est comprise entre 16,41 °C et 25,62 °C, comme informe la courbe du graphique 46 ci-après, donc une valeur moyenne de 20,84 °C.



Graphique 46 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison : orientation vers l'est

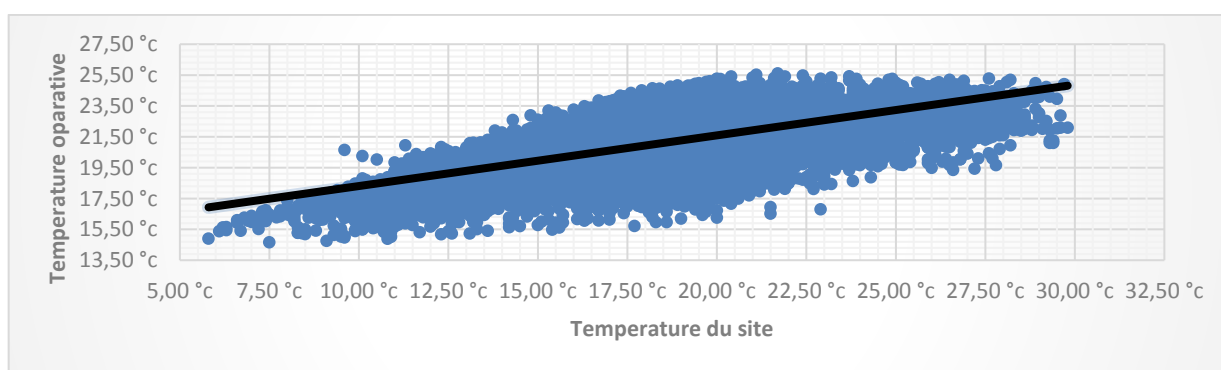
Durant cet espace de temps, on note 22,24 °C [17,59 °C à 25,62 °C] en avril ; 20,38 °C [17,91 °C à 22,54 °C] en mai ; 19,72 °C [16,41 °C à 22,86 °C] en septembre et 21,05 °C [18,40 °C à 23,27 °C] en octobre ; et

☞ Au sein de l'hiver, la température opérative moyenne enregistrée et illustrée par la courbe du graphique 47 ci-dessous, incluse entre 14,67 °C et 23,50 °C, dans le local est de 18,34 °C. Dans la période sus- citée : les températures opératives moyennes mensuelles enregistrées dans le bâtiment sont respectivement : 18,85 °C [16,26 °C à 23,50 °C] en juin ; 17,85 °C [14,98 °C à 20,26 °C] en juillet et 18,32 °C [14,67 °C à 21,47 °C] en aout.



Graph 47 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'hiver : orientation vers l'est

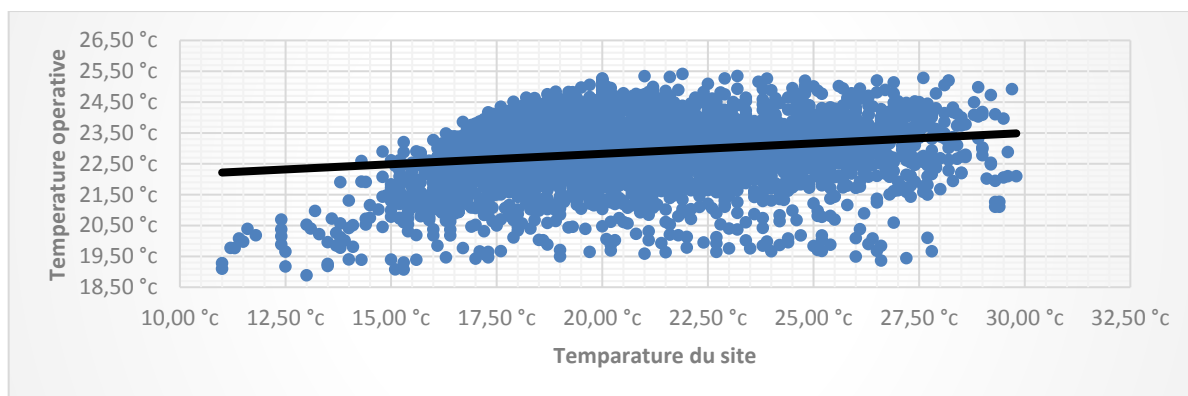
L'inclusion de ces étendues de températures opératives moyennes journalières, apportées par le graph 44 ci-dessus, dans le local du bâtiment avec celui du site (cf. graph 32) procure, en conséquence, le modèle d'ASHRAE ci-dessous.



Graph 48 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers l'est

Ce graphique renseigne que les températures ressenties par le propriétaire du bâtiment annuellement, dans le cas de cette hypothèse d'orientation, s'oscillent entre un espacement de 16,93 °C et 24,81 °C. On constate donc une variation de température annuelle  $\Delta T = 7,88$  °C : Donc + 0,12 °C par rapport à l'orientation vers le nord.

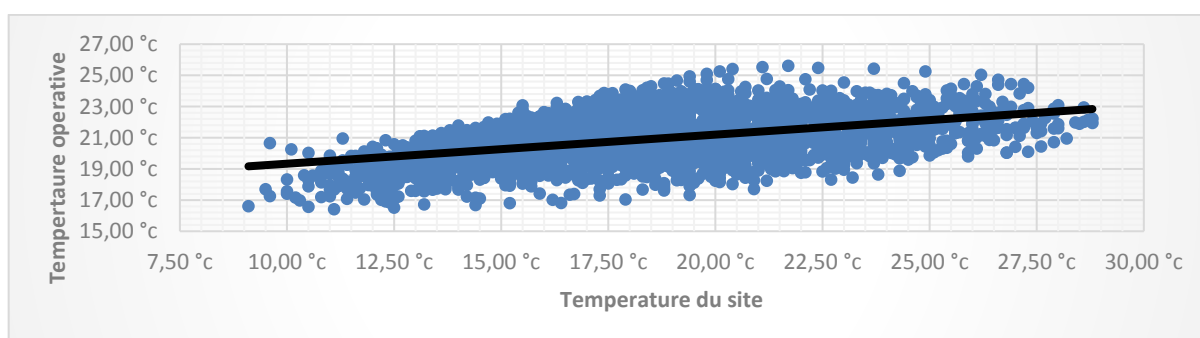
☞ Au moment de la période d'été de 5 mois, les températures moyennes mensuelles approuvées par le locataire du bâtiment sont : de 22,88 °C [entre 22,22 °C et 23,49 °C] en novembre ; 22,85 °C [entre 22,47 °C et 23,43 °C] en décembre ; 22,88 °C [entre 22,41 °C et 23,47 °C] en janvier ; 22,85 °C [entre 22,55 °C et 23,45 °C] en février et 22,89 °C [entre 22,54 et 23,46 °C] en mars. Comme fournis l'équation de la droite du graph 49 ci-dessous :



Graph 49 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est

Ces étendues, entre 22,22 °C et 23,49 °C, procurent une température opérative moyenne de 22,87 °C.

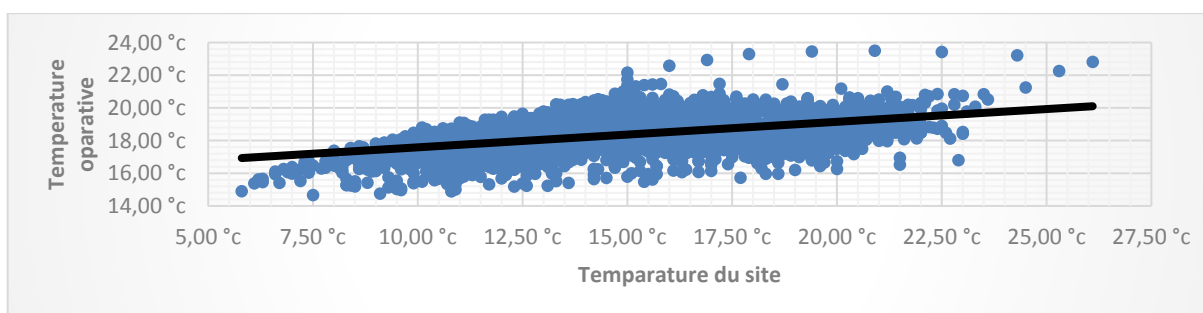
- ☞ Au fil de l'intersaison, elle est comprise entre 19,17 °C et 22,84 °C, comme renseigne la courbe du graphique 50 ci-après, donc une valeur moyenne de 20,84 °C.



Graph 50 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers l'est

Durant cet espace de temps, on relève 21,11 °C [19,43 °C à 22,80 °C] en avril ; 20,72 °C [19,45 °C à 22,32 °C] en mai ; 20,58 °C [19,17 °C à 22,60 °C] en septembre et 20,96 °C [19,26 °C à 22,84 °C] en octobre ; et

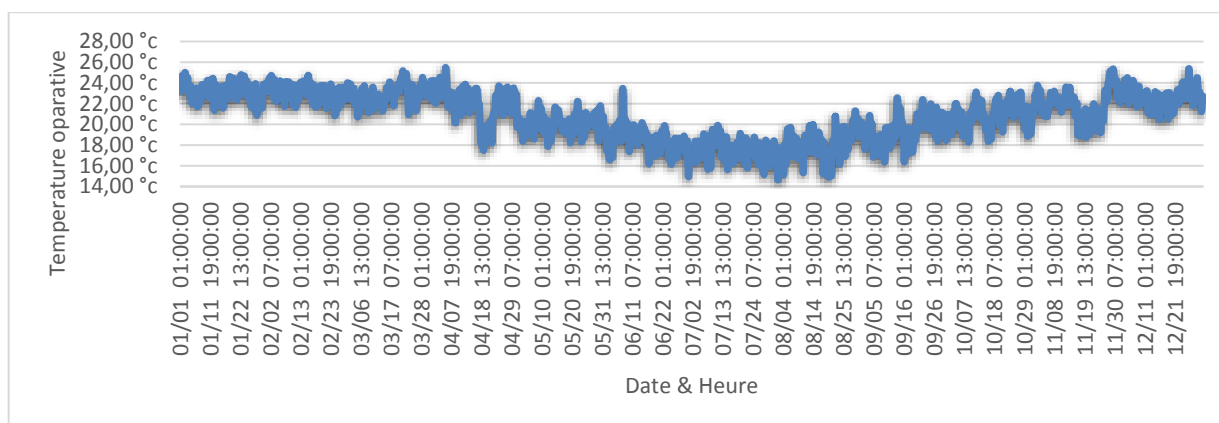
- ☞ En temps de l'hiver, la température consignée par la peau des locataires du bâtiment, et illustrée par le graphique 51 ci-dessous, inclus entre 16,93 °C et 20,10 °C, dans le local est de 18,34 °C.



Graph 51 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'hiver : orientation vers l'est

Dans cette période, les températures opératives moyennes, mensuelles enregistrées par la surface cutanée dans le bâtiment sont respectivement : 18,43 °C [17,34 °C à 20,10 °C] en juin ; 18,27 °C [17,07 °C à 19,60 °C] en juillet et 18,38 °C [16,93 °C à 19,69 °C] en août.

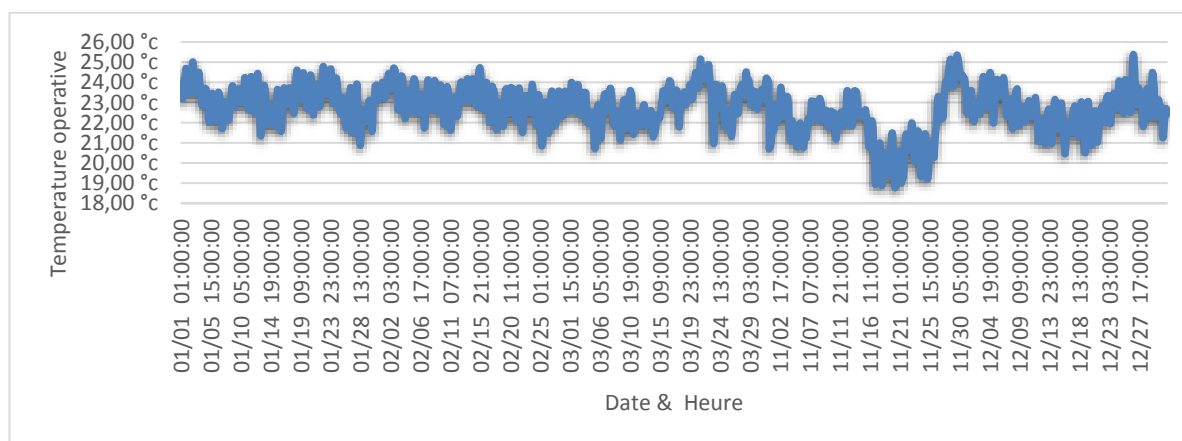
### VIII-1-3- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le sud



Graphe 52 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers le sud

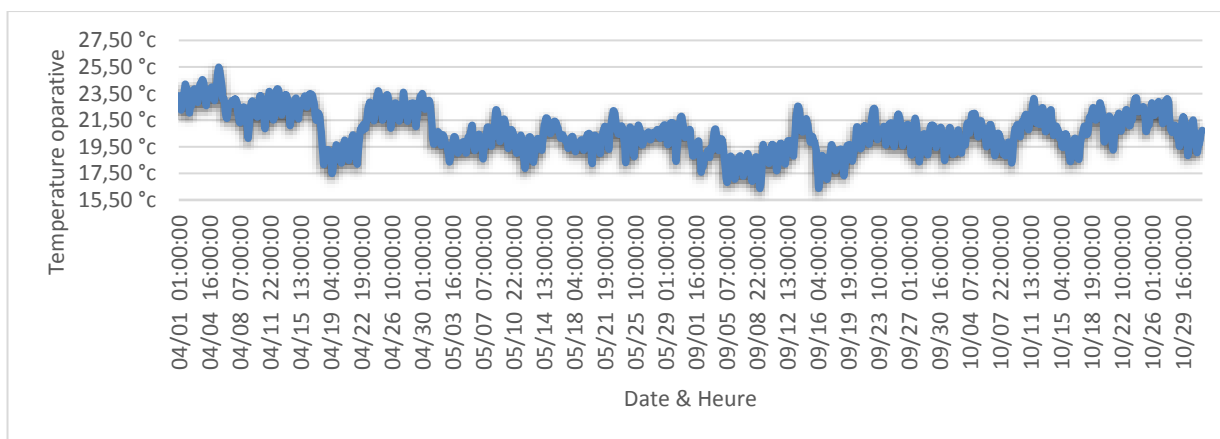
Au lieu de cette orientation, la condition atmosphérique opérative dans le bâtiment est estimée à 20,91 °C. Donc fluctuée entre 14,64 °C et 25,49 °C, c'est-à-dire, dans un écart de  $\Delta T$  : 10,85 °C. On note dans cette condition une augmentation de 0,10 °C par rapport à l'orientation vers l'est et une augmentation de + 0,01 °C par rapport à l'orientation vers le nord. De cette façon :

☞ Pendant l'été, les températures opératives moyennes mensuelles dans l'habitation seront : 21,89 °C [18,76 °C à 25,36 °C] en novembre ; 22,72 °C [20,45 °C à 25,39 °C] en décembre ; 23,21 °C [20,88 °C à 25,02 °C] en janvier, 23,14 °C [20,84 °C à 24,73 °C] en février et 22,99 °C [20,71 °C à 25,16 °C] en mars. Ces mesures donnent lieu à une température moyenne de 22,79 °C, comprise entre 18,76 °C et 25,39 °C, selon la courbe du graphe 53, ci-dessous :



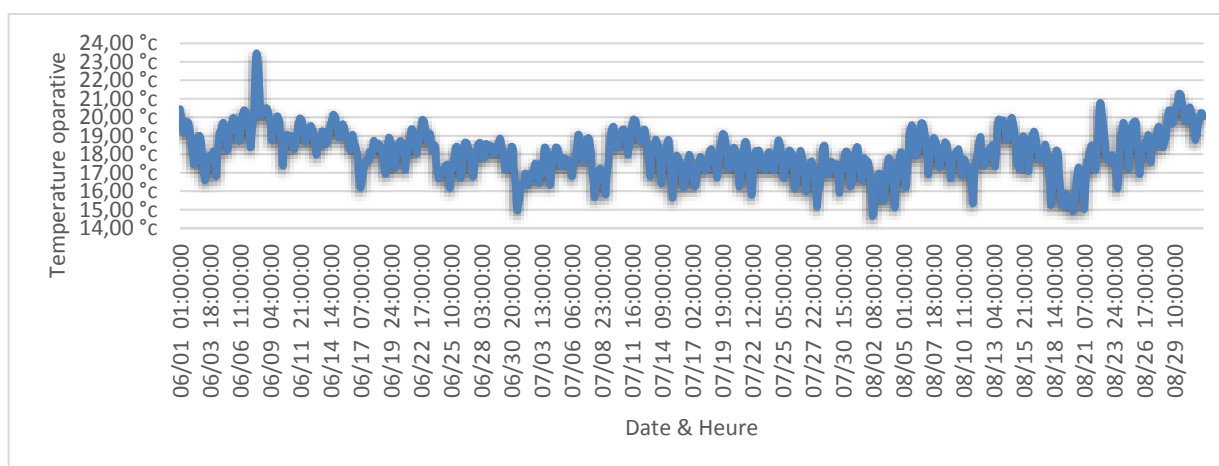
Graphe 53 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud

☞ Quant à l'intersaison, elle est en moyenne 20,69 °C. Cette température, située entre 16,36 °C et 25,49 °C, comme illustre la courbe du graphique ci-dessous, est composée par 22,13 °C [17,48 °C à 25,49 °C] pour le mois d'avril ; 20,22 °C [17,87 °C à 22,29 °C] en mai ; 19,53 °C [16,36 °C à 22,56 °C] au cours du mois de septembre et 20,89 °C [18,28 °C à 23,20 °C] en octobre.



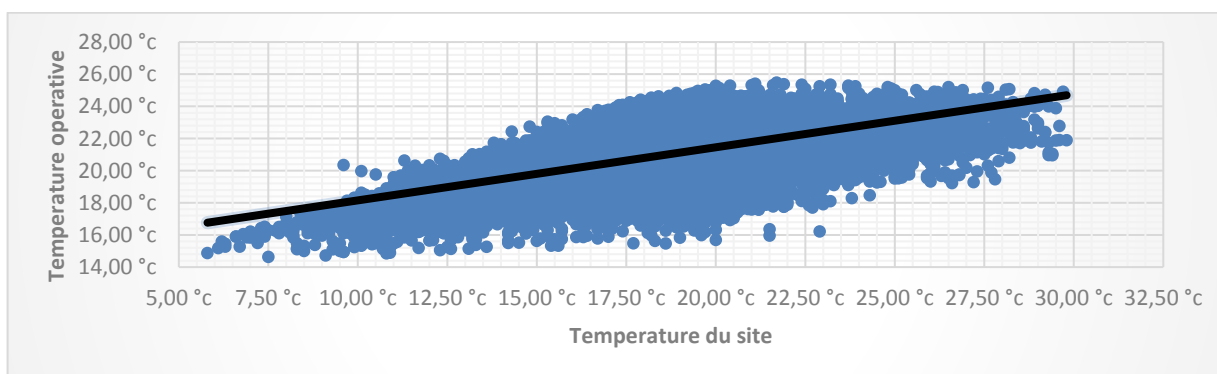
Graph 54 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison d'été : orientation vers le sud

☞ Et pour l'hiver, elle est évaluée en moyenne à 18,11 °C, donc oscille entre 14,64 °C et 23,47 °C : C'est-à-dire 18,64 °C [16,15 °C à 23,47 °C] en juin ; 17,61 °C [14,95 °C à 19,90 °C] en juillet et 18,09 °C [14,64 °C à 21,30 °C] en août. La courbe du graphique suivante affirme la validité de ces valeurs :



Graph 55: Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'hiver : orientation vers le sud

L'exploration des températures moyennes journalières, mise à la disposition par le graph 52 et interprétée ci-devant, avec celui du site (cf. graph 32) donne en conséquence le modèle d'ASHRAE ci-après.

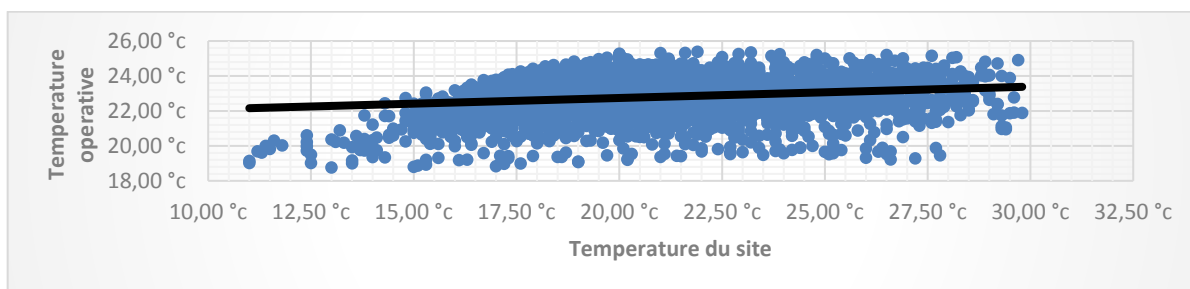


Graph 56 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers le sud

On retient à partir de ce graphique que la chaleur captée par la surface cutanée du locataire du bâtiment est en moyenne 20,91 °C, c'est-à-dire comprise entre un intervalle de température de 16,76 °C et 24,69 °C

et réside dans une portée de  $\Delta T = 7,93\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $+0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$  par rapport à l'orientation vers l'est et  $+0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$  par rapport à celle vers le nord. On retranche à partir de ces données annuelles que :

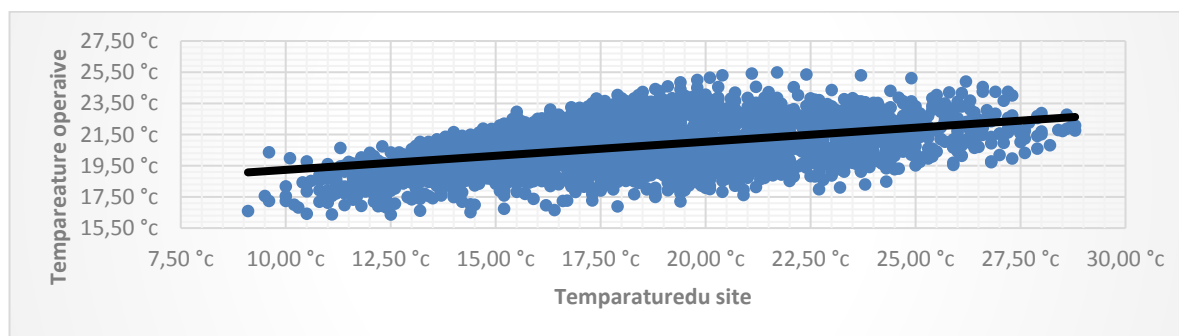
- ☞ En cours de l'été de 5 mois, les températures moyennes journalières senties par l'occupant du bâtiment diversifient entre  $22,16\text{ }^{\circ}\text{C}$  (novembre) et  $23,38\text{ }^{\circ}\text{C}$  (novembre) en suivant la ligne de tendance, donnée par le graphe 57 ci-après, des nuages de points entre les températures moyennes journalières du site ainsi que le local du bâtiment durant la période considérée.



