

ÉTUDE DU TRANSFERT THERMIQUE À TRAVERS LES PAROIS ENVELOPPES DE BATIMENT EN RÉGIME THERMIQUE DYNAMIQUE : PRINCIPES ET CALCULS

Mahamadou ALASSANE

*École Nationale d'Ingénieur Abderrahmane Baba TOURE (ENI-ABT),
410 Avenue Van VOLLENHOVEN, BP 242, Bamako, Mali
Département d'Etudes et de Recherches (DER) de Génie Civil, Laboratoire
de Génie Civil (Matériaux de Construction, Mécanique des Sols, Routes)*

* Correspondance, e-mail : mahaalass@gmail.com

RÉSUMÉ

Donner à un bâtiment les qualités nécessaires pour qu'il joue son rôle dans les meilleures conditions possibles, nécessite du concepteur (ingénieur, architecte etc.) une connaissance aussi parfaite que possible du comportement thermique des matériaux et des ouvrages, ainsi que des phénomènes physiques qui les sollicitent. L'étude du comportement thermique d'un composant de bâtiment se fait soit en régime thermique permanent (les déperditions thermiques d'hiver particulièrement) soit en régime thermique dynamique (la thermique d'été), qui concerne la situation que l'on rencontre dans les zones à climat tropical en particulier au Mali où les températures extérieures très élevées impactent l'efficacité énergétique des parois enveloppes de bâtiments. Les parois enveloppes de bâtiment étant soumises en permanence aux sollicitations climatiques extérieures, l'étude du comportement thermique en régime dynamique a concerné la réponse d'une paroi enveloppe de bâtiment à des sollicitations thermiques extérieures périodiques (ou harmoniques) afin de comprendre le processus du transfert thermique et la réponse harmonique de l'enveloppe, de définir les grandeurs thermiques caractérisant le régime harmonique et la méthode d'analyse et de calcul des principaux paramètres permettant d'assurer le confort thermique de l'enveloppe principalement sous un climat tropical.

Mots-clés : *confort thermique, paroi enveloppe de bâtiment, régime dynamique, régime harmonique, régime périodique, inertie thermique, amplitude thermique, amortissement thermique, déphasage thermique.*

Mahamadou ALASSANE

ABSTRACT

Study of heat transfer through the building envelope countries in Dynamic thermal regime : principles and calculations

Give à building the necessary qualities so that it plays its role in the best possible conditions necessity of the designer (engineer, architect) as perfect knowledge as possible of the thermal behavior of materials and works as well as of the phenomena which require them. The study of the behavior of building component is done either in permanent thermal regime (heat losses) or in dynamic thermal regime (summer thermal) which concerns the situation that one encounters in summer in areas with tropical climate especially in Mali where very high outside temperatures impact the energy efficiency of the building envelope walls. The building envelope walls being permanently subjected to external climatic stresses, the study of the thermal behavior in dynamic regime concerned the response of a building envelope wall to periodic external (or harmonic) thermal stresses in order to understand the process of thermal transfer and the harmonic response of the envelope, to define the quantities characterizing the harmonic regime and the method of calculation and analysis of the main parameters making it possible to ensure the envelope mainly in a tropical climate.

Keywords : *thermal comfort, building envelope wall, dynamic thermal regime, harmonic thermal regime, periodic thermal regime, thermal inertia, thermal amplitude, thermal damping, thermal phase shift.*

I - INTRODUCTION

« Le bâtiment est un ensemble très complexe soumis à des sollicitations externes et internes. Ces sollicitations sont la température extérieure, la radiation du rayonnement solaire, la pluie, la pression du sol, l'humidité, la chaleur, le vent, le bruit, la tornade entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et les échanges intérieurs » [1, 2]. Ici nous nous intéressons seulement à l'effet des sollicitations comme les températures extérieures et l'irradiation du rayonnement solaire sur l'enveloppe de bâtiment. Pour mieux comprendre le comportement thermique d'un composant de construction il faut distinguer deux régimes thermiques pour les études thermiques de bâtiment : le régime thermique permanent (stationnaire ou statique) et le régime thermique dynamique (variable ou instationnaire). En régime thermique permanent, on considère que la température (ou le flux thermique) en un point d'une paroi ou d'un local est indépendante du temps et donc indépendante des variations climatiques ou des variations des caractéristiques de l'ambiance intérieure. Par

contre tant que les températures (ou les flux thermiques) varient en fonction du temps, cela signifie que l'équilibre thermique n'est pas atteint, le régime est qualifié de dynamique (ou instationnaire) : En effet les variations climatiques, l'inertie thermique du bâtiment, la ventilation naturelle des bâtiments, la climatisation des bâtiments etc. sont des éléments qui influencent le régime thermique. Le calcul des déperditions thermiques se fait toujours en régime permanent des températures et des flux thermiques : au sein d'une paroi le flux thermique se déplace toujours dans le même sens. Dans ces conditions une approche statique (au travers de la résistance thermique) est suffisante pour évaluer le comportement thermique de la paroi, c'est le cas couramment utilisé qui convient pour l'étude du confort thermique d'hiver (la thermique d'hiver) où la température extérieure est toujours plus faible que la température intérieure de confort, les variations de température sur un cycle de 24 heures sont assez faibles. Alors qu'en réalité une paroi de bâtiment est toujours soumise à des variations de températures journalières ou saisonnières selon un régime périodique (ou harmonique). C'est le cas que nous rencontrons en été où le corps humain tolère une température de « confort » plus élevée qu'en hiver mais dans certaines limites ! En été la température extérieure est supérieure à la température de confort pendant la journée et inférieure pendant la nuit, les variations de température sur 24 heures sont plus importantes qu'en hiver. C'est ainsi qu'au sein d'une paroi le flux thermique peut changer de direction, extérieur vers l'intérieur le jour et intérieur vers l'extérieur la nuit.

La notion de résistance thermique sera peu pertinente, une approche dynamique est indispensable pour évaluer le comportement d'une paroi. Le régime permanent idéal n'existe pas, sous l'effet de sollicitations thermiques il y aura toujours plus ou moins de variation de la température en fonction du temps et en particulier pour les parois enveloppe de bâtiment. Un bâtiment n'est donc jamais en régime permanent, il est donc soumis au régime thermique dynamique ou variable. Cela doit être pris en compte par les concepteurs (architectes, ingénieurs etc.) des enveloppes de bâtiment, en particulier en zone tropicale afin d'offrir des enveloppes performantes sur le plan énergétique. Les méthodes de résolutions de l'équation de chaleur en régime dynamique (ou instationnaire) sont nombreuses mais la plus simple et la plus facile est la réponse à une sollicitation périodique ou harmonique par une approximation sinusoïdale de la variation de température. Ces dernières années, nous assistons à une réalisation multiple de projets de bâtiments civils (bâtiments publics et bâtiments à usage d'habitation) au Mali en particulier dans le district de Bamako, qui sont malheureusement soumis à une exigence réglementaire sur le plan thermique. Les paramètres de la conception sont d'ordre fonctionnel et architectural et la dimension énergétique du projet n'est pas toujours considérée significative, ce qui conduit à des bâtiments non confortables et énergivores car le confort ne peut être assuré que par le recours à la

climatisation occasionnant également des dépenses importantes en électricité. La cause de cet inconfort thermique dans ces dits bâtiments est la non prise en compte du comportement thermique dynamique de leur enveloppe depuis la phase de la conception architecturale et technique. C'est dans un souci de rationaliser le recours à des énergies coûteuses, de concevoir des bâtiments plus confortables, d'amener les différents acteurs du processus de conception et de gestion des bâtiments à chercher à connaître et à maîtriser le comportement thermique et enfin de procurer un document qui peut servir de référence aux concepteurs d'enveloppes de bâtiments que nous avons décidé de faire cet article intitulé « Etude du transfert thermique à travers les parois enveloppes de bâtiments : principes et calculs ». Les objectifs que nous visons dans cette étude sont les suivants :

- Comprendre le mécanisme du transfert thermique à travers une paroi enveloppe de bâtiment soumise aux sollicitations des températures extérieures.
- Maîtriser les grandeurs caractérisant le transfert thermique en régime dynamique.
- savoir mener une étude technique de l'enveloppe soumise au régime thermique dynamique assurant une bonne isolation thermique de l'enveloppe.

II - MÉTHODOLOGIE

Le travail consiste à montrer le mécanisme de la transmission de la chaleur à travers une paroi enveloppe de bâtiment soumise à des sollicitations des températures extérieures, à exprimer les grandeurs caractéristiques du régime thermique dynamique, à faire une étude technique assurant une bonne isolation thermique de l'enveloppe soumise au régime dynamique, de choisir et déterminer l'épaisseur de la couche d'isolation nécessaire afin de garantir l'efficacité énergétique de la paroi enveloppe en cas de défaillance après l'étude technique.