Graph 57 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud

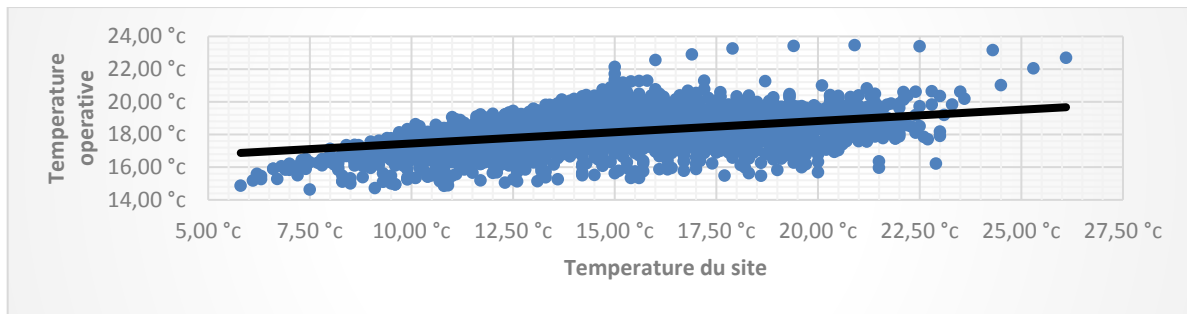
Dans cet intervalle, les températures ressenties par le locataire du bâtiment sont en moyenne respectivement de  $22,79\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $22,16\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $23,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] durant le mois de novembre ;  $22,77\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $22,40\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $23,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] pendant le mois de décembre ;  $22,79\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $22,34\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $23,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] au cours du mois de janvier ;  $22,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $22,48\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $23,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] en février et  $22,81\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $22,47\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $23,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] dans le mois de mars. Ces valeurs engendrent une température moyenne de  $22,79\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- ☞ Au fil de l'intersaison de 4 mois, les températures ressenties par l'occupant du bâtiment affaiblissent, avec une condition atmosphérique moyenne de  $20,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire entre  $19,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  (mois de septembre) et  $22,63\text{ }^{\circ}\text{C}$  (mois d'octobre). Dans laquelle on aperçoit  $20,95\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $19,33\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $22,59\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] durant le mois d'avril ;  $20,58\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $19,34\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $22,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] pendant le mois de mai ;  $20,44\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $19,07\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $22,39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] au sein du mois de septembre et  $20,81\text{ }^{\circ}\text{C}$  [ $19,16\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $22,63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ] en octobre, comme éclaire le tracé du graphique suivant :



Graph 58 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le sud

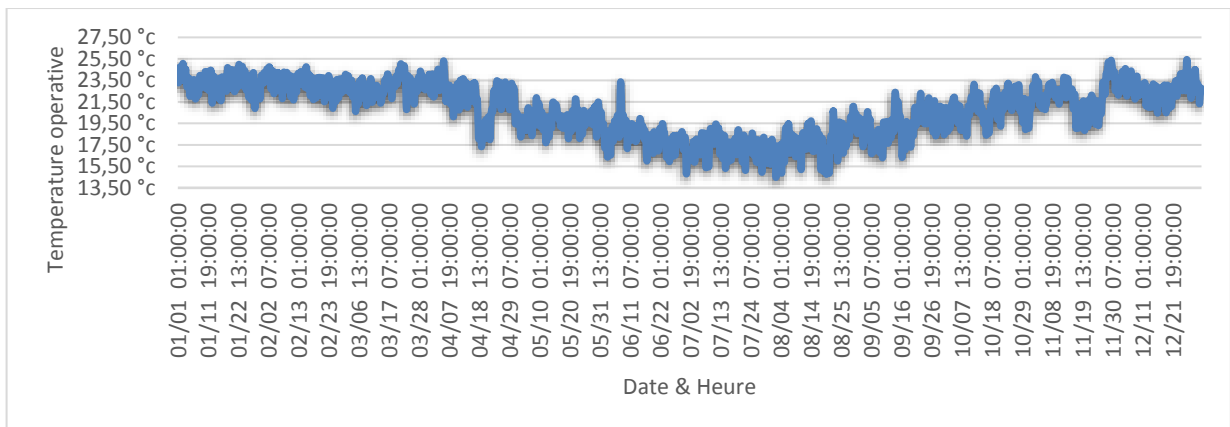
- ☞ En hiver, la température moyenne sentie par le propriétaire du bâtiment dans le local est de  $18,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cette valeur est entre  $16,87\text{ }^{\circ}\text{C}$  (août) et  $19,67\text{ }^{\circ}\text{C}$  (juin), comme renseigne la droite de tendance des nuages de points du graphique qui-suit :



Graph 59 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le sud

Dans cet intervalle de température, les températures moyennes journalières cernées par l'occupant du bâtiment sont respectivement : 18,20 °C [17,23 °C à 19,67 °C] au mois de juin ; 18,05 °C [17,00 °C à 19,23 °C] en juillet et 18,08 °C [16,87 °C à 19,31 °C] durant le mois d'août.

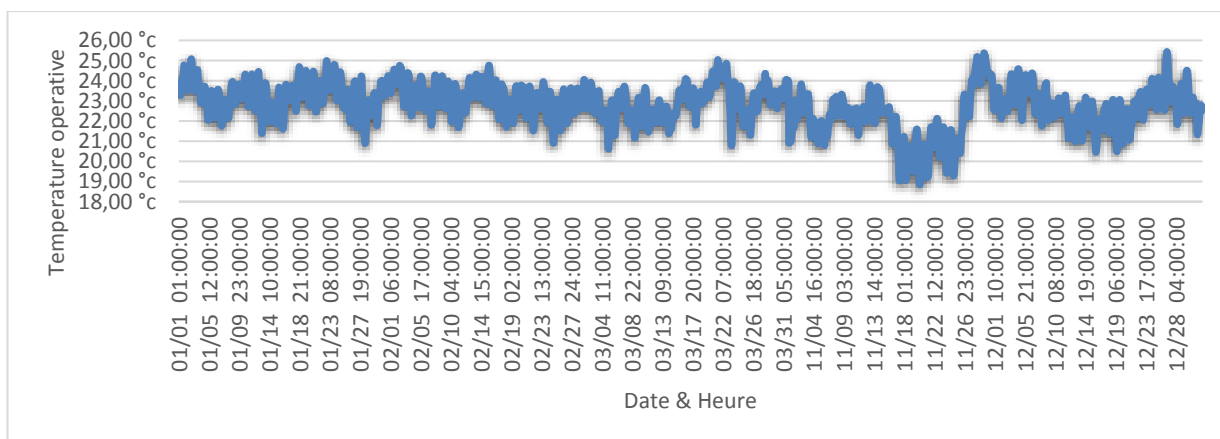
#### VIII-1-4- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'ouest



Graph 60 : Températures opératives journalières dans le bâtiment : orientation vers l'ouest

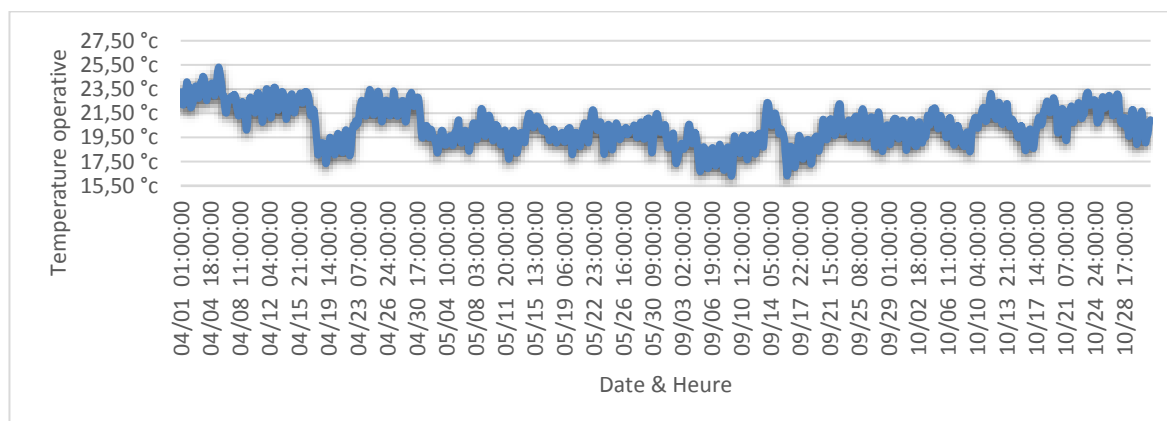
Et enfin, la température opérative maximale et minimale dans le bâtiment, dans ce scénario d'orientation, est respectivement 25,44 °C et 14,48 °C. Ces valeurs valent en moyenne 20,80 °C. Celles-là occasionnent une variation de  $\Delta T = 10,96$  °C. On observe dans cette classe une accrue de température de + 0,11 °C à l'égard de l'agencement du bâtiment vers le sud, + 0,01 °C en comparaison avec celui de l'est et + 0,12 °C vis-à-vis de la disposition vers le nord. Dans ces conditions :

☞ En été, les températures opératives dans l'habitation seront : 22,84 °C [22,29 °C à 23,35 °C] en novembre ; 22,83 °C [22,51 °C à 23,31 °C] en décembre ; 22,85 °C [22,45 °C à 23,34 °C] en janvier ; 22,85 °C [22,58 °C à 23,33 °C] en février et 22,86 °C [22,56 °C à 23,33 °C] en mars, suivant l'information fournie par la courbe du graphique ci-après. Ces mesures donnent lieu à une température moyenne de 22,84 °C, comprise entre 18,84 °C (novembre) et 25,44 °C (décembre).



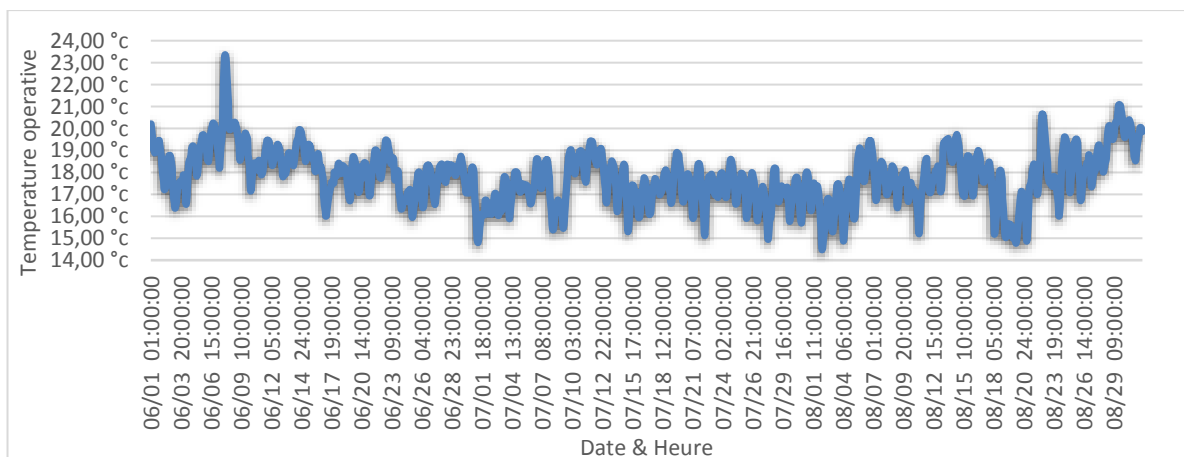
Graph 61 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant la période d'été : orientation vers l'est

☞ En intersaison, elle est estimée à 20,54 °C. Cette température opérative, incluse dans l'intervalle de 16,30 °C (en septembre) et 25,31 °C (en avril), selon l'information relevée dans la courbe du graphique 62 ci-après, est composée par 21,94 °C [17,33 °C à 25,31 °C] pour le mois d'avril ; 19,94 °C [17,71 °C à 22,11 °C] au mois de mai ; 19,41 °C [16,30 °C à 22,39 °C] au cours du mois de septembre et 20,88 °C [18,32 °C à 23,24 °C] en octobre.



Graph 62 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'intersaison : orientation vers l'est

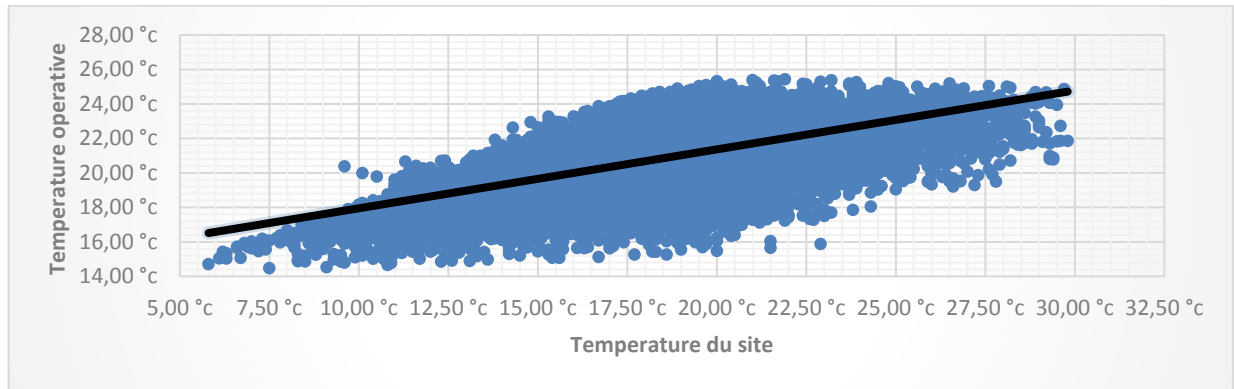
☞ En l'hiver, elle est estimée, entre 14,48 °C (en aout) et 23,36 °C (en juin), soit en moyenne à 17,81 °C. Comme éclaire le graphique suivant :



Graph 63 : Températures opératives journalières dans le bâtiment durant l'hiver : orientation vers l'est

Pour chaque mois de ce temps, on enregistre 18,35 °C [15,94 °C à 23,36 °C] en juin ; 17,27 °C [14,80 °C à 19,43 °C] en juillet et 17,82 °C [14,48 °C à 21,09 °C] en août.

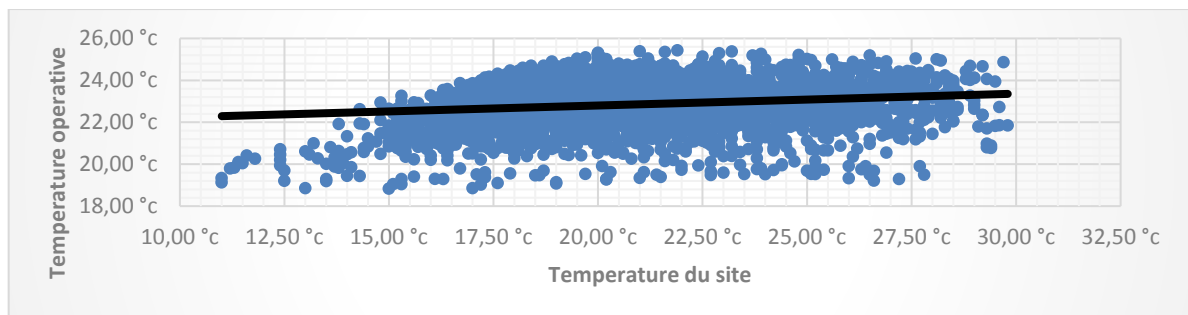
En effet, l'interpolation de ces températures moyennes journalières analysées et données par le graphe 60 ci-dessus, avec celle de la localisation du projet, fournissent les valeurs figurées sur le modèle d'ASHRAE ci-après.



Graphe 64 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment : orientation vers l'ouest

On retranche, à partir de ce graphique, qu'annuellement l'occupant du bâtiment a eu des températures fluctuant entre 16,51 °C et 24,72 °C, en moyenne 20,80 °C, c'est-à-dire une dans une amplitude de  $\Delta T = 8,20$  °C : +0,43 °C par rapport à l'orientation vers le nord ; + 0,32 °C par rapport à l'orientation vers l'est ; et + 0,28 °C par rapport à celle du sud. Parmi ceux :

☞ Dans la période d'été de 5 mois, les températures senties par l'occupant du bâtiment fluctuent entre 22,29 °C (novembre) et 23,35 °C (pareillement) en suivant la ligne de tendance, donnée par le graphe 65 ci-après, des nuages de points entre les températures journalières du site ainsi que les températures opératives dans le bâtiment durant la période considérée.

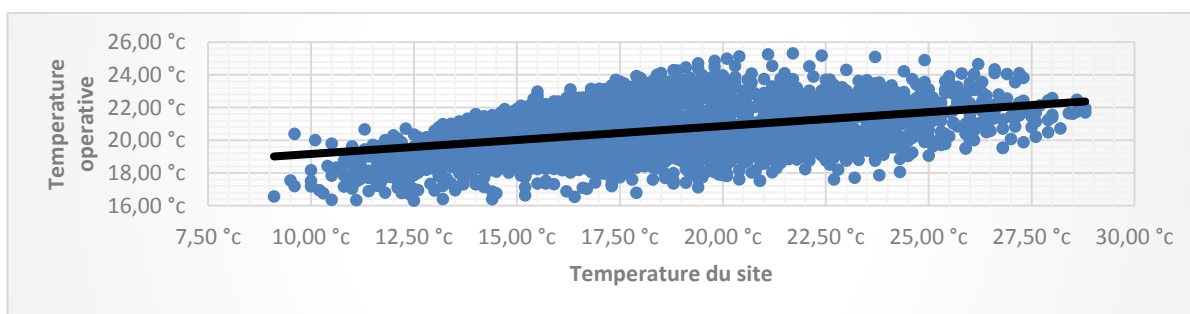


Graphe 65 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant la période d'été : orientation vers le nord

Dans cet intervalle de températures, le locataire du bâtiment ont eu en moyenne 22,84 °C [22,29 °C à 23,35 °C] durant le mois de novembre ; 22,83 °C [22,51 °C à 23,31 °C] pendant le mois de décembre ; 22,85 °C [22,45 °C à 23,34 °C] au cours du mois de janvier ; 22,8 3 °C [22,58 °C à 23,33 °C] en février et 22,86 °C [22,56 °C à 23,33 °C] au mois de mars. Ces valeurs engendrent une température moyenne mensuelle de 22,84 °C.

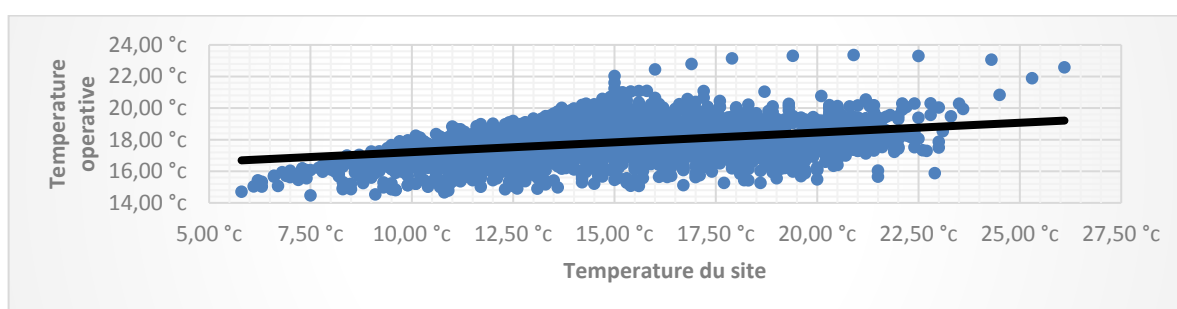
☞ Tout le long de l'intersaison de 4 mois, les températures éprouvées par l'occupant du bâtiment

s'affaiblissent, avec une condition climatique moyenne de 20,54 °C, c'est-à-dire entre 19,01 °C (mois de septembre) et 22,37 °C (mois d'octobre). Dans laquelle on aperçoit 20,78 °C [19,24 °C à 22,33 °C] durant le mois d'avril ; 20,43 °C [19,26 °C à 21,89 °C] pendant le mois de mai ; 20,30 °C [19,01 °C à 22,15 °C] au mois de septembre et 20,65 °C [19,09 °C à 22,37 °C] en octobre, comme éclaire le tracé du graphique suivant



Graph 66 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment pendant l'intersaison : orientation vers le nord

☞ En hiver, la température moyenne sentie par le propriétaire du bâtiment dans le local est de 17,81 °C. Cette valeur est incluse entre 16,69 °C (en aout) et 19,21 °C (en juin), comme renseigne la droite de tendance des nuages de points du graphique qui-suit :



Graph 67 : Températures journalières senties par l'occupant du bâtiment durant l'hiver : orientation vers le nord

Dans cet intervalle de température, les températures moyennes cernées par l'occupant du bâtiment sont respectivement : 17,89 °C [17,01 °C à 19,21 °C] au mois de juin ; 17,76 °C [16,80 °C à 18,81 °C] en juillet et 17,78 °C [16,69 °C à 18,89 °C] durant le mois d'aout.

#### VIII-1-5- Synthèse de l'analyse et interprétation des résultats

Premièrement, on constate qu'à partir des analyses réalisées ci-dessus, les courbes des températures opératives dans le bâtiment ne se coïncident pas avec celles des températures du site. Par contre :

☞ L'allure des courbes des températures opératives journalières dans le bâtiment, liée à chaque hypothèse d'orientation choisie, épouse l'évolution de celle du site. Cependant, on observe un déphasage thermique très remarquable entre ces deux environnements. Ces phénomènes d'hystérésis mettent en évidence la notion théorique, concernant [l'évolution de la température intérieure d'un local du bâtiment](#), développée dans le sous-paragraphe IV-8-2 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, notamment sur le déphasage, expliqué par la relation 71, entre la température opérative et température

externe d'un bâti engendré par les paramètres thermophysiques des matériaux constituant l'ensemble de l'enveloppe du modèle de bâtiment, y compris les valeurs estimées de la capacité thermique ainsi que la conductivité thermique des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka. En effet :

- La température moyenne enregistrée sur le site est de 14,80 °C durant la période d'hiver, c'est-à-dire oscillent entre 5,80 °C et 26,10 °C, tandis que les températures opératives dans le bâtiment, elles varient respectivement, entre 14,48 °C (orientation vers l'ouest) et 23,36 °C (idem), en fonction de l'orientation de la façade principale du bâtiment, comme résume le tableau ci-après ;

Tableau 66 : Températures opératives dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'hiver

| Orientation choisie | Température opérative |          |          | $\Delta T$ |
|---------------------|-----------------------|----------|----------|------------|
|                     | Minimale              | Maximale | Moyenne  |            |
| Nord                | 14,52 °C              | 23,49 °C | 18,04 °C | 8,96 °C    |
| Est                 | 14,67 °C              | 23,50 °C | 18,34 °C | 8,83 °C    |
| Sud                 | 14,64 °C              | 23,47 °C | 18,11 °C | 8,83 °C    |
| Ouest               | 14,48 °C              | 23,36 °C | 17,81 °C | 8,88 °C    |

- Durant l'intersaison, elle est estimée entre 9,10 °C et 28,80 °C, donc en moyenne 18,08 °C dans l'emplacement du projet et oscille entre 16,30 °C (orientation vers l'ouest) et 25,62 °C (orientation vers l'est), donc en moyenne 20,66 °C, pour les températures opératives dans le bâtiment. Les données fournies par le tableau 67 ci-dessous confirment cette information.