II-1. Mécanisme du transfert thermique à travers une paroi enveloppe soumise à des sollicitations de températures extérieures

Elle correspond à la situation que l'on rencontre couramment dans les régions tropicales et en particulier au Mali, où la température de l'air extérieur et l'ensoleillement en été ont une variation quasi-périodique dans le temps, de sorte qu'une paroi se trouve soumise à un flux de chaleur périodique. Etudions le phénomène à travers un mur plan (paroi verticale ou horizontale) dont les dimensions transversales sont très grandes par rapport à leur épaisseur : le principe général des transferts thermiques est que la chaleur se transmet toujours du milieu chaud vers le milieu froid. En effet en été, les températures

extérieures sont plus élevées que les températures intérieures du local, cette différence de température entrainera automatiquement un transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment causant une sensation d'inconfort thermique si la paroi n'a pas reçu une conception adéquate. C'est donc l'enveloppe du bâtiment qui doit permettre d'éviter ce transfert thermique. Comme dans le cas du processus de transfert thermique en régime stationnaire, ce transfert se fera suivant trois étapes bien distinctes : absorption thermique, conduction thermique et diffusion thermique.

II-1-1. Étape d'absorption thermique par la surface extérieure de l'enveloppe

La face extérieure de la paroi enveloppe absorbe la chaleur provenant de l'ambiance extérieure plus chaude. Cette phase d'absorption thermique se fait de deux manières :

- Par convection entre l'enveloppe extérieure et l'air, c'est ainsi que le flux de chaleur échangé par convection sera :

$$q_{ec} = \alpha_{ec} (T_{sa} - \theta_e) \quad (1)$$

- Par rayonnement entre la surface et les autres surfaces de la paroi enveloppe, ainsi le flux de chaleur échangé par rayonnement sera :

$$q_{er} = \alpha_{er} (T_{sa} - \theta_e) \quad (2)$$

Selon la loi de Newton la densité totale de flux absorbée par l'enveloppe extérieure sera :

$$q_e = q_{ec} + q_{er} = \alpha_{ec} (T_{sa} - \theta_e) + \alpha_{er} (T_{sa} - \theta_e) = (\alpha_{ec} + \alpha_{er})(T_{sa} - \theta_e) = \alpha_e (T_{sa} - \theta_e) \quad (3)$$

$$q_e = \frac{T_{sa} - \theta_e}{Re}$$

II-1-2. Étape de conduction thermique dans l'enveloppe

Il y a conduction de la chaleur reçue dans la masse de l'enveloppe. Selon la loi de Fourier la densité de flux de chaleur échangée par conduction dans la masse de l'enveloppe sera :

$$q = \frac{T_{sa} - \theta_i}{R} \quad (4)$$

II-1-3. Étape de diffusion thermique par la surface intérieure de l'enveloppe

La face intérieure de l'enveloppe diffuse la chaleur reçue dans l'ambiance intérieure. Comme dans l'étape d'absorption thermique ici également il y aura

échange de chaleur par convection et par rayonnement au sein de la face intérieure de l'enveloppe, en appliquant la loi de Newton la densité totale de flux de chaleur diffusée dans l'ambiance sera :

$$q_i = \alpha_i (\theta_i - t_i) = \frac{\theta_i - t_i}{R_i} \quad (5)$$

En conclusion la densité de flux traversant la totalité de l'enveloppe sera :

$$q = \frac{T_{sa} - t_i}{R_t} \quad (6)$$

avec, T_{sa} = température fictive équivalente au rayonnement solaire et à la température de l'air extérieur. C'est donc le transfert de ce flux de chaleur que la paroi enveloppe doit être susceptible d'empêcher afin d'assurer le confort thermique. C'est là le cas le plus général du transfert thermique, voyons maintenant le cas d'une paroi soumise à une sollicitation de température périodique.