Tableau 67 : Températures opératives dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'intersaison

| Orientation choisie | Température opérative |          |          | $\Delta T$ |
|---------------------|-----------------------|----------|----------|------------|
|                     | Minimale              | Maximale | Moyenne  |            |
| Nord                | 16,32 °C              | 25,36 °C | 20,55 °C | 9,04 °C    |
| Est                 | 16,41 °C              | 25,62 °C | 20,84 °C | 9,20 °C    |
| Sud                 | 16,36 °C              | 25,49 °C | 20,69 °C | 9,12 °C    |
| Ouest               | 16,30 °C              | 25,31 °C | 20,54 °C | 9,01 °C    |

- Pendant l'été, la température journalière, située dans l'intervalle de 11,00 °C à 29,80 °C, du site est de 20,72 °C, à l'encontre d'une étendue de températures opératives de 18,61 °C (orientation vers le nord) et 25,44 °C (orientation vers l'ouest) dans l'intérieur du bâtiment (en moyenne 22,81 °C). Ces hypothèses sont confirmées par le tableau 68 ci-dessous :

Tableau 68 : Température opérative dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant la période d'été

| Orientation choisie | Température opérative |          |          | $\Delta T$ |
|---------------------|-----------------------|----------|----------|------------|
|                     | Minimale              | Maximale | Moyenne  |            |
| Nord                | 18,61 °C              | 25,29 °C | 22,73 °C | 6,68 °C    |
| Est                 | 18,89 °C              | 25,42 °C | 22,87 °C | 6,53 °C    |
| Sud                 | 18,76 °C              | 25,39 °C | 22,79 °C | 6,62 °C    |
| Ouest               | 18,84 °C              | 25,44 °C | 22,84 °C | 6,60 °C    |

Dans les grandeurs mises en exergue ci-dessus :

- Les températures opératives minimale d'hiver (17,81 °C) et maximale (22,87 °C) de l'été, enregistrées dans l'enceinte du bâtiment se trouvent respectivement dans le cas où la façade principale du bâtiment

est orientée vers l'ouest et dans la condition de l'orientation vers l'est ;

- On observe que l'impact de l'essai d'orientation du modèle du bâtiment choisi n'a que peu d'impacts sur les températures opératives dans le bâtiment, les températures opératives moyennes (autour de : 18 °C en hiver, 20 °C durant l'intersaison et 22 °C en été) ainsi que les variations saisonnières,  $\Delta T$ , des températures opératives dans le bâtiment. Les données par les tableaux ci-dessus en témoignent.

☞ Quant aux températures senties par l'occupant du bâtiment, conformément à chaque essai d'orientation de la façade principale du bâtiment, les résultats obtenus montrent bien que les températures opératives moyennes approuvées par l'occupant du local sont bien inscrites dans la norme de température définie par l'ASHRAE [17,50 °C à 30 °C] supportable par un individu dans le cas d'un bâtiment naturellement ventilé (cf. tableau 69 ci-dessous). En effet :

- ✓ Même si les températures minimales senties par l'occupant du bâtiment sont inférieures à zéro virgule près, par rapport à la valeur minimale de 17,50 °C fixée par ASHRAE en hiver : 16,83 °C c'est à dire - 0,67 °C dans le cas de l'orientation du modèle du bâtiment vers le nord, 16,93 °C ou bien - 0,57 °C pour l'est, 16,87 °C ou - 0,63 quant au sud et 16,69 ou - 0,81 celui de l'ouest, comme informe le tableau 69 ci-dessous, leurs valeurs moyennes annuelles de : 18,04 °C pour l'orientation de la façade principale vers le Nord ; 18,34 °C pour l'Est ; 18,11 °C pour le sud et 17,81 °C dans le cas de l'orientation vers l'Ouest sont bien inscrites dans la norme suscitée.

Tableau 69 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant la période d'hiver

| Orientation choisie | Température sentie |          |          | $\Delta T$ |
|---------------------|--------------------|----------|----------|------------|
|                     | Minimale           | Maximale | Moyenne  |            |
| Nord                | 16,83 °C           | 19,55 °C | 18,04 °C | 2,72 °C    |
| Est                 | 16,93 °C           | 20,10 °C | 18,34 °C | 3,17 °C    |
| Sud                 | 16,87 °C           | 19,67 °C | 18,11 °C | 2,80 °C    |
| Ouest               | 16,69 °C           | 19,21 °C | 17,81 °C | 2,52 °C    |

- ✓ Pendant l'intersaison et en été, les températures extrêmes senties par la surface cutanée d'un individu situé à l'intérieur du bâtiment sont bien inscrites dans la norme citée ci-haut. En conséquence leurs valeurs moyennes sont aussi dedans. Les synthèses de ces grandeurs dans les tableaux 70 et 71 suivants justifient ces informations.

Tableau 70 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'intersaison

| Orientation choisie | Température sentie |          |          | $\Delta T$ |
|---------------------|--------------------|----------|----------|------------|
|                     | Minimale           | Maximale | Moyenne  |            |
| Nord                | 19,05 °C           | 22,34 °C | 20,55 °C | 3,29 °C    |
| Est                 | 19,17 °C           | 22,84 °C | 20,84 °C | 3,67 °C    |
| Sud                 | 19,07 °C           | 22,63 °C | 20,69 °C | 3,55 °C    |
| Ouest               | 19,01 °C           | 22,37 °C | 20,54 °C | 3,36 °C    |

Tableau 71 : Températures senties dans le bâtiment, suivant leur orientation, durant l'été

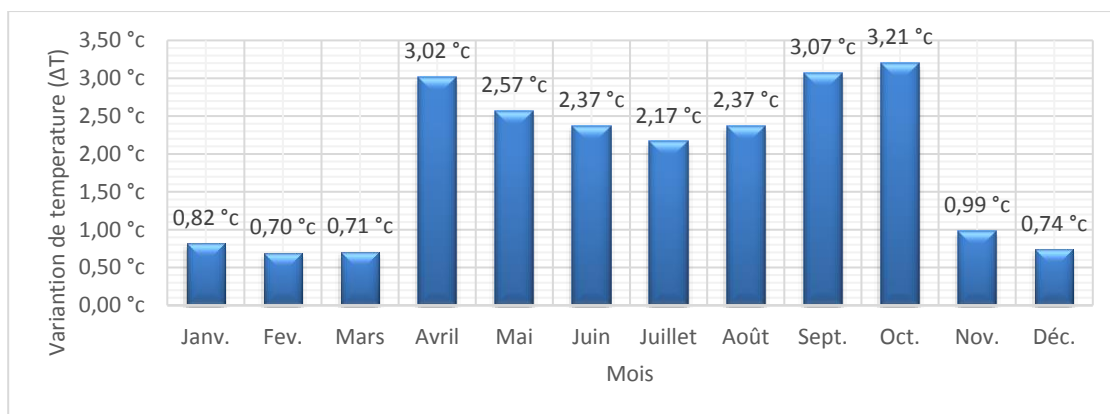
| Orientation choisie | Température sentie |     |         | $\Delta T$ |
|---------------------|--------------------|-----|---------|------------|
|                     | Minimum            | Max | Moyenne |            |

|       |          |          |          |         |
|-------|----------|----------|----------|---------|
| Nord  | 22,22 °C | 23,20 °C | 22,73 °C | 0,99 °C |
| Est   | 22,22 °C | 23,49 °C | 22,87 °C | 1,27 °C |
| Sud   | 22,16 °C | 23,38 °C | 22,79 °C | 1,22 °C |
| Ouest | 22,29 °C | 23,35 °C | 22,84 °C | 1,06 °C |

Avec respectivement : 20,55 °C et 22,73 °C pour l'orientation de la façade principale vers le Nord ; 20,84 °C et 22,87 °C pour l'Est, 20,69 °C et 22,79 °C pour le sud et 20,54 °C ainsi que 22,84 °C dans le cas de l'orientation vers l'Ouest.

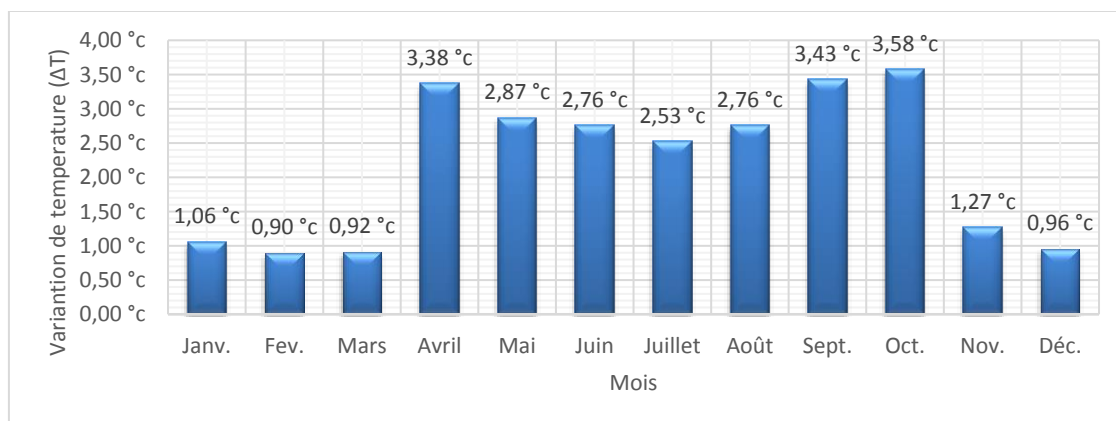
On déduit à partir des données obtenues précédemment que :

- Relativement à la corrélation entre les températures du site enregistré ainsi que les températures opératives dans le bâtiment pour les trois saisons de l'année, les différentes valeurs de température senties par le propriétaire du bâtiment mises en exergue ci-dessus justifient la théorie de l'ASHRAE relative à l'effet de l'interdépendance de l'environnement externe et celui de la température d'ambiance d'un bâtiment sur le confort thermique d'un individu dans un bâti ;
- Par analogie aux températures opératives obtenues dans les locaux du bâtiment analysées ci-haut, on constate que les différents essais d'orientation de la façade principale du bâtiment, relatifs à chaque saison de la capitale de Madagascar, n'ont aussi qu'une faible conséquence sur les températures senties par l'occupant du bâtiment : fluctuent entre 17,81 °C et 18,34 °C en hiver, entre 20,54 °C et 20,84 en intersaison et 22,73 °C et 22,84 °C en été comme renseignent les tableaux ci-dessus. Donc, quelle que soit l'orientation choisie, les températures opératives moyennes obtenues dans les locaux du modèle du bâtiment montrent que, thermiquement, l'occupant du futur bâtiment sentira toujours confortable dans son habitation. Par contre, la variation,  $\Delta T$ , de la température ressentie dans le bâtiment pour chaque orientation optée est très significative pour le choix de l'orientation de la façade principale du modèle étudié, car elle conditionne la stabilité en continu de l'ambiance thermique d'un local. En effet, nous savons bien que le corps humain est très sensible au changement de température surtout aux environnements qui l'entourent, car un changement de température d'un degré d'un corps humain peut le mettre dans un désordre considérable. Cela implique que le corps humain cherche toujours un environnement/local ayant la température la plus stable durant toute l'année. Dans ce cas-là, on peut déduire à partir de l'analyse des températures senties par l'occupant du bâtiment précédemment, fournies dans les tableaux ci-après, l'amplitude mensuelle en °C, les températures cutanées de l'occupant du bâtiment, par rapport à chaque essai d'orientation de la façade principale du bâtiment :
  - ☛ Pour l'orientation vers le nord : La variation annuelle de la température sentie dans le local du bâtiment est de 1,90 °C. Dans cette condition : elle variera entre 0,70 °C à 0,99 °C en été, 2,57 °C à 3, 21 °C durant l'intersaison et de 2,17 °C à 2,37 °C en hiver, comme informe le graphique ci-après :



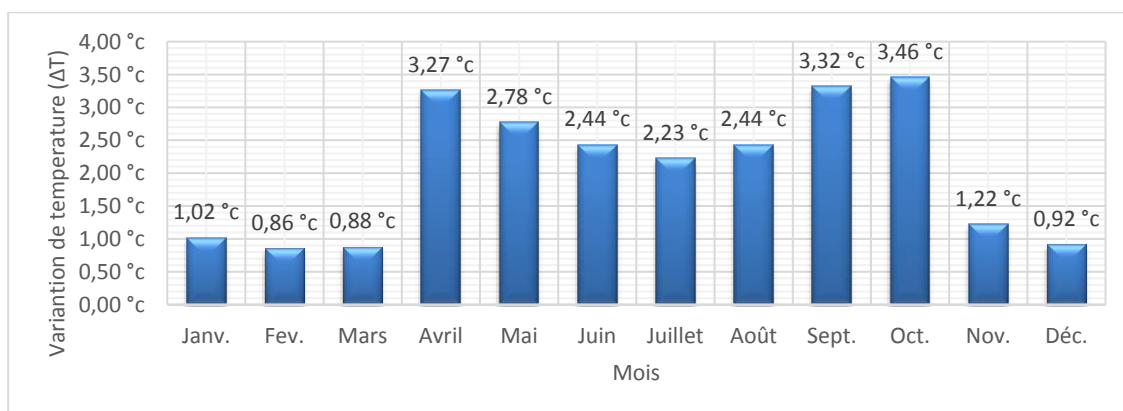
Graph 68: Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment : orientation vers le nord

☞ Quant à l'orientation vers l'est : La variation annuelle de l'ambiance sentie par l'occupant du bâtiment est de 2,20 °C. Dans cet état, elle variera entre 0,90 °C à 1,27 °C dans l'été, 2,87 °C à 3,58 °C à la saison de l'intersaison et de 2,53 °C à 2,76 °C pendant hiver, comme renseigne le graphique ci-après :



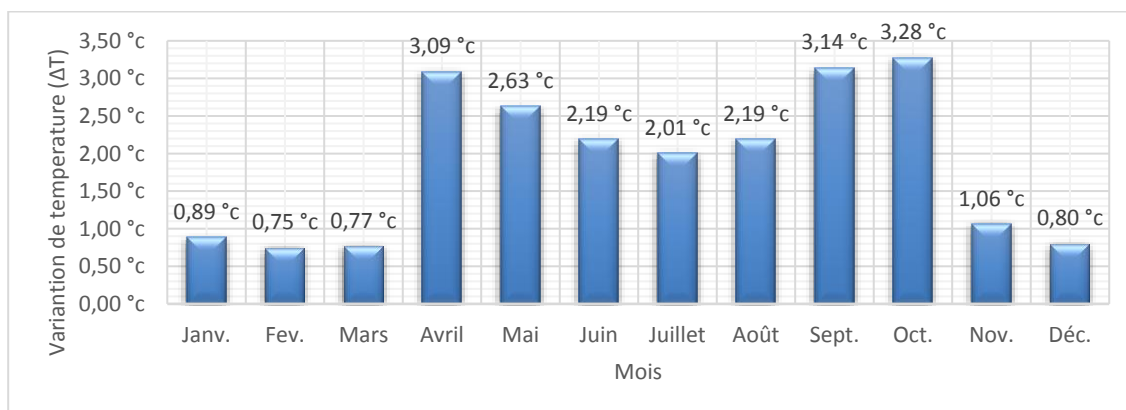
Graph 69: Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment : orientation vers l'est

☞ En ce qui concerne l'orientation vers le sud : La portée annuelle de la condition atmosphérique ressentie dans le local du bâtiment est de 2,07 °C. Dans ce cas-là : elle est fluctuée entre 0,86 °C à 1,22 °C en été, 2,78 °C à 3,46 °C durant l'intersaison et de 2,23 °C à 2,44 °C en hiver, comme informe le graphique ci-après :



Graph 70: Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment : orientation vers le sud

☞ Et en fin, pour l'orientation vers l'ouest : Le changement annuel de la température sentie par le propriétaire du bâtiment est de 1,90 °C. Dans cette circonstance, elles se sont modifiées entre 0,75 °C à 1,06 °C au-dedans d'été, 2,63 °C à 3,28 °C au moment de l'intersaison et de 2,01 °C à 2,19 °C au sein de l'hiver, comme informe le graphique qui suit :



Graph 71: Variation mensuelle de température sentie par l'occupant du bâtiment: orientation vers l'ouest

En conséquence, d'après les informations fournies par les différentes valeurs d'amplitudes des températures senties ci-dessus, on constate que durant l'été, elles sont, dans tout le cas d'orientation, plus ou moins stables : 0,70°C à 1,27 °C. Ce décalage augmente entre 2,01 °C à 2,76 °C en hiver et 2,57°C à 3,58 °C durant l'intersaison. Ces différences de températures très frappantes engendrées par la circulation d'air naturel dans le bâtiment durant ces périodes engendreraient ainsi des changements de températures moyennes mensuelles corporelles proportionnelles à ces oscillations, qui naitront bien évidemment des effets psychosensoriels très remarquables pour les occupants du bâtiment. Ainsi le choix de l'orientation optimale de la façade principale du bâtiment ne doit pas se porter seulement sur la variation annuelle, dont 1,90 °C dans le cas de l'essai de l'orientation de la façade principale dans le nord et dans l'ouest, 2,20 °C pour l'est et 2,07 quant au sud, mais aussi sur la prise en considération de la moyenne minimale de l'étendue des températures senties, avec 2,68 °C dans la tentative de l'orientation de la façade principale vers le nord, 3,05 °C à la place de l'est, 2,85°C à l'égard du sud et 2,65 °C pour l'ouest. On en conclut que les résultats soumis par le modèle d'ASHRAE sur l'étude du confort thermique du modèle de bâtiment offre un large choix pour le propriétaire du bâtiment entre l'orientation vers le nord et l'orientation vers l'ouest de la façade principale de leur logement d'habitation.

## VIII-2- RÉSULTATS DE LA SIMULATION HYGROMÉTRIQUE DU BÂTIMENT

Nous avons vu dans la théorie des différents modèles des confort thermique que Burach GIVONI met en exergue la base de leur modèle sur deux relevés (cf. le [sous-paragraphe IV-11-6 du III<sup>e</sup> chapitre de la première partie](#) de la présente thèse). Dans lesquels, il a emprunté la méthode de l'autre modèle (comme celui de Fanger, ASHRAE ainsi que la norme EN 1521 de 2007) en exploitant les températures opératives journalières (en abscisse) et celle des taux d'humidité spécifique (rapportée en ordonnée)

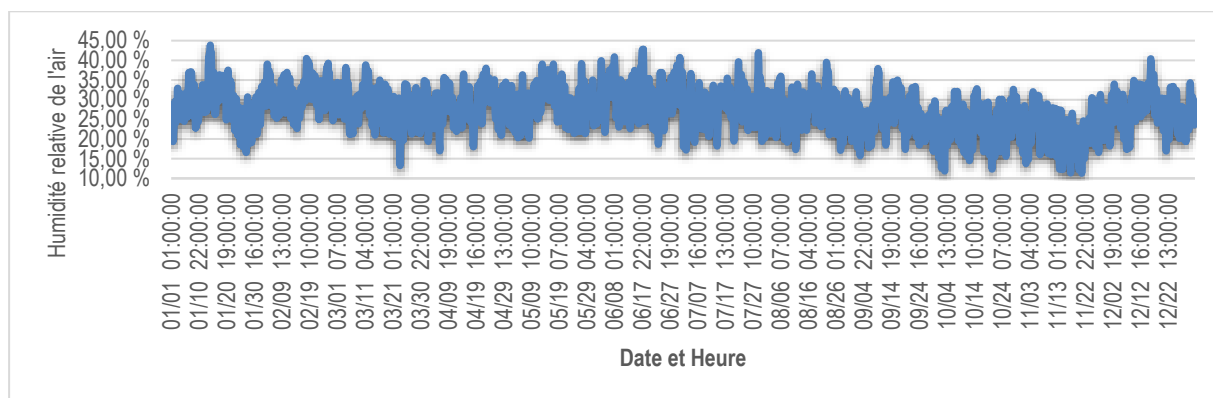
engendrée par les taux d'humidité relative dans les blocs thermiques, par l'intermédiaire de la liaison entre la relation 20 et 21 plus haute. Dans ces conditions, GIVONI a évalué la performance thermique dans un bâtiment par l'intermédiaire de l'échange de chaleur au niveau du tissu cutané, par évaporation, en fonction de la température opérative qui frappe la peau et l'humidité relative du local en estimant la vitesse de l'air qu'elles génèrent.

Vu que les températures opératives journalières, relatives à chaque orientation choisie, dans le bâtiment sont déjà examinées dans la [simulation thermique du bâtiment suivant le modèle d'ASHRAE](#) précédemment. De cette manière, pour compléter les bases de données nécessaires pour l'exploitation du modèle de GIVONI, on va étudier d'abord l'évolution des humidités relatives journalières dans le bâtiment.

Pour l'exploration, on va saisir :

- La norme européenne NBN EN 13 779 (2007), qui définit le critère d'humidité relative d'un local compris entre [30 %-70 %], ainsi que la norme ASHRAE 55- 1992 qui fixe les taux d'humidité spécifique d'un local entre [5 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub> et 60 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub>], approfondies dans le sous-paragraphe c-4 du chapitre III de la première partie de cet ouvrage, relatives aux [normes liées à l'humidité de l'air dans un local](#), pour examiner respectivement les taux d'humidité relative ainsi que les degrés hygrométriques engendrés par la corrélation de la température interne et l'humidité relative dans le bâtiment ; et
- Les diagrammes bioclimatiques de GIVONI pour lire les vitesses de l'air générées par ces variables dans le bâtiment.

#### VIII-2-1- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le nord



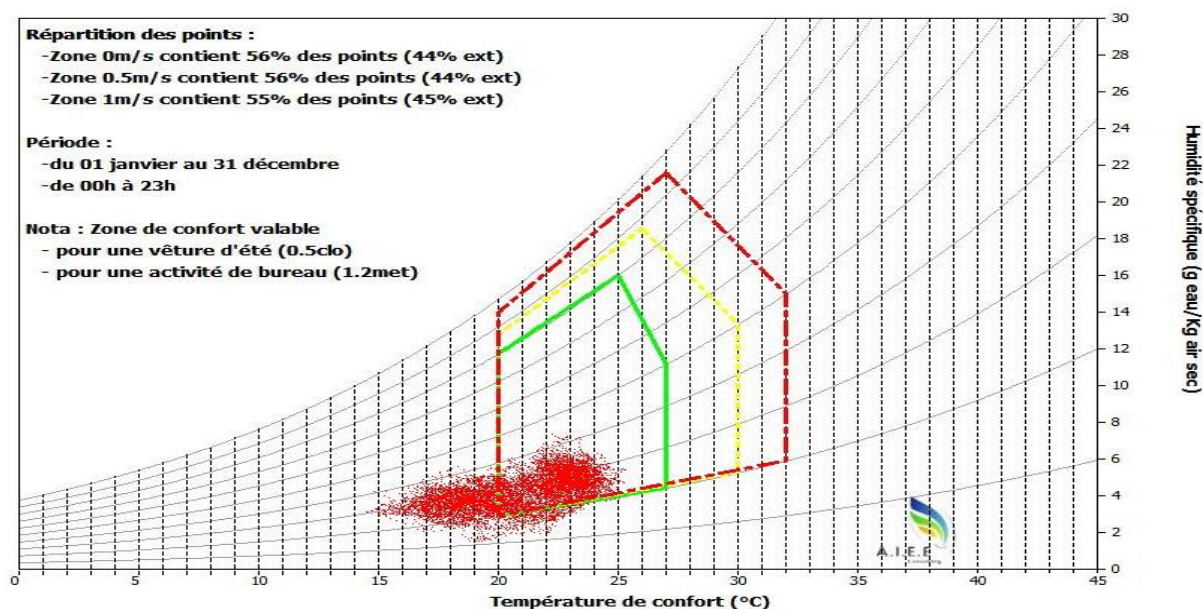
Graphe 72 : Humidité relative journalière dans le bâtiment : orientation vers le nord

Le graphe 72 ci-dessus affirme que les taux d'humidité journalière, dans le cas de l'orientation du bâtiment vers le nord, sont compris entre 11,31 % et 43,85 %. Ces valeurs engendrent ainsi une valeur moyenne annuelle de 27,40 % et une variation de :  $\Delta H = 32,54 \%$ .

L'interaction des taux d'humidité relative moyenne journalière ci-dessus avec les températures opératives dans le bâtiment, informées par le graphe 36 ci-haut, engendrent les vitesses de l'air ainsi que le taux

d'hygrométrie aperçu par le locataire du bâtiment exposé de dans l'épure de GIVONI ci-après. Dans les modèles de GIVONI qui suivent, la courbe :

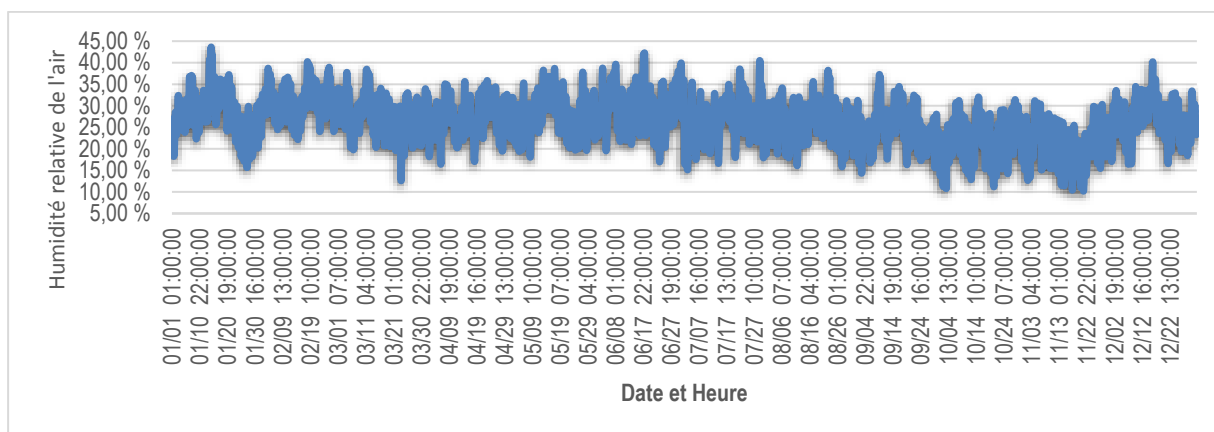
- En tirets discontinus de couleur rouge délimite la zone de vitesse de vent 1 m/s dans le local étudié ;
- De couleur jaune borne celle de 0,5 m/s ; et
- De couleur verte marque la zone de 0 m/s.



Graph 73 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers le nord

Le diagramme montre que l'occupant du bâtiment subit des variations de température orlive dans une étendue d'intervalle de 14,52 °C à 25,36 °C. Dans cette condition, 55,00 % des points sont dans la zone de confort (en rouge), donc 45,00 % dans la zone extérieure. Parmi ceux, de mêmes répartitions de 56,00 % des points incluent dans la zone de 0 m/s (en verte) ainsi que dans la zone de 0,5 m/s (en jaune).

#### VIII-2-2- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'est

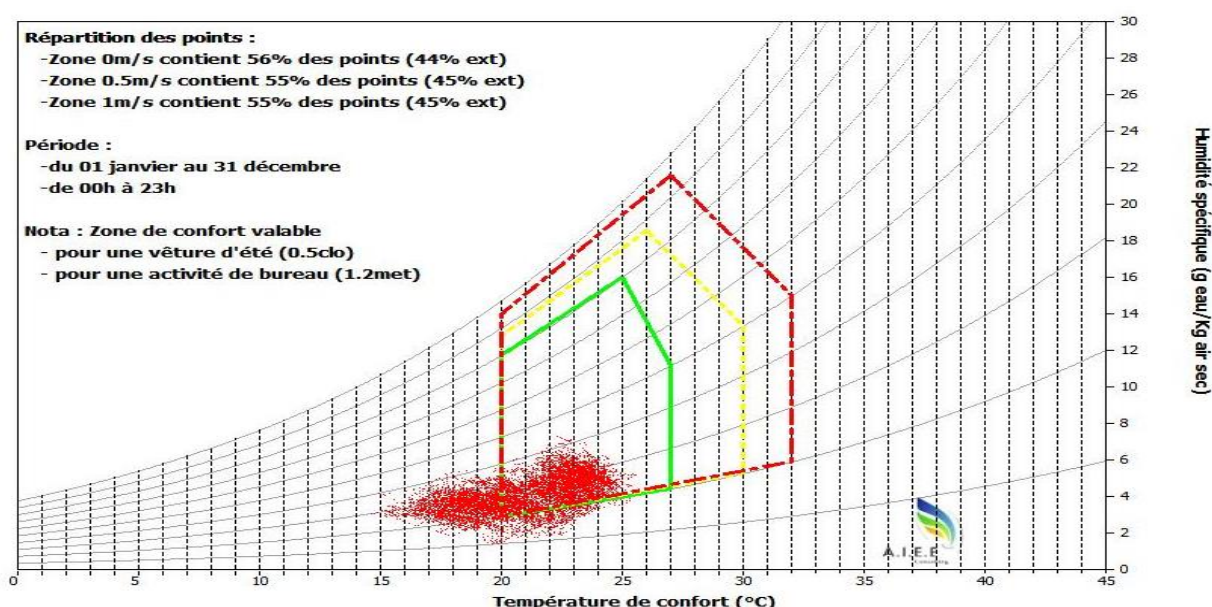


Graph 74 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers l'est

Pour cette orientation, le taux d'humidité relative dans les locaux du bâtiment est varié entre 10,21 % et 43,61 %. Dans ces circonstances, le taux moyen ainsi que la variation annuelle de l'humidité relative dans

les blocs thermiques du bâtiment sont respectivement de 22,29 % et  $\Delta H = 33,40$  % : + 0,86 % par rapport à l'orientation de la façade principale du bâtiment vers le nord.

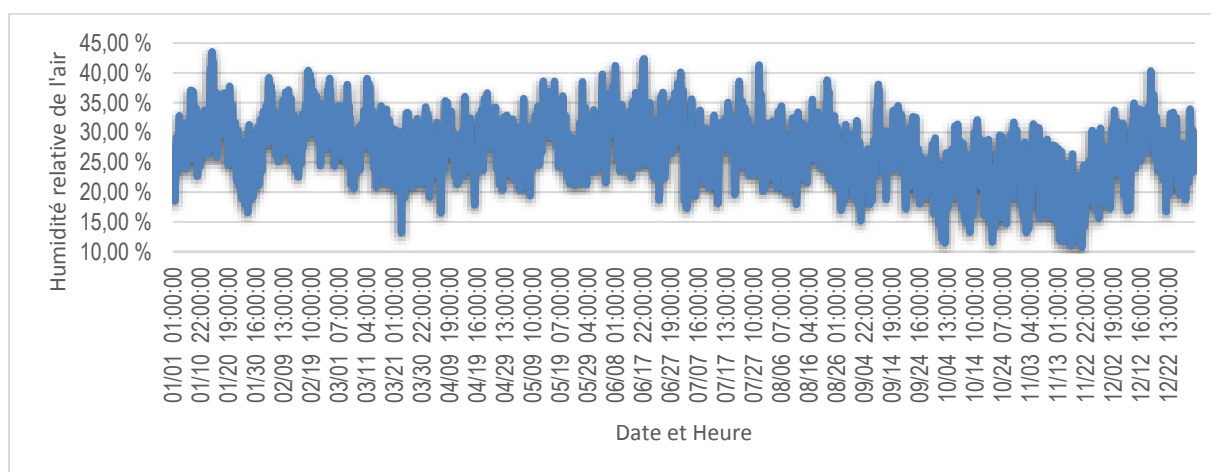
Les vitesses de l'air ainsi que l'humidité spécifique issue de la dépendance entre ces taux d'humidité moyenne journalière, relatifs à cette orientation, donnés par le graphe 74 ci-dessus ainsi que les températures opératives internes du bâtiment, présentées dans le graphe 44, sont alors les données dans le modèle de GIVONI ici-bas.



Graphe 75 : Résultat de la simulation hygrothermique : orientation vers l'est

  partir du graphique ci-dessus, on observe que l'intervalle de la température opérative dans le bâtiment est compris entre 14,67  C et 25,62  C. Dans ce cas-là, 55,00 % des points, comme l'orientation vers le nord ci-dessus, sont aussi dans le champ de confort de 01 m/s, alors 45,00 à l'extérieur. 56,00 % des points intègrent dans la zone de 0 m/s et, 55,00 % au sein de la zone de 0,5 m/s.

### VIII-2-3- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le sud

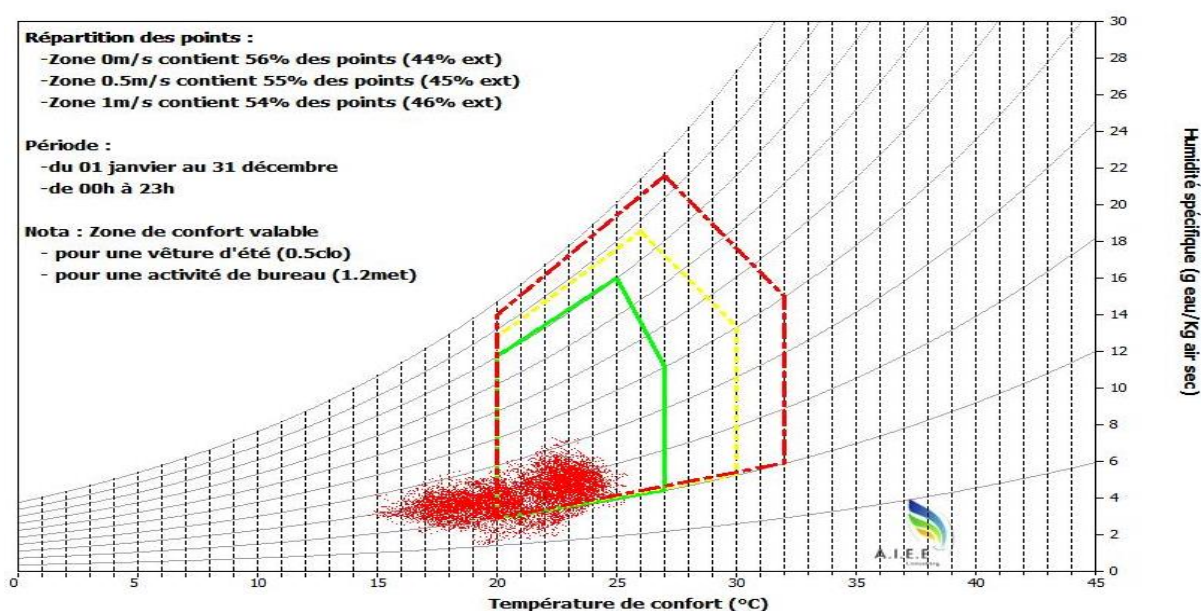


Graphe 76 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers le sud

Le taux d'humidité relative moyenne journalière dans le bâtiment, dans la supputation de leur exposition

vers le sud, s'oscille entre 10,69 % et 43,56 %. Dans ces circonstances, le taux moyen ainsi que la variation annuelle de l'humidité relative dans les blocs thermiques du bâtiment sont respectivement de 26,94 % et  $\Delta H = 32,88 \%$  : - 0,25 % par rapport à l'orientation vers l'est et +0,34 % par rapport à l'orientation vers le nord.

Les dépendances entre les taux d'humidité relative ainsi que les températures opératives internes du bâtiment, exposées dans le graphe 52 ci-haut, dans cette orientation sont alors données dans le modèle de GIVONI ci-après.

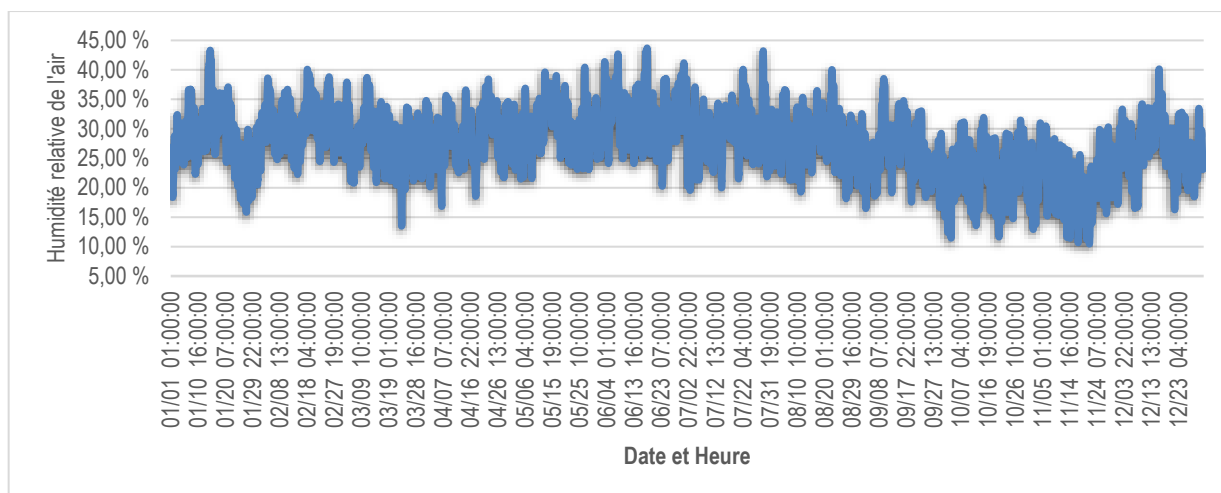


Graphe 77 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers le sud

On relève, à partir de ce tracé, que la variation des températures internes journalières dans le bâtiment s'englobe entre 14,64  C et 25,49  C. Dans cette classe, au nombre de 54,00 % des points sont dans le domaine de confort de 01 m/s, conséquemment 46,00 % à l'extérieur. Sur ceux 56,00 % des points se trouvent dans la zone de 0 m/s, tandis que 55,00 % sont à l'intérieur de la zone de 0,5 m/s.

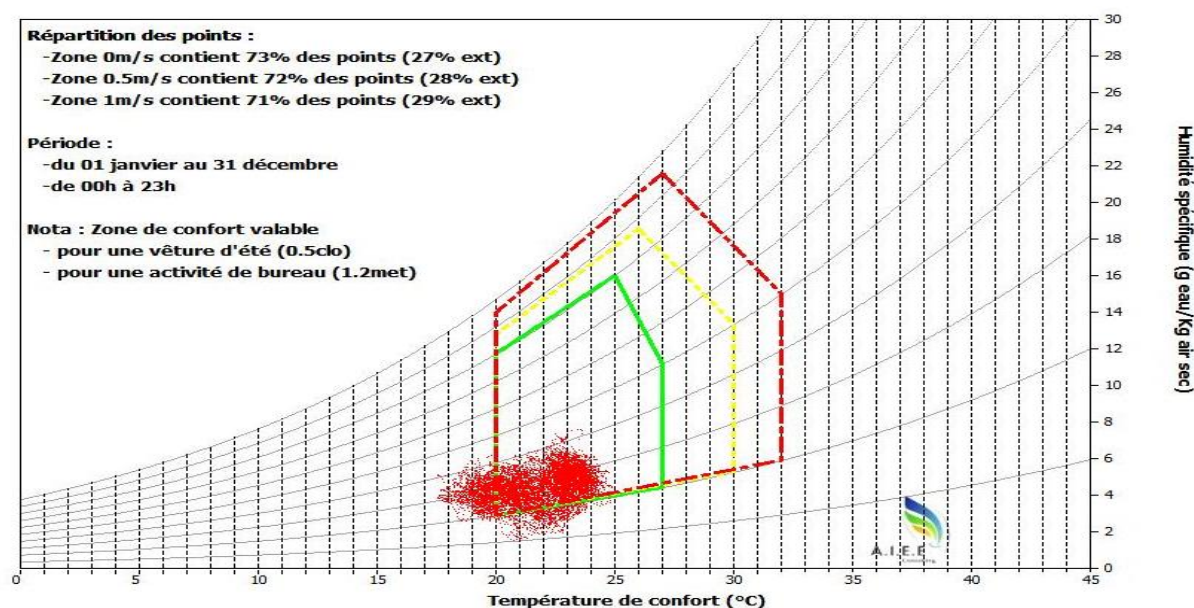
#### VIII-2-4- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'ouest

L'enregistrement ci-dessous certifie que les taux d'humidité journalière, dans le cas de situation du bâtiment vers l'ouest, sont compris entre 10,46 % (mois de novembre) et 43,69 % (mois de janvier). Ou bien une valeur moyenne annuelle de 27,47 % et une évolution de :  $\Delta H = 33,24 \%$  : +0,36 % par rapport à l'orientation vers le sud, - 0,16 % par rapport à l'orientation vers l'est et +0,7 % par rapport à celui du nord.



Graph 78 : Humidité relatives moyennes journalières dans le bâtiment : orientation vers l'ouest

L'interrelation des taux d'humidité relative moyenne journalière, glosés ci-dessous, avec les températures opératives, renseignées par le graphe 60 ci-haut, occasionne, en effet, les vitesses de l'air ainsi que le taux d'hygrométrie constaté par l'habitant du bâtiment présenté dans le modèle de GIVONI ci-dessous.



Graph 79 : Résultat de la simulation hygrométrique : orientation vers l'ouest

On enregistre, à partir de ce graphique, que l'écart des températures internes journalières dans le bâtiment se réunit au travers de 24,24 °C et 46,56 °C. Dans ce groupe, on chiffre 71 % des points dans la zone de confort de 01 m/s et 29 % dans l'externe. À l'intérieur de laquelle, 73 % des points se localisent dans l'aire de 0 m/s et 72 % dans l'endroit de 0,5 m/s.

#### VIII-2-5- Synthèse de l'analyse et interprétation des résultats

Le tableau 72 ci-dessous résume les résultats des humidités relatives annuelles, obtenus dans le bâtiment, en fonction des températures internes, relatives à chaque orientation de la façade principale du bâtiment :

Tableau 72 : Variation annuelle des humidités relatives dans le bâtiment

| Orientation choisie | Humidité relative minimum | Humidité relative moyenne | Humidité relative maximum | $\Delta H$ |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
| <b>Nord</b>         | 11,31 %                   | 27,40 %                   | 43,85 %                   | 32,54 %    |
| <b>Est</b>          | 10,21 %                   | 26,29 %                   | 43,61 %                   | 33,40 %    |
| <b>Sud</b>          | 10,69 %                   | 26,94 %                   | 43,56 %                   | 32,88 %    |
| <b>Ouest</b>        | 10,46 %                   | 27,47 %                   | 43,69 %                   | 33,24 %    |

Ainsi :

- ☞ Le taux minimum journalier d'humidité relative dans les quatre orientations cardinales de la rose de vent vaut 11,31 % dans l'orientation de la façade principale vers le nord, avec une légère diminution dans les autres orientations, avec 10,21 % pour l'orientation vers l'est, 10,69 % pour l'orientation vers le sud et 10,46 % dans le cas de l'orientation vers l'ouest. Donc, une variation de  $\pm 1,10$  %. Ces degrés hygrométriques se trouvent durant le mois de novembre, c'est-à-dire dans la période d'été, qui est aussi la période la plus sèche de la région d'Analamanga et celle du site ;
- ☞ Les taux maximums sont respectivement 43,85 % dans l'orientation vers le nord, 43,61 % pour l'orientation vers l'est, 43,56 % pour l'orientation vers le sud et 43,96 % dans le cas de l'orientation vers l'ouest. Donc une légère variation de  $\pm 0,29$  %. Ces hygrométries se situent durant le mois de janvier, toujours dans la période d'été, durant laquelle la précipitation de l'ensemble de la région est plus importante (268,60 mm) ;
- ☞ Les deux valeurs extrêmes des taux d'humidité valent respectivement :
  - Les taux moyennent d'humidités : 27,40 % dans l'orientation vers le nord, 26,29 % pour l'orientation vers l'est, 26,94 % pour l'orientation vers le sud et 27,47 % dans le cas de l'orientation vers l'ouest. Donc une légère variation de  $\pm 1,18$  % ; et
  - Les amplitudes de mouillure  $\Delta H$  : 32,54 %, 33,40 %, 32,88 % et 33,24 %.

On en déduit que, par rapport à l'intervalle des normes liées aux taux d'humidité relative dans un local, fixés par la norme NBN EN 13 779 (2007), compris entre 30,00 % et 70,00 % :

- L'humidité relative minimale et moyenne, annuelle, liée à chaque orientation du bâtiment est inférieure à la norme, surtout durant le mois d'octobre et novembre : l'intérieur du bâtiment aura donc des problèmes de sécheresse durant cette période vis-à-vis de ce type d'humidité si leur orientation n'est pas bien définie ;
- Par contre, les valeurs extrêmes, durant les périodes pluvieuses, sont inscrites dans cet intervalle : l'humidité relative dans le bâtiment n'est pas à craindre.

Quant à la répartition des points liés à la vitesse de l'air dans le bâtiment, en fonction d'humidités relatives dans chaque diagramme de confort de GIVONI, relatif à chaque orientation choisie, les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 73 qui suit.

Tableau 73 : Répartition des points dans le Diagramme de GIVONI

| Répartition des points | Orientation |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                        | Nord        |         | Est     |         | Sud     |         | Ouest   |         |
|                        | Interne     | Externe | Interne | Externe | Interne | Externe | Interne | Externe |
| Zone 0 m/s             | 56 %        | 44 %    | 56 %    | 44 %    | 56 %    | 44 %    | 73 %    | 27,00 % |
| Zone 0,5 m/s           | 56 %        | 44 %    | 55 %    | 45 %    | 55 %    | 45 %    | 72 %    | 28,00 % |
| Zone 01 m/s            | 55 %        | 45 %    | 55 %    | 45 %    | 54 %    | 46 %    | 73 %    | 29,00 % |

On remarque à partir des données du tableau ci-dessus que le nombre de points inclus dans la zone de confort définie par GIVONI pour les trois essais d'orientation, avec 55 % dans la direction du nord, 55 % : en direction de l'est et 54 % quant au sud, est plus ou moins de 1 % équivalent. Ce phénomène réaffirme l'interprétation, relative à la sensation du confort thermique de l'occupant du futur bâtiment vis-à-vis du choix de l'orientation de la façade principale du bâtiment, avancé dans la synthèse d'analyse de la simulation thermique du bâtiment ci-haut. Par contre, les pourcentages des points internes dans les diagrammes, dans lesquels l'orientation du bâtiment vers l'ouest, de GIVONI procurent le plus d'avantages : 73 % des points sont inclus dans la zone de la vitesse de vent 01 m/s dans l'orientation vers l'ouest, 55 % dans l'orientation vers le nord, 54 % pour le sud et 55 % dans le cas de l'orientation vers l'est. Quant aux taux de l'humidité spécifique dans le bâtiment, la norme prévoit leur variation entre [5 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub> et 60 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub>]. Or le modèle de GIVONI relatif à chaque orientation choisie ci-dessus fournit une valeur moyenne comprise entre 6 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub> et 28 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub>, soit une valeur moyenne 17 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air hum</sub>. Cette valeur est bien inscrite dans l'intervalle de la norme précitée. Ce résultat intensifie l'avantage thermophysique de l'utilisation des briques artisanales en terre cuite d'Ambohitrimanjaka, tant sur les capacités à retenir les taux d'humidité engendrés par les différents [gains thermiques](#) dans le bâtiment que sur [les principaux paramètres de base de l'architecture bioclimatique](#) offert par l'environnement d'implantation du projet.