II-2. Comportement thermique d'une paroi soumise à un régime harmonique

II-2-1. Généralités

Les caractéristiques thermiques dynamiques d'un composant (mur, toiture) de bâtiment décrivent son comportement thermique à des conditions aux limites variables, à savoir flux thermique variable ou température variable sur l'une de ses faces (bâtiment climatisé) ou sur les deux faces (bâtiment sous ventilation naturelle) qui sont d'ailleurs les plus courants. Les conditions aux limites harmoniques sont les seules considérées dans cette étude : les faces du composant supposées soumises à des températures ou des flux thermiques variant de façon sinusoïdale. La paroi est donc soumise à un phénomène périodique. Elle correspond à la situation que l'on rencontre en été où la température de l'air extérieur et l'ensoleillement ont une variation périodique dans le temps (de 24 heures) de sorte qu'une paroi se trouve soumise à un flux de chaleur périodique. Il est alors possible de prendre en compte simultanément la température de l'air et le rayonnement solaire en faisant intervenir une température fictive de calcul appelée température équivalente au soleil et à l'air représentée par T_{sa} et qui varie donc en fonction du temps. Le problème se ramène donc à l'étude d'une sollicitation sinusoïdale pure appelée « harmonique ». La loi de Fourier nous apprend que toute fonction périodique peut être représentée par une fonction sinusoïdale de forme $A_t \cos(\omega.t + \varphi)$, l'onde thermique ne fera donc pas exception. On considère une paroi monocouche de paramètres thermiques physiques constants soumise à des sollicitations sinusoïdales. C'est ainsi que nous pouvons représenter

L'Équation de toute température instantanée par :

$$T_{\tau} = T_{\text{moy}} + A_t \cos \left(\frac{360\tau}{T} + \varphi \right) \quad (7)$$

avec, A_t = amplitude de l'onde thermique, T = période de l'oscillation thermique ($T = 24$ heures ou $T = 24 \cdot 3600$ s), τ = temps d'écoulement de la sollicitation thermique (en seconde), φ = phase du signal en un point (en degré Celsius), T_{moy} = température moyenne en un point de la paroi

$$T_{\text{max}} = T_{\text{moy}} + A_t \quad (8)$$

son temps d'apparition sera

$$\tau_{\text{tmax}} = \varphi \cdot \frac{T}{2\pi}, \quad T_{\text{min}} = T_{\text{moy}} - A_t \quad (9)$$

son temps d'apparition sera $\tau_{\text{tmin}} = \varphi \cdot \frac{T}{2\pi} + n$. Les sollicitations thermiques que subit une paroi enveloppe de bâtiment ont le plus souvent un caractère périodique.

On remarquera qu'un bâtiment n'est jamais en régime permanent (ou stationnaire) car la température extérieure est variable, le rayonnement solaire est périodique (selon l'orientation des parois), l'occupation et la ventilation doivent également être pris en compte dans son comportement thermique. Le bâtiment est donc soumis au régime thermique dynamique (ou variable). Dans la réalité tout bâtiment a un comportement thermique dynamique principalement dû aux variations climatiques extérieures (température, rayonnement solaire, vent), aux régimes d'occupation intérieures (température de consigne) au comportement des occupants (ventilation, apports internes), à l'installation de chauffage ou de climatisation. C'est donc la situation que l'on rencontre quand le bâtiment est climatisé (cas d'une paroi semi-infini) : dans ce cas la température intérieure de la paroi est maintenue constante et la température de l'ambiance extérieure varie périodiquement, elle sera représentée par une fonction sinusoïdale du temps :

$$T_e = T_{\text{emoy}} + A_{te} \cos (w \cdot \tau + \varphi_{te}) \quad (10)$$

Sous la sollicitation sinusoïdale de la température extérieure la paroi présentera les caractéristiques thermiques suivantes :

(1) les températures de l'ambiance extérieure (T_e), de la surface extérieure de la paroi (θ_e), de n'importe quelle surface dans la masse de la paroi (θ_x), varient avec la même période T : $T_e = T_{\text{emoy}} + A_{te} \cos (w \cdot \tau + \varphi_{te})$, $\varphi_{te} = w \cdot \tau_{\text{temax}}$, $\theta_e = \theta_{\text{moy}} + A_{\theta e} \cos (w \cdot \tau + \varphi_{\theta e})$, $\varphi_{\theta e} = w \cdot \tau_{\theta \text{emax}}$, $\theta_x = \theta_{x\text{moy}} + A_{\theta x} \cos (w \cdot \tau + \varphi_{\theta x})$,

$$\varphi_{\theta e} = w^* \tau_{\theta_{x\max}} .$$

(2) réduction graduelle des amplitudes en partant de l'extérieur vers l'intérieur, c'est-à-dire $A_{te} > A_{\theta e} > A_{\theta x} > A_{\theta i}$ c'est-à-dire que $\varphi_e < \varphi_{\theta e} < \varphi_{\theta x} < \varphi_{\theta i}$

(3) le déphasage thermique augmente progressivement de l'extérieur vers l'intérieur.

Le deuxième cas qui est le plus complexe est celui d'une paroi à épaisseur finie, c'est d'ailleurs le plus courant (cas des bâtiments sous ventilation naturelle) : les parois de bâtiment ont le plus souvent une épaisseur finie très faible devant les autres dimensions de la paroi, dans ce cas le modèle du mur semi-infini n'est plus applicable. Cependant les températures et les flux sur les deux faces varient périodiquement, l'étude concernera alors le comportement thermique au travers des deux faces. Ainsi $T_e = T_{emoy} + A_{te} \cos(w^* \tau + \varphi_{te})$ ou $T_{sa} = T_{samoy} + A_{tsa} \cos(w^* \tau + \varphi_{tsa})$ avec $\varphi_{tsa} = w^* \tau_{tsamax}$, $T_i = T_{imoy} + A_{ti} \cos(w^* \tau + \varphi_{ti})$ avec $\varphi_{ti} = w^* \tau_{timax}$.

Les caractéristiques d'amortissement et de déphasage thermique doivent être soigneusement étudiées

II-2-2. Études des grandeurs caractéristiques du régime thermique dynamique

Dans l'étude thermique d'une enveloppe en régime stationnaire, le flux de chaleur transmise au travers de l'enveloppe et la température de surface de l'enveloppe dépendent du coefficient de transmission de chaleur λ et de la résistance thermique R de l'enveloppe, par contre dans l'étude thermique en régime thermique dynamique en plus de ces grandeurs thermiques, d'autres grandeurs auront une grande influence sur le comportement thermique de l'enveloppe. Les principaux paramètres dynamiques qui influencent le comportement thermique de l'enveloppe et dont il faudra tenir compte lors de la conception de l'enveloppe sont les suivants :

II-2-2-1. Le coefficient d'accumulation de chaleur périodique des matériaux (Sp)

Il se définit par le rapport entre l'amplitude du flux thermique par l'amplitude de la température de surface de la paroi pour un mur semi-infini soumis à des sollicitations de températures périodiques et selon les principes du transfert thermique se calcule par la **Formule** suivante :

$$Sp = \frac{Aq}{A\theta} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda\rho c}{T}} \quad (11)$$

Avec, Sp = coefficient d'accumulation de chaleur périodique du matériau

($w/m^2 \cdot ^\circ C$), A_q = amplitude du flux thermique ($^\circ C$), A_θ = amplitude de la température de surface de la paroi ($^\circ C$), λ = coefficient de conductivité thermique du matériau constituant la paroi ($w / m^\circ C$), ρ = masse volumique du matériau (Kg/m^3), c = chaleur spécifique ou chaleur massique du matériau ($J/Kg \cdot ^\circ C$), T = période de l'oscillation thermique ($T=24$ heures ou $T=24 \cdot 3600$ seconde). Pour $T = 24h$, $S_{24} = 0.51 \sqrt{\lambda \rho c}$ et pour $T = 12h$, $S_{12} = 0.72 \sqrt{\lambda \rho c}$. Pour une lame d'air $S = 0$. On remarque que la valeur de S_p dépend des paramètres physiques : λ , ρ , c et de T . Pour un élément composite on calculera sa valeur moyenne qui sera défini par la **Formule** suivante :

$$S_{moy} = \frac{S1 \cdot F1 + S2 \cdot F2 + \dots + Sn \cdot Fn}{F1 + F2 + \dots + Fn}$$

avec, $S1, S2 \dots Sn$ = coefficients d'accumulation des matériaux 1, 2...n et $F1, F2 \dots Fn$ = surfaces des parois 1, 2...n.

II-2-2-2. L'inertie thermique (D)

L'inertie thermique ou capacité thermique définit la quantité de chaleur qu'un matériau peut emmagasiner par rapport à son volume. La notion d'inertie n'est pas facile à appréhender. L'inertie ne se manifeste qu'en régime dynamique. La plupart du temps elle est définie comme étant la vitesse avec laquelle le bâtiment réagit à des perturbations extérieures. Autrement dit c'est la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer au moment opportun. L'inertie thermique d'une paroi permet de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée, en décalage avec les variations thermiques extérieures et intérieures du bâtiment. Ce sont généralement les matériaux lourds qui possèdent la plus forte inertie thermique. Il est donc évident que la capacité de stocker la chaleur en régime thermique dynamique est meilleure pour les matériaux lourds. L'inertie thermique représentée par la lettre D, se calcule par la **Formule** suivante :

$$D = R \cdot S_p \quad (12)$$

pour une paroi monocouche ou

$$D = \sum R \cdot S_p \quad (13)$$

La vitesse de stockage ou de déstockage (décalage) de la chaleur est déterminée par les propriétés de diffusivité et d'effusivité thermique d'un matériau. Ce sont donc les deux grandeurs caractéristiques de l'inertie thermique :