Donc, en réponse au questionnement principal posé dans [l'hypothèse et méthode de recherche](#) avancée dans l'introduction générale de cet ouvrage, et pour prendre en considération le compromis entre les conclusions fournies par l'analyse des résultats des deux modèles de confort thermique utilisés pour étudier la direction optimale du front principal du modèle de bâtiment étudié : si le propriétaire du bâtiment veut se conformer à l'objectif fixé par l'article 17.2 de la section B de la tome I dans le TBM, qui stipule que « la disposition et l'orientation des constructions doivent permettre un ensoleillement et un éclairage raisonnable avec le confort thermique de l'habitation », il doit orienter la façade principale de leur bâtiment d'habitation vers l'ouest.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans l'intérêt de connaître à la fois les comportements géotechniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka, les performances thermiques des parois construites avec les mêmes briques dudit village, ainsi que l'orientation optimale d'un bâtiment naturellement ventilé dans leur site d'implantation, la présente Thèse nous a apporté de connaissances, incluant :

- ☞ Les contextes géographique et géologique de la région d'Analamanga, où se trouve le site d'implantation du projet, dans lesquels ont été présentés : la localisation, le relief et la topographie, le climat, l'hydrologie, la géologie ainsi que l'occupation des sols ;
- ☞ L'origine, l'aspect, les propriétés, le mécanisme de formation, les structures, la classification, ainsi que les principales utilisations de l'argile, matière première utilisée pour façonner les briques en terre cuite. Ces informations ont été complétées par divers renseignements sur les briques en terre cuite malgache, comme : l'histoire, le processus de fabrication, la norme selon le TBM ainsi que les principaux avantages de leur utilisation dans la construction d'un bâtiment ;
- ☞ La suggestion relative à l'essai d'identification de l'argilosité et les comportements mécaniques d'un sol argileux ;
- ☞ Le concept du confort thermique d'un bâtiment, avec lequel apparaît :
  - ▶ La définition de la chaleur ;
  - ▶ La thermorégulation humaine composée par la physiologie et les différents facteurs de sensation thermique d'un individu ;
  - ▶ Le confort thermique dans le bâtiment qui se rapporte sur les enjeux, les modes et bilans d'échange thermique du corps humain, les critères et les paramètres affectant le confort thermique dans le bâtiment, les inconforts locaux, les méthodes de mesure ainsi que les différents modèles du confort thermique ;
- ☞ La correspondance entre le confort thermique et l'approche bioclimatique, composée par :
  - ▶ La définition ;
  - ▶ L'objectif de l'approche, la conception de bioclimatique et l'architecture bioclimatique ; et
  - ▶ Les principaux paramètres de base de l'architecture bioclimatique.

Étant donné que les paramètres thermophysiques des matériaux constituant la paroi d'un bâtiment conditionnent la stabilité du confort thermique de ses locaux. Par conséquent, les perceptions fournies par les connaissances théoriques sus-énoncées ont permis d'analyser, en effet, les performances thermophysiques des parois et de réaliser des simulations thermiques pour étudier l'intégration, notamment l'orientation optimale de la façade principale, du bâtiment objet de l'étude dans son site d'implantation. D'où :

☞ Les résultats, relatifs à chaque saison de la Capitale de Madagascar ainsi qu'à chaque test d'orientation de la façade principale du modèle de bâtiment, issus de la simulation thermique suivant le modèle d'ASHRAE ainsi que le modèle de GIVONI révèlent que :

- ▶ L'orientation de la façade principale du bâtiment, objet de l'étude, vers l'ouest est la plus optimale vis-à-vis de leur confort thermique ;
- ▶ La topographie, l'environnement climatique ainsi que l'urbanisation du site d'implantation d'un bâtiment ont des grandes influences sur leur confort thermique ;
- ▶ Les principaux avantages de l'utilisation des briques artisanales en terre cuite, précités dans II-6 du chapitre II de la première partie de la présente Thèse sont justifiés, notamment leur rôle dans la capacité, à savoir (i) de régulariser les flux thermiques qui traversent les parois et (ii) de retenir l'humidité générée par les différentes sources d'apports thermiques locaux.

☞ La théorie de l'orientation d'un bâtiment d'habitation vers l'Ouest, par le « Ntaolo » malgache, grâce aux développements de la nouvelle technologie de l'informatique est maintenant justifiée.

Nous pouvons dire dès lors que même n'ayant pas offert des résultats exhaustifs, nous avons néanmoins pu découvrir de multiples connaissances par rapport à notre objectif principal tout au long de la réalisation de cette recherche. Plus particulièrement l'exploitation des ressources bioclimatiques ainsi que des matériaux naturels, dans le domaine de construction de bâtiments d'habitation, pouvant réduire l'émission des gaz carboniques et des effets de serre qui sont les premiers responsables du changement climatique ainsi que les dégradations environnementales de l'humanité actuelle.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Pr Abbé Louis MPALA Mbabula. **PROJET DE DEA ET DE THÈSE DE DOCTORAT**. 5 pages.  
[http://www.bibliotheques.ugam.ca/InfoSphere/sciences\\_hu\\_maines/index.html](http://www.bibliotheques.ugam.ca/InfoSphere/sciences_hu_maines/index.html)
- [2]. Pierre Mongeau. **Réaliser sa Thèse ou sa mémoire. Côté Jeans & Côté Tenue de Soirée**. Presse de l'Université de Québec. ISBN 978-2-7605-1544-4. Janvier 2008. 162 pages.  
<https://www.researchgate.net/publication/320911457>
- [3]. Carine Carvalho, Helene Füger, Muriel Besson, Corinne Dallera, Brigitte Mantilleri. **Bien démarrer sa thèse - GUIDE POUR DOCTORANT(E) S**. Université de Lausanne, UNIVERSITÉ NEUCHÂTEL, UNIVERSITÉ FRIBURGENSIS, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, Università della Svizzera italiana- Publication des Bureaux de l'égalité des hautes écoles universitaires de la Suisse-Latine (BuLa) avec le soutien du Programme fédéral égalité des chances entre femmes et hommes dans les universités. 2014. 76 pages. [www.releve-academique.ch](http://www.releve-academique.ch)
- [4]. Joe Wolfe. **Comment rédiger une thèse**. École de Physique de l'université de Nouvelle-Galles-du-Sud, Sydney 2052 Australie. 13 pages.
- [5]. François-Pierre Gingras. **Comment citer des sources sur Internet dans un travail scientifique**. Département de science politique Université d'Ottawa (Ontario) Canada. 5 pages.
- [6]. Marie Malo. **Comment citer des sources imprimées- Principes généraux avec exemples**. Écoles des hautes études commerciales, Université de Montréal. 14 pages.
- [7]. Pr Ramangasalama N. **DIFFÉRENCES ENTRE PRÉSENTATIONS DES RÉFÉRENCES D'AUTEURS AU NIVEAU D'UN TEXTE ET D'UN ARTICLE**. Doc. Méthodologie de recherche en Doctorat. 2 pages.
- [8]. **GUIDE DE RECHERCHE Internet ET SITES WEB**. Conseil Scolaire de District Catholique Centre Sud. 12 pages.
- [9]. **Méthodologie de la recherche documentaire : Principes -Clés**. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche- Service Formation des Publics de l'UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE. 40 pages.  
[http://www.bibliotheques.ugam.ca/InfoSphere/sciences\\_hu\\_maines/index.html](http://www.bibliotheques.ugam.ca/InfoSphere/sciences_hu_maines/index.html)
- [10]. **PLAN RÉGIONAL DE DÉVELOPPEMENT DE LA RÉGION D'ANALAMANGA**. 2007. 91 pages.
- [11]. **ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES**. Guide technique du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes du Ministère de l'Équipement des transports et du logement- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Novembre 2000. ISBN : 2-11-091783-0. ISSN : 1151-1516 88 pages.
- [12]. D. Branq. Document pédagogique interne au Master TOS. **Connaissances de base : comportements mécaniques des sols**. 09 octobre 2013, 23 pages.
- [13]. Jacques Léraux. **GÉOTECHNIQUE 1**. Cours destiné à la 3<sup>e</sup> année d'Ingénierie de construction de L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE TOULOUSE- Département de Sciences et Technologies Pour l'Ingénieur- Année universitaire 2005- 2006, 22 pages.
- [14]. Yves Berthaud, Patrick de Buhan, Nicolas Schmitt. **Aide- mémoire de MÉCANIQUE DES SOLS**. Dunod Paris, ISBN 978-2-10-059354-5. 2013. 348 pages.
- [15]. Paul Mathy. **GUIDE- BRIQUETTERIES**. Série technologies n° 14 du CENTRE pour le développement industriel ACP-UE- ISBN 2-906901-18-0. 41 pages.
- [16]. **RECUEIL DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES APPLICABLES AUX TRAVAUX DE BÂTIMENTS À MADAGASCAR (TBM)**. Recueil rédigé sous la direction du Ministère des Travaux publics, des Transports, de la Construction et des Postes et Télécommunication (Service de l'architecture, de l'urbanisme et de l'Habitat- S.A.U.H.), 977 pages.
- [17]. **BRIQUES MALGACHES**. Document d'Exposition conçue et réalisée par TREMLIN Homme et Patrimoine P.H.A.R.E. - Association de Sauvegarde du Four à Briques de Hautefond. 18 pages.
- [18]. **LA BRIQUE DE TERRE CUITE... LE CHOIX DE LA**

**CONSTRUCTION DURABLE.** Document de la fédération Belge de la brique, juin 2006, 18 pages. [www.brique.be](http://www.brique.be)

[19]. **TERRE CUITE ET CONSTRUCTION.** Revue trimestrielle éditée par la fédération Belge de la Brique. 24 pages. <http://www.brique.be>

[20]. FRED PORTET ET OLIVIER NOËL, SYLVIE NICAISE, CAROLE PORTILLO ET MATHIEU VERMEULEN. **LA CLASSIFICATION DES SOLS.** Géotechnique routière- Document conçu en collaboration avec L'ENTE D'AIX EN PROVINCE, LABORATOIRE DU CETE MÉDITERRANÉE ainsi que la MINE DE DOUAI. 36 pages.

[21]. Laetitia COMPARON. Thèse de Doctorat intitulée « **Étude expérimentale des propriétés électriques et diélectriques des matériaux argileux consolidés** ». Institut de Physique du Globe de Paris, École doctorale : Science de la terre, Spécialité : Géophysique interne. Présentée et soutenue publiquement le 24 juin 2005. 398 pages.

[22]. Dominique WETSHONDO OSOMBA. Thèse de Doctorat intitulée « **Caractérisation et valorisation des matériaux argileux de la Province de Kinshasa (RD Congo)** ». Université de Liège, Académie Universitaire Wallonie- Europe, Spécialité : Science de l'Ingénieur (Architecture, Génie Civil et Géologie). Juin 2012. 341 pages.

[23]. Myriam OLIVIER et Ali MESBAH. **Construction en terre « focus sur la fabrication et la construction en blocs de terre compressée »**. 05 essais d'identification des sols, Cayenne- Guyane. 11-15 avril 2016. 45 pages.

[24]. Diab Hamida. **LES MÉTHODES GÉOTECHNIQUES.** 2012. 68 pages. <https://www.researchgate.net/publication/299598984>

[25]. Y ATLAN. **CATALOGUE DES ESSAIS GÉOTECHNIQUES EXÉCUTÉS AU LABORATOIRE GÉOTECHNIQUE D'ORLÉANS.** Département géologie du Bureau de recherche Biologique et Minière. Service géologique Nationale du Ministère de l'Industrie, du

Commerce et de l'Artisanat- 78 SGN 178 GEG. Mars 1978. 38 pages.

[26]. **MÉTHODE D'ANALYSES UTILISÉ AU LABORATOIRE PHYSIQUE DES SOLS.** SSC- ORSTOM- BONDI, 32 pages.

[27]. Faycal ELFGAIE. Thèse de Doctorat intitulée « **Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue** ». École Centrale de l'Ille, Spécialité : Génie Civil. Soutenue le 12 décembre 2013. 123 pages. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01242549>

[28]. **Guide de Choix des éco- matériaux « Le gros œuvre »**. Cd2e. Septembre 2008. 27 pages.

[29]. Alain Bornarel, Sophie Brindel Beth, Baptiste Brisedou, Éric Bussolino, Sonia Cortesse, Jacques Fradin, Yasmine Mansouri, François Xavier Monaco, Michel Raoust, Marc Serieis. **Confort d'été passif.** ISBN EAN : 978-2-911-533-07-5. Avril 2014. 72 pages.

[30]. Y. GANEM, J.P. MEYER, N. LUZEAUX, G. BRASSEUR, L. LABORDE, J.L. POMIAN. **Ambiances thermiques- Travail en période de fortes chaleurs.** Document pour le Médecin de travail N° 97, 1<sup>er</sup> trimestre 2004. INRS. 18 pages.

[31]. Bernard Sesolis, Jean-Marie Alessandrini, Jean-Robert Millet, Jean-Alain Meunier, Luc Barré. **Améliorer le confort d'été dans l'habitat collectif- Guide de solutions pratiques à l'usage des décideurs du secteur de l'habitat social.** E-Cahiers du CSTB. Cahier 3619 - avril 2008. 20 pages.

[32]. Erik Blin, Pascal Eveillard, E. Blin, F. Chalumeau, S. Charbonnier, Y. Dudognon, L. Ernié, P. Eveillard, G. Guilbert, H. Huguonenc, L. Joret, D. Lizarazu, P. Maes, L. Pellegrini, N. Voiret. **LA THERMIQUE DU BÂTIMENT.** Guide de l'Isover, Édition 2007, 143 pages.

[33]. Sylviane ROGER, Michel CARRE. **Améliorer le confort d'été dans les établissements pour personnes âgées et handicapées.** Guide élaboré par la Direction Générale de l'Action Sociale (DGAS) et l'Agence de

l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)-  
Cahier pratique pour les gestionnaires d'établissements  
sociaux et médico-sociaux. Réalisé par La Gazette Santé  
Social. N° de réf. ADEME 6473. 31 pages.

[34]. **Confort d'été.** Fiche technique de l'Agence National  
de l'Habitat (Anah), 12 pages. [www.anah.fr](http://www.anah.fr)

[35]. **Introduction à la thermique du bâtiment.** SAINT-  
GOBAIN, LES ESSENTIELS DU BÂTIMENT N° 4.  
ÉDITION 2012. 16 pages.

[36]. Jean-Yves Charbonneau, Luc Schreiber, Serge  
Douville, Jérôme Lemaire. **Confort thermique à l'intérieur  
d'un établissement.** Guide préparé par la Direction de la  
prévention-inspection de la CSST, en collaboration avec la  
Direction des communications. Dépôt légal- Bibliothèque  
nationale du Québec. 2004. ISBN 2-550-42992-3. 20 pages.

[37]. **Ventilation naturelle de confort thermique.** Fiche  
d'application Thermique de RTAA DOM 2016, version 2.1.  
Janvier 2019. 14 pages.

[38]. CLAUDE- ALAIN ROULET. **CONDITION DE  
CONFORT ET LOGEMENT SAIN.** Constructions et  
Énergies- Cycles de formation pour architectes et Ingénieur-  
Conseil- CENTRE DE RECHERCHE PUBLIC HENRI  
TUDOR Luxembourg, Édition mai 2008, 70 pages.

[39]. Dr R. Cantin, B. Moujaled, Dr HDR G. Guarraciono.  
**Complexité du confort thermique dans les bâtiments.**  
Document issu du 6<sup>ème</sup> congrès européen de science des  
systèmes de Paris du 19 au 22 septembre 2005. 10 pages.

[40]. Mr MAZARI Mohammed. Mémoire de magister en  
architecture, intitulée « **Étude et évaluation du confort  
thermique des bâtiments à caractère public : Cas du  
département d'Architecture de Tanda (Tizi- Ouzou)** ».  
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Faculté du  
Génie de la construction, Département d'Architecture,  
Option Architecture et développement durable. Septembre  
2012. 167 pages.

[41]. Victor CANDAS. **Confort thermique.** Techniques de  
l'Ingénieur, traité Génie énergétique. Document n°B 9 085.

14 pages.

[42]. Bodart M. Thèse de doctorat intitulé : « **Création d'un  
outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment,  
selon des critères physiques, économiques et  
écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique**  
». Université Catholique de Louvain. Faculté des sciences  
appliquées. Unité d'Architecture Belgique. 2002.

[43]. Cordier N. Thèse de doctorat intitulé : «  
**Développement et évaluation de stratégies de  
contrôle de ventilation appliquées aux locaux de  
grandes dimensions** ». Institut National des Sciences  
Appliquées de Lyon. 2007

[44]. François Alain Frédéric GLORANT. Thèse de  
Doctorat, intitulée « **CARACTÉRISATION D'UNE  
FENÊTRE PARIETO-DYNAMIQUE À TROIS  
VITRAGES** ». École Doctorale SPI (Science pour  
l'ingénieur). Université d'Artois, Faculté des Sciences  
Appliquées. Soutenue le 11 avril 2014. 213 pages.

[45]. Melle Hamel Khalissa. Cours de « **CONFORT  
THERMIQUE** » n° 02. Matière : Science pour  
l'Architecture du Master I en Architecture et  
Environnement. Université de BISKRA. FACULTÉS DE LA  
SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE. DÉPARTEMENT  
D'ARCHITECTURE. 69 pages.

[46]. Melle Hamel Khalissa. Cours  
de « **COMPORTEMENT THERMIQUE DES  
BÂTIMENTS** » n° 04. Matière : Science pour l'Architecture  
du Master I en Architecture et Environnement. Université  
de BISKRA. FACULTÉS DE LA SCIENCE ET DE LA  
TECHNOLOGIE. DÉPARTEMENT D'ARCHITECTURE.  
72 pages.

[47]. Thellier Françoise. Mémoire d'Habilitation à Diriger  
des Recherches intitulé « **L'homme et son  
environnement thermique- Modélisation** ». Université  
de Paul Sabatier de Toulouse. Juillet 1999. 62 pages.

[48]. **CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT  
TERTIAIRE.** Le Cahier des charges énergie+, Région

wallonne. Version juin 2004. 96 pages

[49]. Gilles LEFEBVRE. **Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse.**

Technique de l'Ingénieur, traité Génie énergétique – Document n °B 2 041. 19 pages.

[50]. **Améliorer le confort de votre maison, Isolation thermique- L'habitat individuel.** ADEME. Mars 2008. 32 pages.

[51]. Françoise Le Frious. **Les propriétés thermiques des matériaux et les références météorologiques.** Décembre 2010. 17 pages.

[52]. Dr. Holger Hendrichs. **Coefficient de transmission thermique U pour l'isolation des bâtiments- Mesurer de vraies valeurs pour réaliser de vraies économies.**

GreenTEG. 2 pages. <http://www.u-value.greenteg.com/>

[53]. **Fiche technique fenêtre - La fenêtre dans la justification énergétique.** Recommandation et conseil pour la planification et la construction- Suisse Énergie. Diffusion : Office fédéral des constructions et de la logistique OFCL. Aout 2009.16 pages. [www.publicationsfederales.admin.ch](http://www.publicationsfederales.admin.ch)

[54]. **LES CATALOGUES THERMIQUES : PAROIS HÉTÉROGÈNES**, B.B.S. Slama et ClimaWin, 16 pages.

[55]. André Potvin, March PhD, Claude MH Demers. **L'approche bioclimatique en architecture.** GRAP (Groupe de recherche en ambiance physique) – École d'Architecture- Université Laval. Le bulletin de l'Ordre de l'architecte du Québec. Volume 14, numéro 2. 2003. 2 pages. <http://www.grap.arc.ulaval.ca>

[56]. Didier MIQUEY. **La prise en compte de l'énergie et du climat dans l'urbanisme.** Présentation de la Plateforme régionale (territoires et développement durable). 9 avril 2010. 25 pages.

[57]. **Réhabilitation énergétique des bâtiments.** Manuel de gestion environnementale et sociale à destination des professionnels du tourisme en province Alpes- Code d'Azur, 13 pages.

[58]. Jean-Pierre Ndoutoum, Stéphane Pouffary, Guillaume

Delaboulaye, Boufeldja Benabdallah, Louis-Noël Jail, Marilyne Laurendeau. **Guide du bâtiment durable en régions tropicales- Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales.**

Document préparé par l'équipe de l'INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE IFDD de L'ORGANISATION INTERNATIONALE DE LA FRANCOPHONIE, ISBN version imprimée : 978-2-89481-213-6, ISBN version électronique : 978-2-89481-215-0. Décembre 2015. 212 pages.

[59]. Jacques CLAESSENS, Yézouma COULIBALY, Thomas DJIAKO, Moïse GNAMKE, Abraham KANMOGNE, Alexis KEMAJOU, Mamadou J. KONE, Arame NDIAYE, Mohamed SAKO KOITA, Dimitris STAMATOUKOS. **EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE LA CLIMATISATION EN RÉGION TROPICALE - Tome 1 : CONCEPTION DES NOUVEAUX BÂTIMENTS.** Document préparé l'équipe de l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, ISBN : 2-89481-012-1. 186 pages.

[60]. **RÈGLEMENTATION THERMIQUE 2005.** Règle d'application Th-Bat, Th U 3/5, Parois vitrées, CSTB. 23 NOVEMBRE 2012. 78 pages.

[61]. Marie-Josèphe LAGOGUE et Christian SCHWARZBERG. **LES BÂTIMENTS À BASSE ÉNERGIE.** Guide technique rédigé par le COSTIC sous la direction technique de Hakim HAMADOU (ADEME), Maquette/Infographie : Caractères 04 93 08 29 44. Novembre 2011.164 pages.

[62]. Tom Schacher. **MAÇONNERIE CHAINÉE pour maison d'un à deux niveaux.** Guide pour technicien et artisans, 2009, 29 pages.

[63]. Madi Kaboré. Thèse de Doctorat, intitulée « **Enjeux de la simulation pour étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique Sub-saharienne** ». Co- tutelle entre l'Université GRENOBLE ALPES et Institut Internationale d'Ingénierie (2IE),

Spécialité : Génie Civil et Science de l'Habitat. Thèse soutenue publiquement le 27 janvier 2015. 192 pages.

[64]. **Confort thermique.** Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de construction publique par le Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques du Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, de la République française. Édition juillet 2013. 22 pages.

[65]. Bassam MOUJALLED. Thèse de Doctorat, intitulée « **Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés** », Institut des Sciences Appliquées de Lyon, École Doctorale : MEGA, Spécialité : Génie Civil. Année 2007. 330 pages.

[66]. Fabio MUNARETTO. Thèse de Doctorat, intitulée « **Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments** », École nationale supérieure des mines de Paris, Spécialité : Énergétique. Février 2014. 355 pages.

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784>

[67]. Mathieu BONTE. Thèse de Doctorat, intitulée « **Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment- Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ** », Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), Spécialité : Énergétique et transferts. Décembre 2014. 206 pages.

[68]. LAYAL CHAHWANE. Thèse de Doctorat, intitulée « **Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments** », Université de Grenoble, Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Thèse soutenue publiquement le 21 octobre 2011. 222 pages.

[69]. Daniel BÉGUIN, Patrick LEROUX, Loïc MARCHETTTO, Michael CLÉMENT. **Guide de l'écoconstruction.** Document édité par l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, l'ADEME et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse. Février 2006. 68 pages.

[70]. Joséfa Pricoupenko, Aymone Nicolas, Sabine Mounier,

Frédéric Bleuze. **Guide écohabitat.** Septembre 2010. 56 pages.

[71]. **La protection solaire dans les bâtiments à basse consommation.** Document rédigé par the European Solar-Shading Organization et la Fédération Française du Bâtiment (FFB). Édition février 2012. 36 pages.

[72]. **Isolation et humidité dans les parois.** Info Énergie Rhône- Alpes, Fiche réalisée HESPUL. Mise à jour 03 aout 2015. 8 pages.

[73]. **Performance thermique et choix des matériaux d'isolation.** Info Énergie Rhône- Alpes, Fiche réalisée HESPUL. Mise à jour janvier 2015. 4 pages.

[74]. Rémi CARRIÉ, Romuald JOBERT, Matthieu FOURNIER, Sylvain BERTHAULT, Hélène VAN ELSLANDE. **Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments – généralités et sensibilisation.** Ministère de l'Équipement des Transports de l'Aménagement du Territoire du Tourisme et de la Mer- CETE de Lyon- Département ville et territoires. Octobre 2006. 42 pages.

[75]. **Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques pleines.** Guide d'aide à la conception réalisé par la cellule de recherche Architecture et Climat, dans le cadre de la recherche ISOLIN, financée par le département Énergie et Bâtiment durable du Service Public de Wallonie. Version juillet 2010. 98 pages.

[76]. Dominique Tonal, Vincent Paillot, Étienne Chauvin, Julie Morvan. **Confort d'hiver, confort d'été- confort toute l'année.** Fiche-conseil architecture – énergie. CAUE du Doubs. Mai 2016. 8 pages.