- *La diffusivité thermique (Df)* : cette grandeur détermine la vitesse à laquelle un matériau est susceptible de transmettre la chaleur d'une face à l'autre d'une même paroi en régime de température variable. La diffusivité thermique est une grandeur caractéristique importante des échanges thermiques en régime

périodique. Elle est calculée par la **Formule** :

$$Df = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (14)$$

avec, Df = diffusivité thermique du matériau (m^2/s ou m^2/h), λ = coefficient de conductivité thermique ($w/m.^{\circ}C$), ρ = masse volumique du matériau (Kg/m^3), c = chaleur spécifique ou chaleur massique du matériau ($J/Kg.^{\circ}C$). Relation en Df et Sp : $S_{24} = 0.51 * \frac{\lambda}{\sqrt{Df}}$ Plus Df est élevé plus la vitesse de variation de la température à l'intérieur d'une paroi est rapide, plus l'onde de chaleur mettra du temps pour atteindre l'intérieur de la maison.

Valeurs courantes de diffusivité thermique de quelques matériaux : Granit ($3.9 m^2/s$), Marbre ($4.5 m^2/s$), Grès dur ($3.2 m^2/s$), Brique de terre cuite pleine ($2.2 m^2/s$), Béton moyen ($2.3 m^2/s$), Béton haute densité ($3 m^2/s$). Les matériaux à faible diffusivité thermique doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique avec une forte densité et une chaleur spécifique importante. Généralement ce sont les matériaux isolants qui sont les matériaux les moins diffusifs. L'inertie thermique est liée à la masse théorique des matériaux, la pierre par exemple est plus difficile à monter en température que le métal, mais une fois chauffée, elle mettra plus de temps à se refroidir. Ce phénomène est très intéressant dans l'habitat :

* Les murs épais et massifs permettent de réguler la température, suivant un cycle de 24 heures mais aussi à l'échelle des saisons et de vivre toute l'année dans une ambiance thermique confortable et relativement constante (de la même manière que dans une cave, la température intérieure ne varie pas).
* En plaçant des matériaux lourds à l'intérieur d'une pièce (mur avec isolation extérieur, sols, cloisons etc.) il sera possible de stocker de la chaleur le jour (mur arrosé par le soleil, derrière une baie vitrée par exemple) pour la restituer tout au long de la nuit.

▪ *L'effusivité thermique (Ef)* : cette grandeur détermine la capacité d'un matériau à stocker ou déstocker rapidement une grande quantité de l'énergie thermique en régime de température variable. Elle caractérise donc la vitesse à laquelle la température de surface d'un matériau à absorber ou restituer de la chaleur. L'effusivité thermique est calculée par la **Formule** :

$$Ef = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (15)$$

Plus Ef est élevé plus les parois vont pouvoir stocker de la chaleur avant de changer de température, plus la température varie vite, plus le matériau en

surface se réchauffe. A l'inverse plus E_f est faible, plus le matériau reste toujours stable même dans une pièce trop chaude ou froide. L'inertie par absorption d'un matériau est d'autant plus efficace que son effusivité et que sa surface sont importantes. L'épaisseur minimale des matériaux varie en fonction de la durée d'efficacité recherchée. Dans le cas de constructions maçonnées traditionnelles les épaisseurs nécessaires à l'assurance du confort au quotidien sont de l'ordre de 10 cm par face exposée. Les matériaux à forte effusivité doivent avoir un λ , ρ , c maximum. Ce sont les matériaux massifs qui sont les matériaux les plus effusifs.

Quelques valeurs d'effusivité thermique de quelques matériaux : Acier (14000), Maçonnerie (2000), Bois (350), Plastiques alvéolaires (30), Peau (400). NB : D_f et E_f sont des paramètres spécifiques aux régimes dynamiques.

II-2-2-3. Les admittances thermiques ($Y_{m,e}$ et $Y_{m,i}$)

Nous avons définis le coefficient d'accumulation de chaleur périodique S_p pour un mur à épaisseur semi-infinie, or dans la pratique les parois sont constituées dans la plupart des cas par des murs plans ayant une épaisseur finie, c'est pourquoi dans le cas des parois soumises à des sollicitations thermiques périodiques, l'onde d'oscillation en surface dépendra non seulement des capacités thermiques propres au matériau mais aussi des conditions aux limites variables à savoir flux thermique variable ou température variable sur l'une de ses faces ou sur les deux faces. C'est alors qu'il faut définir une grandeur qui prendra en compte ces deux conditions, pour cela on utilise la méthode des admittances thermiques. Cette méthode a été développée en Grande Bretagne dans les années 70. Elle sert à caractériser l'inertie thermique d'un bâtiment en considérant la réponse thermique à des sollicitations harmoniques (périodiques). L'admittance thermique mesure la capacité d'un élément de bâtiment à stocker et restituer l'énergie sur un cycle journalier et peut être définie comme le rapport de la variation de flux sur la variation de température durant une période de 24 heures. Autrement dit c'est le rapport entre l'amplitude du flux thermique et l'amplitude de la température de surface de la paroi :

$$Y = \frac{Aq}{A\theta} = \frac{\text{amplitude du flux thermique}}{\text{amplitude de la température de surface de la paroi}} \quad (16)$$

C'est donc la quantité de chaleur stockée ou restituée par une paroi de 1m^2 de surface par unité de temps pour une élévation ou diminution de température de 1°C pendant un transfert de chaleur en régime périodique. On remarquera que S_p et Y se définissent de la même manière mais ce calcul de manière différente. Dans la norme internationale les conditions aux limites harmoniques sont les seules considérées : les faces du composant sont supposées soumises à des températures ou des flux thermiques variant de façon

sinusoïdale. L'admittance thermique relie le flux thermique aux variations de température du côté du composant.

Méthode de calcul des admittances thermiques : il y a donc deux admittances thermiques à évaluer :

- Calcul de l'admittance thermique des couches extérieures de l'enveloppe ($Y_{m,e}$) : c'est la condition où l'onde thermique se dirige de l'extérieure vers l'intérieur, on aura successivement les admittances thermiques $Y_{m,e}$ ($m=1,2,\dots,n$), le sens de calcul est le sens contraire de la direction du flux de l'onde thermique, le calcul commencera alors de la couche 1 (intérieur) à la couche n (extérieur).

* calcul de l'admittance de la première couche de matériau :

$$\begin{aligned} \text{si } D \geq 1.0 & \quad Y_{1,e} = S_1 \\ \text{si } D < 1.0 & \quad Y_{1,e} = \frac{R_1 * S_1 * S_1 + \alpha_i}{1 + R_1 * \alpha_i} \end{aligned}$$

* A partir de la deuxième couche l'admittance de n'importe quelle couche sera :

$$\begin{aligned} \text{si } D_m \geq 1.0 & \quad Y_{m,e} = S_m \\ \text{si } D_m < 1.0 & \quad Y_{m,e} = \frac{R_m * S_m * S_m + Y_{m-1,e}}{1 + R_m * Y_{m-1,e}} \text{ avec } m=2,3,4,\dots,n \end{aligned}$$

* l'admittance de la couche la plus externe qui est égale à l'admittance de la face extérieure sera : $Y_{n,e} = Y_{ef}$

- Calcul de l'admittance thermique des couches intérieures de l'enveloppe ($Y_{m,i}$) : c'est la condition où l'onde thermique se dirige de l'intérieure vers l'extérieure, on aura successivement les admittances thermiques $Y_{m,i}$ ($m=1,2,\dots,n-1$), le sens de calcul est le sens contraire de la direction du flux de l'onde thermique.

* calcul de l'admittance de la première couche :

$$\begin{aligned} \text{si } D_n \geq 1.0 & \quad Y_{n,i} = S_n \\ \text{si } D_n < 1.0 & \quad Y_{n,i} = \frac{R_n * S_n * S_n + \alpha_e}{1 + R_n * \alpha_e} \end{aligned}$$

* Pour les autres couches on déterminera les admittances de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{si } D_m \geq 1.0 & \quad Y_{m,i} = S_m \\ \text{si } D_m < 1.0 & \quad Y_{m,i} = \frac{R_m * S_m * S_m + Y_{m+1,i}}{1 + R_m * Y_{m+1,i}} \text{ avec } m=1,2,3,\dots,n-1 \end{aligned}$$

* pour la couche la plus interne on aura pour admittance : $Y_{1,i} = Y_{if}$
NB : le calcul de l'admittance thermique permet la détermination des facteurs d'amortissement et de déphasage thermique de la paroi enveloppe. Dès que

$D_n \geq 1,0$ on commencera le calcul à partir de cette couche jusqu'à la couche la plus interne en négligeant les couches précédentes.