[77]. **Règlementation Thermique 2000 : Règles Th-U - Fascicule 2 : Matériaux.** Version 2004. 16 pages.

[78]. Elhusna, Ade Sri Wahyuni, Agustin Gunawan. **Performance of clay bricks of Bengkulu.** 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials 2014 (SCESCM 2014). 6 pages.

[79]. J.A. Clarke, P.P. Yaneske & A.A. Pinney. **The Harmonization of Thermal Properties of Building**

**Materials.** BRE Publication. BEPAC Research Report. 87 pages.

**[80].** Thierry Joffroy, Arnaud Misse, Robert Celaire, Lalaina Rakotomalala. **ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE ET**

**EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS AU SÉNÉGAL.** 2017. 91 pages. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02025559>

## WEBOGRAPHIE

| Propriétaire/Page<br>WEB                                                     | Adresse du lien                                                                                                                                                                                                                                                 | Date de<br>consultation |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Wikilivres                                                                   | <a href="https://fr.wikibooks.org/wiki/Transferts_thermiques/Conduction">https://fr.wikibooks.org/wiki/Transferts_thermiques/Conduction</a>                                                                                                                     | 26 Aout 2019            |
| Khan Academy                                                                 | <a href="https://fr.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity">https://fr.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity</a> | 26 Aout 2019            |
| GUILCOR<br>CAPTEURS                                                          | <a href="https://sondes-thermiques.fr/582-sonde-de-temperature">https://sondes-thermiques.fr/582-sonde-de-temperature</a>                                                                                                                                       | 26 Aout 2019            |
| TESTOON                                                                      | <a href="https://www.testoon.com/guides--p-83994">https://www.testoon.com/guides--p-83994</a>                                                                                                                                                                   | 26 Aout 2019            |
| UNIVERSITÉ DE<br>RENNES                                                      | <a href="http://jfilemen.iutlan.univ-rennes1.fr/NTPF2/SERIE1/ther Rath.htm#Thermocouples">http://jfilemen.iutlan.univ-rennes1.fr/NTPF2/SERIE1/ther Rath.htm#Thermocouples</a>                                                                                   | 26 Aout 2019            |
| AlCaT Instruments                                                            | <a href="https://www.agro-agri.fr/choisir-capteur-temperature-thermocouple.html?category_id=34">https://www.agro-agri.fr/choisir-capteur-temperature-thermocouple.html?category_id=34</a>                                                                       | 26 Aout 2019            |
| AVIA TECHNO                                                                  | <a href="http://aviatechno.net/thermo/thermo01.php">http://aviatechno.net/thermo/thermo01.php</a>                                                                                                                                                               | 26 Aout 2019            |
| Énergie plus                                                                 | <a href="https://energieplus-lesite.be/theories/le-confort/le-confort-thermique-d1">https://energieplus-lesite.be/theories/le-confort/le-confort-thermique-d1</a>                                                                                               | 21 Aout 2019            |
| École nationale des<br>travaux publics<br>d'Alger                            | <a href="http://geolentp.blogspot.com/2011/05/les-argiles-ce-qu'il-faut-savoir-pour.html">http://geolentp.blogspot.com/2011/05/les-argiles-ce-qu'il-faut-savoir-pour.html</a>                                                                                   | 02 Juillet 2019         |
| Énergie plus                                                                 | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11016">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11016</a>                                                                                                                                         | 10 Avril 2019           |
| XPAIR                                                                        | <a href="https://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/solutions-climatisation-eau-glacee/confort_climatisation.htm#part-817">https://conseils.xpair.com/consulter_savoir_faire/solutions-climatisation-eau-glacee/confort_climatisation.htm#part-817</a>   | 10 Avril 2019           |
| MÉTÉO FRANCE                                                                 | <a href="http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees/humidite">http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees/humidite</a>                                                             | 10 Avril 2019           |
| Placo®                                                                       | <a href="https://www.placo.fr/Solutions/Solutions-par-benefice/Humidite/Humidite-tout-ce-qu'il-faut-savoir">https://www.placo.fr/Solutions/Solutions-par-benefice/Humidite/Humidite-tout-ce-qu'il-faut-savoir</a>                                               | 10 Avril 2019           |
| Corporation des<br>maîtres mécaniciens<br>en tuyauterie du<br>Québec (CMMTQ) | <a href="http://www.cmmtq.org/fr/Consommateur/Conseils-pratiques/Mesurer-l-humidite-de-votre-maison">http://www.cmmtq.org/fr/Consommateur/Conseils-pratiques/Mesurer-l-humidite-de-votre-maison</a>                                                             | 10 Avril 2019           |
| Bruxelles<br>Environnement                                                   | <a href="https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/2-limiter-l-humidite-interieure.html?IDC=7998">https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/2-limiter-l-humidite-interieure.html?IDC=7998</a>                                                             | 10 Avril 2019           |
| HABITER SA<br>CLASSE                                                         | <a href="http://www.habiterclass.be/boite-a-outils/confort-respiratoire/#tab-tab-320-0-0-1-320-0">http://www.habiterclass.be/boite-a-outils/confort-respiratoire/#tab-tab-320-0-0-1-320-0</a>                                                                   | 10 Avril 2019           |
| Clima Maison                                                                 | <a href="https://www.climamaison.com/lexique/humidite.htm">https://www.climamaison.com/lexique/humidite.htm</a>                                                                                                                                                 | 10 Avril 2019           |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                   |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Technique de l'Ingénieur | <a href="https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/maquette-numerique-du-batiment-bim-42662210/simulation-thermique-dynamique-std-maitrise-des-consommations-d-energie-c8103/">https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/maquette-numerique-du-batiment-bim-42662210/simulation-thermique-dynamique-std-maitrise-des-consommations-d-energie-c8103/</a> | 27 Mars 2019      |
| B.E.T. AXONE             | <a href="https://www.axone-bet.fr/simulation-thermique-dynamique">https://www.axone-bet.fr/simulation-thermique-dynamique</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 Mars 2019      |
| XPAIR                    | <a href="https://conseils.xpair.com/actualite_experts/simulation-thermique-dynamique.htm">https://conseils.xpair.com/actualite_experts/simulation-thermique-dynamique.htm</a>                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 Mars 2019      |
| AMOES                    | <a href="http://www.energiepositive.info/fr/prestations/simulation-thermique-dyn.html">http://www.energiepositive.info/fr/prestations/simulation-thermique-dyn.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 27 Mars 2019      |
| A-CONTRESENS             | <a href="https://planificateur.a-contresens.net/afrique/madagascar/analamanga_region/antananarivo/1070940.html">https://planificateur.a-contresens.net/afrique/madagascar/analamanga_region/antananarivo/1070940.html</a>                                                                                                                                                                                                                               | 12 Février 2019   |
| Météo Blue               | <a href="https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/antananarivo_madagascar_1070940">https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/modelclimate/antananarivo_madagascar_1070940</a>                                                                                                                                                                                                                                                       | 12 Février 2019   |
| Partir.com               | <a href="https://www.partir.com/Madagascar/Antananarivo/1070940/quand-partir.html">https://www.partir.com/Madagascar/Antananarivo/1070940/quand-partir.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 12 Février 2019   |
| CLIMATE-DATA.ORG         | <a href="https://fr.climate-data.org/afrique/madagascar/tananarive/tananarive-548/">https://fr.climate-data.org/afrique/madagascar/tananarive/tananarive-548/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 12 Février 2019   |
| Composant électronique   | <a href="http://www.composelec.com/thermocouple.php">http://www.composelec.com/thermocouple.php</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 15 Janvier 2019   |
| ALMEMO®                  | <a href="https://www.ahlborn.com/fr_FR/mesure-de-flux-thermique">https://www.ahlborn.com/fr_FR/mesure-de-flux-thermique</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 15 Janvier 2019   |
| MADAGASCAR VISION        | <a href="https://www.madagascar-vision.com/analamanga-antananarivo-madagascar/">https://www.madagascar-vision.com/analamanga-antananarivo-madagascar/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 08 Octobre 2018   |
| Association Promotelec   | <a href="https://professionnels.promotelec.com/fiche-dossier/ponts-thermiques-residentiel/?_ga=2.56524137.335009264.1573718413-759459672.1573718413#">https://professionnels.promotelec.com/fiche-dossier/ponts-thermiques-residentiel/?_ga=2.56524137.335009264.1573718413-759459672.1573718413#</a>                                                                                                                                                   | 17 septembre 2018 |
| PAGES ÉNERGIES           | <a href="http://blog.pages-energie.com/ponts-thermiques-consequences-bonnes-pratiques.html">http://blog.pages-energie.com/ponts-thermiques-consequences-bonnes-pratiques.html</a>                                                                                                                                                                                                                                                                       | 17 Septembre 2018 |
| Wikilivres               | <a href="https://fr.wikibooks.org/wiki/Recherche_d%27information_sur_l%27internet">https://fr.wikibooks.org/wiki/Recherche_d%27information_sur_l%27internet</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 10 Aout 2018      |
| Énergies plus            | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10182">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10182</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 juillet 2018   |
| Énergies plus            | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 juillet 2018   |
| Énergies plus            | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18523">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18523</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 24 juillet 2018   |
| Énergies plus            | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15346">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15346</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 16 juillet 2018   |
| Énergies plus            | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=17041">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=17041</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 16 juillet 2018   |
| Fenetrealu               | <a href="http://www.fenetrealu.com/economie-energie/fenetre-economie-energie/performance-energetique-fenetre">http://www.fenetrealu.com/economie-energie/fenetre-economie-energie/performance-energetique-fenetre</a>                                                                                                                                                                                                                                   | 10 juillet 2018   |
| FFB PÔLES FENÊTRES       | <a href="http://www.paroisvitreesrt2012.fr/caracterisation-parois-vitrees">http://www.paroisvitreesrt2012.fr/caracterisation-parois-vitrees</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 10 Juillet 2018   |

|                                                |                                                                                                                                                                                                                                         |                   |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Eneguide b.e                                   | <a href="https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quest-ce-quun-pont-thermique-et-comment-y-remedier/423/">https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/quest-ce-quun-pont-thermique-et-comment-y-remedier/423/</a>             | 26 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397</a>                                                                                                                 | 26 Juillet 2018   |
| Macocco vitrages                               | <a href="http://www.macocco.com/fr/transmission-lumineuse-tl.html">http://www.macocco.com/fr/transmission-lumineuse-tl.html</a>                                                                                                         | 26 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18523">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18523</a>                                                                                                                 | 26 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15346">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15346</a>                                                                                                                 | 16 juillet 2018   |
| ECO-RÉNOVATION                                 | <a href="https://www.picbleu.fr/page/que-choisir-comme-isolant-de-qualite-construction-renovation">https://www.picbleu.fr/page/que-choisir-comme-isolant-de-qualite-construction-renovation</a>                                         | 16 juillet 2018   |
| PassivAct                                      | <a href="https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-ComparaisonsMateriaux.html">https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-ComparaisonsMateriaux.html</a>                                                           | 16 juillet 2018   |
| PassivAct                                      | <a href="https://passivact.com/Concepts/files/Vitrages-BilansThermiques.html">https://passivact.com/Concepts/files/Vitrages-BilansThermiques.html</a>                                                                                   | 10 Juillet 2018   |
| HABITAT DURABLE                                | <a href="https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant">https://www.picbleu.fr/page/l-isolation-thermique-double-et-triple-vitrage-isolant</a>                                                     | 10 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16893">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16893</a>                                                                                                                 | 10 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15347">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15347</a>                                                                                                                 | 10 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15348</a>                                                                                                                 | 10 Juillet 2018   |
| WikiHow                                        | <a href="https://fr.wikihow.com/calculer-la-chaleur-sp%C3%A9cifique">https://fr.wikihow.com/calculer-la-chaleur-sp%C3%A9cifique</a>                                                                                                     | 10 Juillet 2018   |
| TINATUR®                                       | <a href="http://www.tinatur.com/REFERENCES-Comment-calculer-le-R-ou-Resistance.html">http://www.tinatur.com/REFERENCES-Comment-calculer-le-R-ou-Resistance.html</a>                                                                     | 10 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16889">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16889</a>                                                                                                                 | 10 Juillet 2018   |
| Ecobati                                        | <a href="https://www.ecobati.com/fr/a-propos/services/conseils/lexique/la-resistance-thermique">https://www.ecobati.com/fr/a-propos/services/conseils/lexique/la-resistance-thermique</a>                                               | 10 Juillet 2018   |
| Énergies plus                                  | <a href="https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10254">https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10254</a>                                                                                                                 | 10 Juillet 2018   |
| WikiTP- École des Travaux Publics de Normandie | <a href="https://www.wikitp.fr/essais-de-sol/essai-datterberg">https://www.wikitp.fr/essais-de-sol/essai-datterberg</a>                                                                                                                 | 29 Juin 2018      |
| energie-environnement.ch                       | <a href="https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/conception-du-batiment/confort-thermique">https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/conception-du-batiment/confort-thermique</a> | 15 Septembre 2017 |
| Ooreka                                         | <a href="http://construction-maison.comprendrechoisir.com/comprendre/construction-maison-bioclimatique">http://construction-maison.comprendrechoisir.com/comprendre/construction-maison-bioclimatique</a>                               | 24 juillet 2017   |
| Fiabitat scop                                  | <a href="http://www.fiabitat.com/series/bioclimatisme/">http://www.fiabitat.com/series/bioclimatisme/</a>                                                                                                                               | 24 juillet 2017   |
| Nord le département                            | <a href="http://hebergement-touristique-durable.lenord.fr/architecture-bioclimatique.html">http://hebergement-touristique-durable.lenord.fr/architecture-bioclimatique.html</a>                                                         | 24 juillet 2017   |
| Wikipédia                                      | <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermique_du_b%C3%A2timent#D.C3.A9finition">https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermique_du_b%C3%A2timent#D.C3.A9finition</a>                                                                         | 30 Mars 2017      |

## ANNEXE

### ANNEXE 01 : CONDUCTIVITÉS ET CAPACITÉS THERMIQUES DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

| Métaux                                               |                            |                            |                                      |                                      |
|------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Matériau                                             | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) | Chaleur massique c<br>J/ (kg. K)     | Masse<br>volumique<br>$\rho$ (kg.m³) |
| Plomb                                                | 35                         | 35                         | 130                                  | 11 300                               |
| Cuivre                                               | 380                        | 380                        | 380                                  | 8 900                                |
| Acier                                                | 50                         | 50                         | 450                                  | 7 800                                |
| Aluminium<br>99 %                                    | 160                        | 160                        | 880                                  | 2 800                                |
| Fonte                                                | 50                         | 50                         | 450                                  | 7 500                                |
| Zinc                                                 | 110                        | 110                        | 380                                  | 7 200                                |
| Pierres naturelles                                   |                            |                            |                                      |                                      |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)          |                            |                            |                                      |                                      |
| Matériau                                             | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) | Masse<br>volumique<br>$\rho$ (kg.m³) |                                      |
| Pierres lourdes (granite, gneiss, basalte, porphyre) | 3,50                       | 3,50                       | $2\,700 \leq \rho \leq 3\,000$       |                                      |
| « Petit granite » (pierre bleue), pierre calcaire    | 2,91                       | 3,50                       | 2 700                                |                                      |
| Marbres                                              | 2,91                       | 3,50                       | 2 800                                |                                      |
| Pierres dures                                        | 2,91                       | 2,68                       | 2 550                                |                                      |
| Pierres fermes                                       | 1,74                       | 2,09                       | 2 350                                |                                      |
| Pierres demi-fermes (moellon)                        | 1,40                       | 1,69                       | 2 200                                |                                      |
| Briques en terre cuite                               |                            |                            |                                      |                                      |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)          |                            |                            |                                      |                                      |
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m³)                    | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) |                            | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K)           |                                      |
| $\rho \leq 700$                                      | 0,22                       |                            | 0,43                                 |                                      |
| $700 < \rho \leq 800$                                | 0,25                       |                            | 0,49                                 |                                      |
| $800 < \rho \leq 900$                                | 0,28                       |                            | 0,56                                 |                                      |

| $900 < \rho \leq 1000$                          | 0,32                       | 0,63                       |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $1000 < \rho \leq 1100$                         | 0,35                       | 0,70                       |
| $1100 < \rho \leq 1200$                         | 0,39                       | 0,77                       |
| $1200 < \rho \leq 1300$                         | 0,42                       | 0,84                       |
| $1300 < \rho \leq 1400$                         | 0,47                       | 0,93                       |
| $1400 < \rho \leq 1500$                         | 0,51                       | 1,00                       |
| $1500 < \rho \leq 1600$                         | 0,55                       | 1,09                       |
| $1600 < \rho \leq 1700$                         | 0,60                       | 1,19                       |
| $1700 < \rho \leq 1800$                         | 0,65                       | 1,28                       |
| $1800 < \rho \leq 1900$                         | 0,71                       | 1,40                       |
| $1900 < \rho \leq 2000$                         | 0,76                       | 1,49                       |
| $2000 < \rho \leq 2100$                         | 0,81                       | 1,61                       |
| <b>Briques/blocs silico-calcaires</b>           |                            |                            |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)     |                            |                            |
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m <sup>3</sup> )  | $\lambda_{Ui}$<br>W/(m.K)  | $\lambda_{Ue}$<br>W/(m.K)  |
| $\rho \leq 900$                                 | 0,36                       | 0,78                       |
| $900 < \rho \leq 1000$                          | 0,37                       | 0,81                       |
| $1000 < \rho \leq 1100$                         | 0,40                       | 0,87                       |
| $1100 < \rho \leq 1200$                         | 0,45                       | 0,97                       |
| $1200 < \rho \leq 1300$                         | 0,51                       | 1,11                       |
| $1300 < \rho \leq 1400$                         | 0,57                       | 1,24                       |
| $1400 < \rho \leq 1500$                         | 0,66                       | 1,43                       |
| $1500 < \rho \leq 1600$                         | 0,76                       | 1,65                       |
| $1600 < \rho \leq 1700$                         | 0,87                       | 1,89                       |
| $1700 < \rho \leq 1800$                         | 1,00                       | 2,19                       |
| $1800 < \rho \leq 1900$                         | 1,14                       | 2,49                       |
| $1900 < \rho \leq 2000$                         | 1,30                       | 2,84                       |
| $2000 < \rho \leq 2100$                         | 1,49                       | 3,25                       |
| $2100 < \rho \leq 2200$                         | 1,70                       | 3,71                       |
| <b>Blocs de béton avec granulats ordinaires</b> |                            |                            |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)     |                            |                            |
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m <sup>3</sup> )  | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) |
| $P \leq 1600$                                   | 1,07                       | 1,39                       |

| $1600 < \rho \leq 1700$                                                                                                              | 1,13                       | 1,47                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $1700 < \rho \leq 1800$                                                                                                              | 1,23                       | 1,59                       |
| $1800 < \rho \leq 1900$                                                                                                              | 1,33                       | 1,72                       |
| $1900 < \rho \leq 2000$                                                                                                              | 1,45                       | 1,88                       |
| $2000 < \rho \leq 2100$                                                                                                              | 1,58                       | 2,05                       |
| $2100 < \rho \leq 2200$                                                                                                              | 1,73                       | 2,24                       |
| $2200 < \rho \leq 2300$                                                                                                              | 1,90                       | 2,46                       |
| $2300 < \rho \leq 2400$                                                                                                              | 2,09                       | 2,71                       |
| <b>Blocs de béton d'argile expansés</b>                                                                                              |                            |                            |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                          |                            |                            |
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m <sup>3</sup> )                                                                                       | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) |
| $P \leq 400$                                                                                                                         | 0,14                       | (1)                        |
| $400 < \rho \leq 500$                                                                                                                | 0,18                       | (1)                        |
| $500 < \rho \leq 600$                                                                                                                | 0,21                       | 0,28                       |
| $600 < \rho \leq 700$                                                                                                                | 0,25                       | 0,33                       |
| $700 < \rho \leq 800$                                                                                                                | 0,30                       | 0,39                       |
| $800 < \rho \leq 900$                                                                                                                | 0,33                       | 0,44                       |
| $900 < \rho \leq 1000$                                                                                                               | 0,38                       | 0,50                       |
| $1000 < \rho \leq 1100$                                                                                                              | 0,43                       | 0,57                       |
| $1100 < \rho \leq 1200$                                                                                                              | 0,49                       | 0,65                       |
| $1200 < \rho \leq 1300$                                                                                                              | 0,55                       | 0,73                       |
| $1300 < \rho \leq 1400$                                                                                                              | 0,61                       | 0,80                       |
| $1400 < \rho \leq 1500$                                                                                                              | 0,67                       | 0,88                       |
| $1500 < \rho \leq 1600$                                                                                                              | 0,75                       | 0,99                       |
| $1600 < \rho \leq 1700$                                                                                                              | 0,83                       | 1,10                       |
| <sup>(1)</sup> L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée. |                            |                            |
| <b>Blocs de béton avec d'autres granulats légers</b>                                                                                 |                            |                            |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                          |                            |                            |
| Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m <sup>3</sup> )                                                                                       | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) |
| $P \leq 500$                                                                                                                         | 0,30                       | (1)                        |
| $500 < \rho \leq 600$                                                                                                                | 0,33                       | 0,43                       |
| $600 < \rho \leq 700$                                                                                                                | 0,37                       | 0,47                       |

|                                                                                                                                                                                                                      |                             |                             |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 700 < ρ ≤ 800                                                                                                                                                                                                        | 0,41                        | 0,52                        |                           |
| 800 < ρ ≤ 900                                                                                                                                                                                                        | 0,46                        | 0,58                        |                           |
| 900 < ρ ≤ 1000                                                                                                                                                                                                       | 0,51                        | 0,65                        |                           |
| 1000 < ρ ≤ 1100                                                                                                                                                                                                      | 0,57                        | 0,73                        |                           |
| 1100 < ρ ≤ 1200                                                                                                                                                                                                      | 0,64                        | 0,82                        |                           |
| 1200 < ρ ≤ 1300                                                                                                                                                                                                      | 0,72                        | 0,91                        |                           |
| 1300 < ρ ≤ 1400                                                                                                                                                                                                      | 0,82                        | 1,04                        |                           |
| 1400 < ρ ≤ 1500                                                                                                                                                                                                      | 0,92                        | 1,17                        |                           |
| 1500 < ρ ≤ 1600                                                                                                                                                                                                      | 1,03                        | 1,31                        |                           |
| 1600 < ρ ≤ 1800                                                                                                                                                                                                      | 1,34                        | 1,70                        |                           |
| (1) L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée.                                                                                            |                             |                             |                           |
| Blocs de béton cellulaire autoclaves                                                                                                                                                                                 |                             |                             |                           |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                                                                                                          |                             |                             |                           |
| Masse volumique<br>ρ (kg.m³)                                                                                                                                                                                         | λ <sub>Ui</sub><br>W/ (m.K) | λ <sub>Ue</sub><br>W/ (m.K) |                           |
| ρ ≤ 300                                                                                                                                                                                                              | 0,10                        | (1)                         |                           |
| 300 < ρ ≤ 400                                                                                                                                                                                                        | 0,13                        | (1)                         |                           |
| 400 < ρ ≤ 500                                                                                                                                                                                                        | 0,16                        | (1)                         |                           |
| 500 < ρ ≤ 600                                                                                                                                                                                                        | 0,20                        | 0,32                        |                           |
| 600 < ρ ≤ 700                                                                                                                                                                                                        | 0,22                        | 0,36                        |                           |
| 700 < ρ ≤ 800                                                                                                                                                                                                        | 0,26                        | 0,42                        |                           |
| 800 < ρ ≤ 900                                                                                                                                                                                                        | 0,29                        | 0,48                        |                           |
| 900 < ρ ≤ 1000                                                                                                                                                                                                       | 0,32                        | 0,52                        |                           |
| (1) L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée.                                                                                            |                             |                             |                           |
| Béton lourd normal                                                                                                                                                                                                   |                             |                             |                           |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                                                                                                          |                             |                             |                           |
| Béton lourd normal                                                                                                                                                                                                   | λ <sub>Ui</sub><br>W/ (m.K) | λ <sub>Ue</sub><br>W/ (m.K) | Masse volumique ρ (kg/m³) |
| Armé                                                                                                                                                                                                                 | 1,70                        | 2,20                        | 2 400                     |
| Non armé                                                                                                                                                                                                             | 1,30                        | 1,70                        | 2 400                     |
| Béton léger en panneaux pleins ou en dalle <sup>(2)</sup> (béton d'argile expansé, béton cellulaire, béton de laitier, de vermiculite, de liège, de perlite, de polystyrène, etc.)                                   |                             |                             |                           |
| La chaleur massique c vaut 1000 J/ (kg. K). Si des valeurs λ sont mentionnées dans les tableaux A.3 à A.8 pour ces produits, ces dernières seront utilisées. Les valeurs ci-dessous ne sont alors pas d'application. |                             |                             |                           |

| Masse volumique<br>ρ (kg.m³)                                                                                                                                                                                                                                          | λ <sub>Ui</sub><br>W/ (m.K)  | λ <sub>Ue</sub><br>W/ (m.K) |                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ρ< 350                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,12                         | (1)                         |                             |
| 350 ≤ ρ < 400                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,14                         | (1)                         |                             |
| 400 ≤ ρ < 450                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,15                         | (1)                         |                             |
| 450 ≤ ρ < 500                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,16                         | (1)                         |                             |
| 500 ≤ ρ < 550                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,17                         | (1)                         |                             |
| 550 ≤ ρ < 600                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,18                         | (1)                         |                             |
| 600 ≤ ρ <650                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,20                         | 0,31                        |                             |
| 650 ≤ ρ < 700                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,21                         | 0,34                        |                             |
| 700 ≤ ρ < 750                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,22                         | 0,36                        |                             |
| 750 ≤ ρ < 800                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,23                         | 0,38                        |                             |
| 800 ≤ ρ < 850                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,24                         | 0,40                        |                             |
| 850 ≤ ρ < 900                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,25                         | 0,43                        |                             |
| 900 ≤ ρ < 950                                                                                                                                                                                                                                                         | 0,27                         | 0,45                        |                             |
| 950 ≤ ρ < 1000                                                                                                                                                                                                                                                        | 0,29                         | 0,47                        |                             |
| 1000 ≤ ρ < 1100                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,32                         | 0,52                        |                             |
| 1100 ≤ ρ < 1200                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,37                         | 0,58                        |                             |
| <sup>(1)</sup> L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est, en règle générale, pas recommandée.                                                                                                                                |                              |                             |                             |
| <sup>(2)</sup> Dans le cas où les dalles ou les panneaux sont pourvus d'une armature parallèle au sens du flux thermique (ex. colliers, treillis d'armature), le transfert thermique sera pris en compte dans la détermination de la valeur U selon la NBN EN 10 211. |                              |                             |                             |
| Plâtre avec ou sans granulats légers                                                                                                                                                                                                                                  |                              |                             |                             |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                                                                                                                                                           |                              |                             |                             |
| Masse volumique<br>ρ (kg.m³)                                                                                                                                                                                                                                          | λ <sub>Ui</sub><br>W/ (m.K)  | λ <sub>Ue</sub><br>W/ (m.K) |                             |
| ρ ≤ 800                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,22                         | (1)                         |                             |
| 800 < ρ ≤ 1 100                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,35                         | (1)                         |                             |
| 1 100 < ρ                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,52                         | (1)                         |                             |
| <sup>(1)</sup> L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée.                                                                                                                                  |                              |                             |                             |
| Enduits                                                                                                                                                                                                                                                               |                              |                             |                             |
| La chaleur massique c vaut 1 000 J/ (kg. K)                                                                                                                                                                                                                           |                              |                             |                             |
| Enduits                                                                                                                                                                                                                                                               | Masse volumique<br>ρ (kg.m³) | λ <sub>Ui</sub><br>W/ (m.K) | λ <sub>Ue</sub><br>W/ (m.K) |

|                                                                                                                                                                                       |                                   |                            |                            |                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Mortier de ciment                                                                                                                                                                     | 1 900                             | 0,93                       | 1,50                       |                                |
| Mortier de chaux                                                                                                                                                                      | 1 600                             | 0,70                       | 1,20                       |                                |
| Plâtre                                                                                                                                                                                | 1 300                             | 0,52                       | (1)                        |                                |
| (1) L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures, avec entre autres un risque d'humidification par la pluie, n'est en règle générale pas recommandée. |                                   |                            |                            |                                |
| Bois et dérivés de bois                                                                                                                                                               |                                   |                            |                            |                                |
| Matériau                                                                                                                                                                              | Masse volumique<br>$\rho$ (kg.m³) | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) | c<br>[J/kg. K]                 |
| Bois de charpente                                                                                                                                                                     | ≤ 600                             | 0,13                       | 0,15                       | 1880                           |
|                                                                                                                                                                                       | > 600                             | 0,18                       | 0,20                       | 1880                           |
| Panneau de contreplaqué                                                                                                                                                               | <400                              | 0,09                       | 0,11                       | 1880                           |
|                                                                                                                                                                                       | 400 ≤ ρ < 600                     | 0,13                       | 0,15                       |                                |
|                                                                                                                                                                                       | 600 ≤ ρ < 850                     | 0,17                       | 0,20                       |                                |
|                                                                                                                                                                                       | ≥ 850                             | 0,24                       | 0,28                       |                                |
| Panneau de particules ou d'aggloméré                                                                                                                                                  | < 450                             | 0,10                       | (1)                        | 1880                           |
|                                                                                                                                                                                       | 450 ≤ ρ < 750                     | 0,14                       | (1)                        |                                |
|                                                                                                                                                                                       | ≥ 750                             | 0,18                       | (1)                        |                                |
| Panneau de fibres liées au ciment                                                                                                                                                     | 1200                              | 0,23                       | (1)                        | 1470                           |
| Panneaux d'OSB (oriented strand board)                                                                                                                                                | 650                               | 0.13                       | (1)                        | 1880                           |
| Panneau de fibres de bois (y compris MDF)                                                                                                                                             | < 375                             | 0,07                       | (1)                        | 1880                           |
|                                                                                                                                                                                       | 375 ≤ ρ < 500                     | 0,10                       | (1)                        |                                |
|                                                                                                                                                                                       | 500 ≤ ρ < 700                     | 0,14                       | (1)                        |                                |
|                                                                                                                                                                                       | ≥ 700                             | 0,18                       | (1)                        |                                |
| (1) L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est, en règle générale, pas recommandée.                                                           |                                   |                            |                            |                                |
| Matériaux d'isolation thermique                                                                                                                                                       |                                   |                            |                            |                                |
| Matériau d'isolation                                                                                                                                                                  |                                   | $\lambda_{Ui}$<br>W/ (m.K) | $\lambda_{Ue}$<br>W/ (m.K) | Chaleur massique<br>J/ (kg. K) |
| Liège (ICB)                                                                                                                                                                           |                                   | 0,050                      | (1)                        | 1 560                          |
| Laine minérale (MW)                                                                                                                                                                   |                                   | 0,045                      | (1)                        | 1 030                          |
| Polystyrène expansé (EPS)                                                                                                                                                             |                                   | 0,045                      | (1)                        | 1 450                          |
| Polyéthylène extrudé (PEF)                                                                                                                                                            |                                   | 0,045                      | (1)                        | 1 450                          |

|                                                                                                                                        |                             |                             |                                   |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Mousse phénolique – revêtu (PF)                                                                                                        | 0.045 <sup>(2)</sup>        | (1)                         | 1 400                             |                                      |
| Polyuréthane – revêtu (PUR/PIR)                                                                                                        | 0,035                       | (1)                         | 1 400                             |                                      |
| Polystyrène extrudé (XPS)                                                                                                              | 0,040                       | (1)                         | 1 450                             |                                      |
| Verre cellulaire (CG)                                                                                                                  | 0,055                       | (1)                         | 1 000                             |                                      |
| Perlite (EPB)                                                                                                                          | 0,060                       | (1)                         | 900                               |                                      |
| Vermiculite                                                                                                                            | 0,065                       | (1)                         | 1 080                             |                                      |
| Vermiculite expansée (panneaux)                                                                                                        | 0,090                       | (1)                         | 900                               |                                      |
| <sup>(1)</sup> L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures n'est en règle générale pas recommandée.   |                             |                             |                                   |                                      |
| <sup>(2)</sup> Pour les panneaux d'isolation revêtus en mousse de phénol à cellules fermées, cette valeur est ramenée à 0,030 W/ (m.K) |                             |                             |                                   |                                      |
| Matériaux divers                                                                                                                       |                             |                             |                                   |                                      |
| Matériau                                                                                                                               | $\lambda_{U,i}$<br>W/ (m.k) | $\lambda_{U,e}$<br>W/ (m.k) | Chaleur<br>massique<br>J/ (kg. K) | Masse<br>volumique<br>$\rho$ (kg/m³) |
| Verre                                                                                                                                  | 1,00                        | 1,00                        | 750                               | 2 500                                |
| Carreaux de terre cuite                                                                                                                | 0,81                        | 1,00                        | 1 000                             | 1 700                                |
| Carreaux de grès                                                                                                                       | 1,20                        | 1,30                        | 1 000                             | 2 000                                |
| Caoutchouc                                                                                                                             | 0,17                        | 0,17                        | 1 400                             | 1 500                                |
| Linoléum, carreaux de PVC                                                                                                              | 0,19                        | -                           | 1 400                             | 1 200                                |
| Panneaux en ciment renforcé de fibres minérales naturelles                                                                             | 0,35                        | 0,50                        | 1 000                             | $1\,400 \leq \rho \leq 1\,900$       |
| Asphalte coulé                                                                                                                         | 0,70                        | 0,70                        | 1 000                             | 2 100                                |
| Membrane bitumeuse                                                                                                                     | 0,23                        | 0,23                        | 1 000                             | 1 100                                |

## ANNEXE 02 : CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUE DES ROCHES/SOLS D'ASSISES DE CONSTRUCTION D'UN BÂTIMENT

| Type de roche      | Conductivité thermique<br>$\lambda$ (W/m. K) |                |     | Capacité thermique volumétrique<br>$\rho_c$ (MJ/m³K) |
|--------------------|----------------------------------------------|----------------|-----|------------------------------------------------------|
|                    | Min                                          | Valeur typique | Max |                                                      |
| Roches magmatiques |                                              |                |     |                                                      |
| Basalte            | 1,3                                          | 1,7            | 2,3 | 2.3 - 2,6                                            |
| Diorite            | 2,0                                          | 2,6            | 2,9 | 2,9                                                  |
| Gabbro             | 1,7                                          | 1,9            | 2,5 | 2,6                                                  |

|                               |          |            |     |           |
|-------------------------------|----------|------------|-----|-----------|
| Granite                       | 2,1      | 3,4        | 4,1 | 2.1 - 3,0 |
| Péridotite                    | 3,8      | 4,0        | 5,3 | 2,7       |
| Rhyolithe                     | 3,1      | 3,3        | 3,4 | 2,1       |
| <b>Roches métamorphiques</b>  |          |            |     |           |
| Gneiss                        | 1,9      | 2,9        | 4,0 | 1.8 - 2,4 |
| Marbre                        | 1,3      | 2,1        | 3,1 | 2,0       |
| Méta quartzite                | env. 5,8 |            |     | 2,1       |
| Micaschistes                  | 1,5      | 2,0        | 3,1 | 2,2       |
| Schistes argileux             | 1,5      | 2,1        | 2,1 | 2.2 - 2,5 |
| <b>Roches sédimentaires</b>   |          |            |     |           |
| Calcaire                      | 2,5      | 2,8        | 4,0 | 2.1 - 2,4 |
| Marne                         | 1,5      | 2,1        | 3,5 | 2.2 - 2,3 |
| Quartzite                     | 3,6      | 6,0        | 6,6 | 2.1 - 2,2 |
| Sel                           | 5,3      | 5,4        | 6,4 | 1,2       |
| Grès                          | 1,3      | 2,3        | 5,1 | 1.6 - 2,8 |
| Roches argileuses limoneuses  | 1,1      | 2,2        | 3,5 | 2.1 - 2,4 |
| <b>Roches non consolidées</b> |          |            |     |           |
| Gravier sec                   | 0,4      | 0,4        | 0,5 | 1.4 - 1,6 |
| Gravier saturé d'eau          | env. 1,8 |            |     | env. 2,4  |
| Moraine                       | 1,0      | 2,0        | 2,5 | 1.5 - 2,5 |
| Sable sec                     | 0,3      | 0,4        | 0,8 | 1.3 - 1,6 |
| Sable saturé d'eau            | 1,7      | 2,4        | 5,0 | 2.2 - 2,9 |
| Argile/limon sèche            | 0,4      | <b>0,5</b> | 1,0 | 1.5 - 1,6 |
| Argile/limon saturée d'eau    | 0,9      | 1,7        | 2,3 | 1.6 - 3,4 |
| Tourbe                        | 0,2      | 0,4        | 0,7 | 0.5 - 3,8 |
| <b>Autres substances</b>      |          |            |     |           |
| Bentonite                     | 0,5      | 0,6        | 0,8 | env. 3,9  |
| Béton                         | 0,9      | 1,6        | 2,0 | env. 1,8  |

### ANNEXE 03 : VALEURS USUELS COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DES FENÊTRES $U_g$ ET FACTEUR SOLAIRE DES VITRES $S_g$ EN FONCTION DES LEURS ÉPAISSEURS ET LEURS POIDS

| Type de vitrage                                      | Épaisseur (mm) | Poids (kg/m <sup>2</sup> ) | $U_g$ (W/m <sup>2</sup> . K) | Facteur solaire $S_g$ |
|------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Simple vitrage ordinaire ou tempéré ou armé ou durci | 2              | 5                          | 5,9                          | 0,88                  |

|                                                                |           |    |      |     |      |
|----------------------------------------------------------------|-----------|----|------|-----|------|
|                                                                |           | 3  | 7,5  | 5,8 | 0,87 |
|                                                                |           | 4  | 10   | 5,8 | 0,85 |
|                                                                |           | 5  | 12,5 | 5,8 | 0,84 |
|                                                                |           | 6  | 15   | 5,7 | 0,82 |
|                                                                |           | 8  | 20   | 5,7 | 0,80 |
|                                                                |           | 10 | 25   | 5,6 | 0,78 |
|                                                                |           | 12 | 30   | 5,6 | 0,75 |
|                                                                |           | 15 | 37,5 | 5,5 | 0,72 |
| Simple vitrage réfléchissant                                   | Clair     | 6  | 15   | 5,7 | 0,5  |
|                                                                | Bronze    | 6  | 15   | 5,7 | 0,44 |
|                                                                | Gris      | 6  | 15   | 5,7 | 0,42 |
|                                                                | Rose      | 6  | 15   | 5,7 | 0,51 |
|                                                                | Vert      | 6  | 15   | 5,7 | 0,36 |
| Simple vitrage feuilleté                                       | 33,1      | 6  | 15,5 | 5,7 | 0,79 |
|                                                                | 44,1      | 8  | 20,5 | 5,7 | 0,77 |
|                                                                | 55,1      | 10 | 25,5 | 5,6 | 0,75 |
|                                                                | 66,1      | 12 | 30,5 | 5,6 | 0,73 |
| Double vitrage                                                 | 4/6/4     | 14 | 20   | 3,3 | 0,75 |
|                                                                | 4/8/4     | 16 | 20   | 3,1 | 0,75 |
|                                                                | 4/12/4    | 20 | 20   | 2,9 | 0,76 |
|                                                                | 6/12/6    | 24 | 30   | 2,8 | 0,72 |
|                                                                | 6/15/6    | 27 | 30   | 2,7 | 0,72 |
|                                                                | 8/12/8    | 28 | 40   | 2,8 | 0,68 |
| Vitrage à basse émissivité (ou haut rendement) avec lame d'air | 4/12/4    | 20 | 20   | 1,8 | 0,64 |
|                                                                | 4/15/4    | 23 | 20   | 1,5 | 0,63 |
|                                                                | 6/12/6    | 24 | 30   | 1,7 | 0,61 |
|                                                                | 6/15/6    | 27 | 30   | 1,5 | 0,61 |
| Vitrage à basse émissivité (ou haut rendement) avec argon      | 4/12/4    | 20 | 20   | 1,4 | 0,64 |
|                                                                | 4/15/4    | 23 | 20   | 1,3 | 0,63 |
|                                                                | 6/12/6    | 24 | 30   | 1,4 | 0,61 |
|                                                                | 6/15/6    | 27 | 30   | 1,3 | 0,61 |
| Vitrage chromogène                                             | On        | 11 | 27,5 | 5,7 | 0,63 |
|                                                                | Off       | 11 | 27,5 | 5,7 | 0,64 |
| Triple vitrage                                                 | 4/8/4/8/4 | 28 | 30   | 2,1 | 0,67 |
| Vitrage réfléchissant                                          | 6/12/6    | 23 | 30   | 2,8 | 0,4  |

|                                                |            |    |      |     |      |
|------------------------------------------------|------------|----|------|-----|------|
| Double vitrage à isolation acoustique renforcé | 6/12/33,1  | 24 | 30,5 | 2,8 | 0,71 |
|                                                | 8/6/33,1   | 20 | 35,5 | 3,2 | 0,68 |
|                                                | 6/12/44,1  | 26 | 35,5 | 2,8 | 0,7  |
|                                                | 8/6/44,1   | 22 | 40,5 | 3,2 | 0,67 |
|                                                | 8/12/44,1  | 28 | 40,5 | 2,8 | 0,67 |
|                                                | 10/12/44,1 | 30 | 40,5 | 2,8 | 0,65 |

## ANNEXE 04 : APPORT DE CHALEUR DES APPAREILS ÉLECTRIQUES DANS UN LOCAL (W)

| Type d'appareils                      | Puissance nominale (W) | Gain à admettre (W) |                 |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------|
|                                       |                        | Chaleur sensible    | Chaleur latente |
| Friteuses 5 litres d'huiles           | 2 575                  | 464                 | 696             |
| Friteuse 10 l d'huile                 | 6 954                  | 1 102               | 1 653           |
| Chauffe pains                         | 435                    | 319                 | 29              |
| Moules à gaufrettes                   | 2 192/719              | 899/319             | 609/203         |
| Percolateur 2 l                       | 993                    | 394                 | 104             |
| Chauffe-eau                           | 146                    | 116                 | 29              |
| Cuisine électrique et machine à laver | 3 000                  | 1 450               | 1 550           |
| Aspirateur                            | 200                    | 200                 |                 |
| Essoreuse                             | 100                    | 15                  |                 |
| Congélateur 200 l                     | 175                    | 500                 |                 |
| Fer à repasser                        | 500                    | 230                 | 270             |
| Chaîne stéréophonique                 | 40                     | 40                  | 0               |
| Téléviseur                            | 175                    | 175                 | 0               |
| Séchoir à cheveux                     | 500/1 000              | 175/350             | 75/250          |
| Plaque de cuisson                     | 500/1 000              | 120/250             | 130/250         |
| Grill à viande                        | 3 000                  | 1 200               | 300             |
| Stérilisateur                         | 150                    | 175                 | 325             |
| Ordinateur                            | 400                    | 250                 | 0               |
| Cafetière                             | 500/3 000              | 750                 | 300             |
| Photocopieuse                         |                        | 750                 |                 |
| Imprimante à jet d'encre              |                        | 52                  |                 |
| Imprimante laser                      |                        | 15                  |                 |

|     |  |    |  |
|-----|--|----|--|
| Fax |  | 62 |  |
|-----|--|----|--|

## ANNEXE 05 : ÉNERGIE GRISE DE CERTAINS MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

| Type de matériau            | Énergie grise dépensée (en kWh/m3) |
|-----------------------------|------------------------------------|
| <b>Métaux</b>               |                                    |
| Acier                       | 60 000                             |
| Cuivre                      | 140 000                            |
| Zinc- titane                | 180 000                            |
| Aluminium                   | 190 000                            |
| <b>Canalisations</b>        |                                    |
| Tuyau en grès               | 3 200                              |
| Tuyau fibrociment           | 4 000                              |
| Tuyau PVC                   | 27 000                             |
| Tuyau d'acier               | 60 000                             |
| <b>Murs porteurs</b>        |                                    |
| Béton poreux                | 200                                |
| Brique en terre cuite       | 450                                |
| Béton                       | 500                                |
| Béton Arme                  | 1 850                              |
| <b>Enduits</b>              |                                    |
| À la chaux                  | 450                                |
| Plâtre                      | 750                                |
| Ciment                      | 110                                |
| <b>Charpente</b>            |                                    |
| Bois d'œuvre                | 180                                |
| Bois lamellé- collé         | 2 200                              |
| <b>Cloison légère</b>       |                                    |
| Panneau de plâtre fibreux   | 900                                |
| Panneau d'aggloméré         | 2 200                              |
| Panneau fibre de bois (dur) | 3 200                              |
| Contreplaqué                | 4 000                              |
| <b>Isolation thermique</b>  |                                    |
| Fibre de lin                | 30                                 |
| Cellulose de bois           | 50                                 |
| Laine de roche              | 150                                |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| Perlite             | 230   |
| Laine de verre      | 250   |
| Polystyrène expansé | 450   |
| Polystyrène extrudé | 850   |
| Étanchéité          |       |
| Asphalte coulé      | 1 950 |

## ANNEXE 06 : PROPRIÉTÉS DES GAZ

| Gaz     | Température<br>$T_m$ (°C) | Masse<br>volumique<br>$P$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Viscosité<br>dynamique<br>$\mu$ (Kg/ (m.s)) | Conductivité<br>thermique $\lambda$ (W/<br>(m.K)) | Chaleur<br>massique à<br>pression<br>constante<br>$c$ (J/ (Kg. K)) |
|---------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Air     | -10                       | 1,326                                          | $1,661 \times 10^{-5}$                      | $2\,336 \times 10^{-2}$                           | $1,008 \times 10^3$                                                |
|         | 0                         | 1,277                                          | $1,711 \times 10^{-5}$                      | $2\,416 \times 10^{-2}$                           |                                                                    |
|         | 10                        | 1,232                                          | $1,761 \times 10^{-5}$                      | $2\,496 \times 10^{-2}$                           |                                                                    |
|         | 20                        | 1,189                                          | $1,811 \times 10^{-5}$                      | $2\,576 \times 10^{-2}$                           |                                                                    |
| Argon   | -10                       | 1,829                                          | $2\,038 \times 10^{-5}$                     | $1,584 \times 10^{-2}$                            | $0,519 \times 10^3$                                                |
|         | 0                         | 1,762                                          | $2\,101 \times 10^{-5}$                     | $1,634 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 10                        | 1,699                                          | $2\,164 \times 10^{-5}$                     | $1,684 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 20                        | 1,640                                          | $2\,228 \times 10^{-5}$                     | $1,734 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
| Xénon   | -10                       | 6 121                                          | $2\,078 \times 10^{-5}$                     | $0,494 \times 10^{-2}$                            | $0,161 \times 10^3$                                                |
|         | 0                         | 5 897                                          | $2\,152 \times 10^{-5}$                     | $0,512 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 10                        | 5 689                                          | $2\,226 \times 10^{-5}$                     | $0,529 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 20                        | 5 495                                          | $2\,299 \times 10^{-5}$                     | $0,546 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
| Krypton | -10                       | 3 832                                          | $2\,260 \times 10^{-5}$                     | $0,842 \times 10^{-2}$                            | $0,245 \times 10^3$                                                |
|         | 0                         | 3 690                                          | $2\,330 \times 10^{-5}$                     | $0,870 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 10                        | 3 560                                          | $2\,400 \times 10^{-5}$                     | $0,900 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |
|         | 20                        | 3 430                                          | $2\,470 \times 10^{-5}$                     | $0,926 \times 10^{-2}$                            |                                                                    |

# TABLE DES MATIÈRES

|                                                                            |      |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| DÉDICACES.....                                                             | ii   |
| REMERCIEMENT .....                                                         | iii  |
| SOMMAIRE .....                                                             | iv   |
| LISTES DES ABRÉVIATIONS .....                                              | vi   |
| NOMENCLATURES .....                                                        | vii  |
| LISTE DES GRAPHIQUES .....                                                 | xiii |
| LISTE DES FIGURES.....                                                     | xvi  |
| LISTE DES PHOTOS.....                                                      | xix  |
| LISTE DES TABLEAUX.....                                                    | xxi  |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE .....                                                | 1    |
| <i>CONTEXTE</i> .....                                                      | 1    |
| <i>PROBLÉMATIQUE</i> .....                                                 | 1    |
| <i>OBJECTIF ET INTÉRÊT SCIENTIFIQUE DU SUJET</i> .....                     | 4    |
| <i>HYPOTHÈSES ET MÉTHODE DE RECHERCHE</i> .....                            | 5    |
| <i>STRUCTURE DE LA THÈSE</i> .....                                         | 8    |
| PARTIE I : PROCÉDÉ ANALYTIQUE.....                                         | 10   |
| CHAPITRE I- CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION D'ÉTUDE ..... | 11   |
| I - LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE.....                                         | 11   |
| II - LE CLIMAT .....                                                       | 11   |
| II- 1- LA TEMPÉRATURE .....                                                | 11   |
| II-2- LA PRÉCIPITATION .....                                               | 12   |
| II-3- L'HYGROMÉTRIE.....                                                   | 12   |
| II-4- L'ENSOLEILLEMENT .....                                               | 13   |
| II-5- LE VENT .....                                                        | 13   |
| III - RELIEF ET TOPOGRAPHIE .....                                          | 14   |
| IV - HYDROLOGIE .....                                                      | 14   |
| V - PÉDOLOGIE .....                                                        | 15   |
| VI - GÉOLOGIE.....                                                         | 15   |
| VII - OCCUPATION DES SOLS.....                                             | 16   |
| CHAPITRE II- LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY .....         | 17   |
| I - LES ARGILES.....                                                       | 17   |
| I-1- INTRODUCTION.....                                                     | 17   |
| I-2- DÉFINITION .....                                                      | 17   |
| I-3- ORIGINE DE L'ARGILE.....                                              | 18   |
| I-4- LE MÉCANISME DE FORMATION DE L'ARGILE .....                           | 18   |
| I -4-1- L'héritage.....                                                    | 19   |
| I -4-2- Les transformations .....                                          | 19   |
| I -4-3- Les néogènes ou authigènes.....                                    | 19   |
| I-5- LES DIFFÉRENTS ASPECTS DES ARGILES .....                              | 19   |
| I-6- DISTINCTION DES MINÉRAUX ARGILEUX.....                                | 20   |
| I-7- STRUCTURES DES MINÉRAUX ARGILEUX .....                                | 20   |
| I -7-1- Organisation des feuillets .....                                   | 22   |
| I -7-2- Les niveaux des porosités des matériaux d'argiles .....            | 23   |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I-8- CLASSIFICATION DES MINÉRAUX ARGILEUX .....                                                     | 24 |
| I-9- CONSTITUANTS GÉOTECHNIQUES DE L'ARGILE .....                                                   | 27 |
| I-10- PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE L'ARGILE .....                                                    | 28 |
| I-11- LES PRINCIPALES UTILISATIONS DE L'ARGILE .....                                                | 29 |
| II - LES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY .....                                          | 30 |
| II-1- DÉFINITION DE LA BRIQUE EN TERRE CUITE .....                                                  | 30 |
| II-2- BREF HISTORIQUE DE LA BRIQUE ARTISANALE EN TERRE CUITE .....                                  | 30 |
| II-3 -L'ARRIVÉE DE LA BRIQUE EN TERRE CUITE À MADAGASCAR .....                                      | 31 |
| II-3-1- L'architecture malgache avant le XIXe siècle.....                                           | 31 |
| II-3-2- La première utilisation de la brique en argile cuite à Madagascar .....                     | 32 |
| II-4- LES DIFFÉRENTS PROCESSUS DE FABRICATION DES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE MALAGASY ..... | 33 |
| II-4-1- L'extraction d'argile .....                                                                 | 33 |
| II-4-2- La préparation .....                                                                        | 33 |
| II-4-3- Le moulage des argiles crues .....                                                          | 34 |
| II-4-4- Le séchage.....                                                                             | 35 |
| II-4-5- La cuisson .....                                                                            | 37 |
| II-5- LA NORME GÉOMÉTRIQUE ET PHYSIQUE DES BRIQUES EN TERRE CUITE MALGACHE .....                    | 38 |
| II-6- LES PRINCIPAUX AVANTAGES DE L'UTILISATION DES BRIQUES ARTISANALES EN TERRE CUITE .....        | 38 |
| II-6-1- Matière première naturelle inépuisable.....                                                 | 38 |
| II-6-2- Matériaux flexibles pour la construction de murs d'un bâtiment.....                         | 39 |
| II-6-3- Chantier à faible nuisance .....                                                            | 39 |
| II-6-4 -Confort à vivre .....                                                                       | 39 |
| II-6-5- Ayant une durée de vie inégalée .....                                                       | 39 |
| II-6-6- Matériaux innovants.....                                                                    | 40 |
| III - ANALYSE ET SUGGESTION .....                                                                   | 40 |
| III-1- ANALYSE .....                                                                                | 40 |
| III-2- SUGGESTIONS GÉOTECHNIQUES.....                                                               | 41 |
| CHAPITRE III – CONCEPT DU CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT .....                                     | 42 |
| I - INTRODUCTION .....                                                                              | 42 |
| II - DÉFINITION DE LA CHALEUR .....                                                                 | 42 |
| III - LA THERMORÉGULATION HUMAINE .....                                                             | 43 |
| III-1- LE COMPORTEMENT .....                                                                        | 43 |
| III-2- LA PHYSIOLOGIE .....                                                                         | 43 |
| III- 3- LES DIFFÉRENTS FACTEURS DE SENSATION THERMIQUE D'UN INDIVIDU .....                          | 44 |
| IV - LE CONFORT THERMIQUE DANS LE BÂTIMENT .....                                                    | 45 |
| IV-1- BREF HISTORIQUE.....                                                                          | 45 |
| IV-2- DÉFINITION DU CONFORT THERMIQUE .....                                                         | 45 |
| IV-3- LES DIFFÉRENTS ENJEUX DU CONFORT THERMIQUE.....                                               | 46 |
| IV-3-1- Satisfaction corporelle individuelle .....                                                  | 46 |
| IV-3 2- L'économie.....                                                                             | 46 |
| IV-3-3- La qualité de l'air .....                                                                   | 47 |
| IV-3-4 – La pérennité du bâti.....                                                                  | 47 |
| IV-4- LE MODE D'ÉCHANGE THERMIQUE DU CORPS HUMAIN AVEC LEUR ENVIRONNEMENT : LE MÉTABOLISME .....    | 47 |
| IV-4-1- L'échange de chaleur par convection .....                                                   | 50 |
| IV-4-2- L'échange de chaleur par rayonnement .....                                                  | 51 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV-4-3- L'échange de chaleur latente ou évaporation.....                                  | 52  |
| IV-4-4- L'échange de chaleur par respiration.....                                         | 54  |
| IV-5- BILAN DES ÉCHANGES THERMIQUES DU CORPS HUMAIN .....                                 | 55  |
| IV-6- LES DIFFÉRENTS CRITÈRES DE CONFORT THERMIQUE.....                                   | 57  |
| IV-7- LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES AFFECTANT LE CONFORT THERMIQUE D'UN LOCAL .....           | 58  |
| IV-7-1- Les facteurs liés à l'individu .....                                              | 59  |
| IV-7-2- Les paramètres physiques.....                                                     | 61  |
| IV-7-3- Les gains thermiques .....                                                        | 87  |
| IV-7-4- Bilan énergétique d'un bâtiment .....                                             | 118 |
| IV-8- ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE D'UN BÂTIMENT .....                          | 121 |
| IV-8-1- Hypothèses simplificatrices de l'évolution de la température extérieure .....     | 121 |
| IV-8-2- Évolution de la température intérieure .....                                      | 121 |
| IV-9- MÉTHODE D'ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT .....                       | 122 |
| IV-9-1- Mesure directe.....                                                               | 122 |
| IV-9-2- Évaluation de la sensation par rapport à la température d'ambiance optimale ..... | 122 |
| IV-9-3- La simulation thermique.....                                                      | 125 |
| CONCLUSION.....                                                                           | 126 |
| IV-10- LES INCONFORTS LOCAUX .....                                                        | 126 |
| IV-10-1- L'effet du courant d'air.....                                                    | 127 |
| IV-10-2- L'effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique.....                           | 128 |
| IV-10-3- L'effet du gradient thermique de l'air .....                                     | 128 |
| IV-10-4- L'effet de la température du sol .....                                           | 128 |
| IV-10-5- Les critères nécessaires pour éviter l'inconfort dans un local.....              | 128 |
| IV-11- LES DIFFÉRENTS MODÈLES DE CONFORT THERMIQUE .....                                  | 129 |
| IV-11-1- Le modèle de Olgay .....                                                         | 129 |
| IV-11-2- Le modèle de Fanger.....                                                         | 130 |
| IV-11-3- Le modèle de confort adaptif de l'ASHRAE.....                                    | 131 |
| IV-11-4- Le Modèle du standard ASHRAE 552 004 .....                                       | 132 |
| IV-11-5- Le Modèle de la norme EN 15 251 de 2007 .....                                    | 133 |
| IV-11-6- Le modèle de Givoni .....                                                        | 133 |
| IV-11-7- Le modèle du standard ASHRAE 552 009 .....                                       | 134 |
| ANALYSE ET CONCLUSION.....                                                                | 135 |
| V - LE CONFORT THERMIQUE ET L'APPROCHE BIOCLIMATIQUE .....                                | 135 |
| V-1- SIGNIFICATION DE LA « BIOCLIMATIQUE » ET SON ORIGINE .....                           | 136 |
| V-2- OBJECTIF DE L'APPROCHE BIOCLIMATIQUE .....                                           | 136 |
| V-3- CONCEPTION BIOCLIMATIQUE.....                                                        | 137 |
| V-4- ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE .....                                                     | 137 |
| V-5- LES PRINCIPAUX PARAMÈTRES DE BASE DU BIOCLIMATIQUE.....                              | 138 |
| V-5-1- Le site.....                                                                       | 138 |
| V-5-2- La topographie du site.....                                                        | 139 |
| V-5-3- L'urbanisation .....                                                               | 139 |
| V-5-4- La couleur des revêtements proches .....                                           | 140 |
| V-5-5- La nature du sol d'assise .....                                                    | 140 |
| V-5-6- Les paramètres climatiques.....                                                    | 142 |
| V-5-7- Les paramètres architecturaux .....                                                | 151 |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V-5-7- Le plan de masse .....                                                                                                                 | 157 |
| PARTIE II : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.....                                                                                                        | 158 |
| CHAPITRE I- DÉTERMINATION DE L'ARGILOGITÉ, LA TENEUR EN EAU NATURELLE AINSI QUE LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA..... | 159 |
| I - IDENTIFICATION DE L'ARGILOGITÉ DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                                       | 159 |
| I-1- BUT ET PRINCIPE DE L'ESSAI .....                                                                                                         | 159 |
| I-2- ÉQUIPEMENTS/MATÉRIELS NÉCESSAIRES .....                                                                                                  | 160 |
| I-3- DÉROULEMENT DE L'ESSAI .....                                                                                                             | 160 |
| I -3-1- Préparation de l'échantillon .....                                                                                                    | 160 |
| I -3-2- Déroulement de l'essai .....                                                                                                          | 161 |
| I-4- MÉTHODE DE CALCUL ET RÉSULTAT DE L'ESSAI.....                                                                                            | 161 |
| I-5- VALIDATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE RÉSULTAT .....                                                                                  | 163 |
| II - DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU NATURELLE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                         | 164 |
| I-1- BUT ET PRINCIPE DE L'ESSAI .....                                                                                                         | 164 |
| I-2- ÉQUIPEMENTS/MATÉRIELS NÉCESSAIRES .....                                                                                                  | 164 |
| I-3- DÉROULEMENT DE L'ESSAI .....                                                                                                             | 164 |
| I-4- MÉTHODE DE CALCUL ET RÉSULTAT DE L'ESSAI.....                                                                                            | 164 |
| I-5- VALIDATION, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE RÉSULTAT .....                                                                                  | 165 |
| III - IDENTIFICATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ARGILE D'AMBOHITRIMANJAKA .....                                                           | 165 |
| III-1- ORIGINE DES ESSAIS .....                                                                                                               | 165 |
| III-2- DÉFINITION ET TERMINOLOGIE.....                                                                                                        | 166 |
| III-3- PRINCIPE DE LA MÉTHODE .....                                                                                                           | 167 |
| III-4- ÉQUIPEMENT NÉCESSAIRE .....                                                                                                            | 167 |
| III-4-1- Pour la préparation de l'échantillon.....                                                                                            | 167 |
| III-4-2- Pour la détermination de $W_L$ .....                                                                                                 | 168 |
| III-4-3- Pour la détermination de $W_P$ .....                                                                                                 | 168 |
| III-4-4- Pour la mesure des teneurs en eau $W$ .....                                                                                          | 168 |
| III-5- PROCESSUS DE L'ESSAI ET MÉTHODE DE CALCUL.....                                                                                         | 168 |
| III-5-1- Préparation de l'échantillon .....                                                                                                   | 168 |
| III-5-2- Détermination de la limite de liquidité $W_L$ .....                                                                                  | 169 |
| III-5-3- Détermination de la limite de plasticité $W_P$ .....                                                                                 | 170 |
| III-5-4- Calcul de l'indice de plasticité .....                                                                                               | 171 |
| III-5-5- Calcul de la limite de retrait .....                                                                                                 | 171 |
| III-6- RÉSULTATS DE L'ESSAI .....                                                                                                             | 171 |
| III-6-1- Limite de liquidité $W_L$ .....                                                                                                      | 171 |
| III-6-2- Limite de plasticité $W_P$ .....                                                                                                     | 173 |
| III-6-3- Indice de plasticité et retrait de l'Argile d'Ambohitrimanjaka.....                                                                  | 174 |
| III-7- SYNTHÈSE, VALIDATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS .....                                                                             | 174 |
| CHAPITRE II- ÉVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES DES PAROIS DU BÂTIMENT .....                                                              | 176 |
| I - DESCRIPTION ARCHITECTURALES DU BÂTIMENT .....                                                                                             | 176 |
| II - HYPOTHÈSES THERMOPHYSIQUE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT L'ENVELOPPE DU MODÈLE DU BÂTIMENT .....                                              | 177 |
| II-1- POUR LES PAROIS OPAQUES.....                                                                                                            | 177 |
| II-2- POUR LES OUVERTURES .....                                                                                                               | 185 |
| III - PERFORMANCE THERMOPHYSIQUE DES PAROIS DU MODÈLE DE BÂTIMENT .....                                                                       | 186 |
| III-1- POUR LES PAROIS OPAQUES.....                                                                                                           | 186 |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III-1-1-Validation, analyse et interprétation des résultats.....                                                              | 187 |
| III-2- POUR LES OUVERTURES .....                                                                                              | 188 |
| V-2- SUGGESTION POUR LES OUVERTURES.....                                                                                      | 189 |
| CHAPITRE III- SIMULATION DU CONFORT THERMIQUE DU BÂTIMENT .....                                                               | 190 |
| I - INTRODUCTION .....                                                                                                        | 190 |
| II - LES RAISONS DE CHOIX DU LOGICIEL ARCHICAD POUR LA RÉALISATION DE SIMULATION THERMIQUE DU BÂTIMENT OBJET DE L'ÉTUDE ..... | 190 |
| II-1- UN LOGICIEL DE CAO ARCHITECTURE DE RÉFÉRENCE .....                                                                      | 190 |
| II-2- UN LOGICIEL PERMETTANT DE MODÉLISER RAPIDEMENT DES STRUCTURES COMPOSITES .....                                          | 191 |
| II-3- UN LOGICIEL D'ESTIMATION ÉNERGÉTIQUE IDÉALE POUR LA SIMULATION THERMIQUE D'UN BÂTIMENT .....                            | 191 |
| II-4- LA FONCTIONNALITÉ DU LOGICIEL ARCHICAD .....                                                                            | 191 |
| II-5- LA VALIDATION DE LA PRÉCISION DES CALCULS DE LA SIMULATION THERMIQUE DU LOGICIEL ARCHICAD .....                         | 192 |
| III - DÉFINITION DES BLOCS THERMIQUES DU BÂTIMENT .....                                                                       | 192 |
| IV - DÉFINITION DES SOURCES ET PLANNING DES VENTILATIONS .....                                                                | 195 |
| V - LES APPORTS INTERNES DANS CHAQUE PIÈCE DU BÂTIMENT .....                                                                  | 195 |
| VI - ENVIRONNEMENT RELATIF AU SITE D'IMPLANTATION DU PROJET .....                                                             | 197 |
| VI-1- EMPLACEMENT DU PROJET .....                                                                                             | 197 |
| VI-2- DONNÉES CLIMATIQUES .....                                                                                               | 198 |
| VI-2-1- Température de l'air .....                                                                                            | 199 |
| VI-2-2- Humidité relative.....                                                                                                | 200 |
| VI-2-3- Le rayonnement solaire .....                                                                                          | 201 |
| VI-2-4- La vitesse du vent .....                                                                                              | 201 |
| VI-3- LA PROTECTION ÉOLIENNE.....                                                                                             | 203 |
| VI-4- L'OMBRAGE HORIZONTAL.....                                                                                               | 203 |
| VII - CARACTÉRISATION DE SOL D'ASSISE .....                                                                                   | 204 |
| VIII - SIMULATIONS HYGROTHERMIQUES DU BÂTIMENT .....                                                                          | 204 |
| VIII-1- RÉSULTATS DE LA SIMULATION THERMIQUE DU BÂTIMENT .....                                                                | 206 |
| VIII-1-1- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le nord .....                                                  | 206 |
| VIII-1-2- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'est.....                                                     | 210 |
| VIII-1-3- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le sud .....                                                   | 214 |
| VIII-1-4- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'ouest.....                                                   | 217 |
| VIII-1-5- Synthèse de l'analyse et interprétation des résultats .....                                                         | 220 |
| VIII-2- RÉSULTATS DE LA SIMULATION HYGROMÉTRIQUE DU BÂTIMENT .....                                                            | 225 |
| VIII-2-1- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le nord .....                                                  | 226 |
| VIII-2-2- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'est.....                                                     | 227 |
| VIII-2-3- Orientation de la façade principale du bâtiment vers le sud .....                                                   | 228 |
| VIII-2-4- Orientation de la façade principale du bâtiment vers l'ouest.....                                                   | 229 |
| VIII-2-5- Synthèse de l'analyse et interprétation des résultats .....                                                         | 230 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE .....                                                                                                     | 233 |
| BIBLIOGRAPHIE.....                                                                                                            | 235 |
| WEBOGRAPHIE .....                                                                                                             | 241 |
| ANNEXE .....                                                                                                                  | 244 |
| ANNEXE 01 : CONDUCTIVITÉS ET CAPACITÉS THERMIQUES DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION .....                              | 244 |
| ANNEXE 02 : CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUE DES ROCHES/SOLS D'ASSISES DE CONSTRUCTION D'UN BÂTIMENT .....                     | 250 |

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANNEXE 03 : VALEURS USUELS COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DES FENÊTRES $U_g$ ET FACTEUR SOLAIRE DES VITRES $S_g$ EN FONCTION DES LEURS ÉPAISSEURS ET LEURS POIDS ..... | 251 |
| ANNEXE 04 : APPOINT DE CHALEUR DES APPAREILS ÉLECTRIQUES DANS UN LOCAL (W) .....                                                                                              | 253 |
| ANNEXE 05 : ÉNERGIE GRISE DE CERTAINS MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION .....                                                                                                         | 254 |
| ANNEXE 06 : PROPRIÉTÉS DES GAZ .....                                                                                                                                          | 255 |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                                                                                                      | 256 |

**Auteur : RIANTSOA Donatien René**

Mail : [riantsoadonatien@gmail.com](mailto:riantsoadonatien@gmail.com)

**Titre : ÉTUDE DE CONFORT THERMIQUE D'UN BÂTIMENT EN BRIQUES ARTISANALES  
D'ARGILE CUITE NATURELLEMENT VENTILÉE : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION  
OPTIMALE**

**Spécialité : TECHNOLOGIE DES POUDRES DIVISÉES ET ECOBÂTIMENTS**

**Directeur de Thèse : RAKOTONINDRAINY**

**RÉSUMÉ**

L'objectif principal de la présente thèse est la recherche de l'orientation optimale d'un bâtiment d'habitation, en brique artisanale en terre cuite, naturellement ventilé vis-à-vis de son confort thermique afin de profiter les apports bioclimatiques du site et de réduire, en effet, les impacts des désordres environnementaux ainsi que des changements climatiques très cruciaux, dans la capitale de Madagascar actuelle, sur la santé de l'occupant du bâtiment.

La première partie de ce manuscrit met en exergue le procédé analytique, dans laquelle les perceptions des contextes géographique et géologique de la région d'étude, les briques artisanales en terre cuite malagasy ainsi que le concept de confort thermique d'un bâtiment sont issues de la synthèse de l'analyse bibliographique et webographique. Tandis que la deuxième partie fournit les démarches, l'hypothèse ainsi que les résultats de l'expérimentation réalisée, comme : les paramètres géotechniques de l'argile d'Ambohitrimanjaka, les performances thermiques des murs maçonnés avec ces briques issues de cette localité, ainsi que les résultats de la simulation hygrothermique du modèle du bâtiment, pour chaque orientation, dans le but d'identifier l'exposition optimale de leur façade principale.

L'analyse des résultats obtenus permet de trancher que l'orientation du modèle vers l'ouest offre la meilleure stabilité de confort thermique pour l'occupant du bâtiment toute l'année.

**Mots clés :** Analamanga, argiles, briques artisanales en terre cuite, confort thermique, approche bioclimatique, Archicad, Model de l'ASHRAE, Model de GIVONI, orientation optimale d'un bâtiment.

**ABSTRACT**

The principal objective of this thesis is the research of the optimal orientation of a building apartment, made of artisanal terra cotta brick, naturally ventilated with their thermal comfort, in order to benefit the bioclimatic contributions from the site and to reduce, indeed, impacts not only of environmental perturbations but also of crucial climate change, in the current capital of Madagascar, on the health of the building occupant.

The first part of this manuscript deals with the analytical process in which perceptions of geographical and geological context of the study area, the artisanal terra cotta bricks Malagasy as well as the concept of a building thermal comfort result from the synthesis of the bibliographical and webographic analysis. While the second part provided the steps, the assumption and the results of realized experimentation, like: the geotechnics parameters of Ambohitrimanjaka clay, the thermal performances of walls built with bricks resulting from this locality, as well as the hygrothermic simulation results of the building model, for each orientation, with the perspective to identify the optimal exposure of their principal frontage.

The analysis of the results obtained has enabled to know that the westward model orientation offers the best stability of thermal comfort for the building occupant all along the year.

**Key words:** Analamanga, clays, artisanal bricks of terra cotta, thermal comfort, bioclimatic approach, Archicad, ASHRAE Model, GIVONI Model, optimal orientation of a building