II-2-2-4. *Le facteur d'amortissement thermique de l'enveloppe (A ou ψ) et de déphasage thermique (ϕ ou ξ)*

Durant les mois d'été, les bâtiments sont soumis aux heures chaudes de la journée à des températures extérieures relativement importantes dues aux radiations solaires. Ces hausses de température extérieure peuvent mener à des hausses de température désagréables pour les occupants du bâtiment. Un bon amortissement thermique des parois enveloppe (murs, toiture) ainsi qu'un déphasage thermique important vont permettre de diminuer, à l'intérieur d'une construction, l'influence de la hausse de température extérieure. Les deux paramètres les mieux adaptés pour décrire le fonctionnement réel d'une paroi en été sont le déphasage thermique et l'atténuation de l'onde de chaleur (aussi appelé affaiblissement ou amortissement thermique).

II-2-2-4-1. *Le facteur d'amortissement thermique*

Il exprime la relation entre la fluctuation maximale de la température extérieure et intérieure. Plus l'amortissement thermique est élevé, meilleur est le confort thermique car les variations de la température extérieure se ressentent moins à l'intérieur. Le calcul de l'amortissement thermique est très complexe nous nous attardons pas sur la méthode de calcul, mais nous utiliserons les méthodes simplifiées de certains scientifiques, telles que la méthode analytique du physicien Russe A. M. Kdover qui se présente comme suit :

$$A_o = A_1 * A_2 * \dots * A_n * A_{ef} = 0.9 * e^{\frac{\sum D}{\sqrt{2}}} * \frac{S_1 + \alpha i}{S_1 + Y_{1,e}} * \frac{S_2 + Y_{1,e}}{S_2 + Y_{2,e}} \dots * \frac{S_n + Y_{n-1,e}}{S_n + Y_{n,e}} * \frac{\alpha e + Y_{n,e}}{\alpha e} \tag{17}$$

avec, e = fonction exponentielle = 2.71828, c'est l'amortissement de l'onde thermique de l'extérieur à l'intérieur de l'enveloppe. Pour ce calcul la numérotation des couches se fait de l'intérieur vers l'extérieur. $\sum D = D_1 + D_2 + \dots + D_n$ = somme des inerties thermiques des couches de matériau. On remarquera que plus D et S_p sont importants plus l'amortissement est important. On peut également utiliser

$$A_o = \frac{A\theta_i}{A\theta_e} \tag{18}$$

avec $A\theta_e = \theta_{max} - \theta_{min}$ ou par

$$A_o = \exp\left(-d * \sqrt{\frac{\pi}{D_f * T}}\right), \tag{19}$$

avec, d = épaisseur de la paroi (m) ou par la **Formule** simplifiée des scientifiques chinois qui se présente comme suit :

$$A_o = e^{0.71 \Sigma D} (0.5 + 2.7 \left(\frac{Re}{6A} + A + Re \right)) \quad (20)$$

$$\text{avec } A = \frac{\Sigma S^R}{\Sigma R}$$

Tableau 1 : *Donnant les valeurs de $0.71 \Sigma D$ et $DE e^{0.71 \Sigma D}$*

$0.71 \Sigma D$	$e^{0.71 \Sigma D}$	$0.71 \Sigma D$	$e^{0.71 \Sigma D}$	$0.71 \Sigma D$	$e^{0.71 \Sigma D}$	$0.71 \Sigma D$	$e^{0.71 \Sigma D}$
0.1	1.105	0.80	2.226	1.60	4.953	2.60	13.464
0.2	1.221	0.85	2.340	1.70	5.474	2.70	14.880
0.3	1.350	0.90	2.460	1.80	6.050	2.80	16.447
0.4	1.492	0.95	2.586	1.90	6.680	2.90	18.174
0.5	1.649	1.00	2.718	2.00	7.889	3.00	20.086
0.55	1.733	1.11	3.004	2.10	8.166	3.20	24.533
0.60	1.882	1.20	3.320	2.20	9.025	3.40	29.964
0.65	1.916	1.30	3.669	2.30	9.974	3.60	36.598
0.70	2.014	1.40	4.055	2.40	11.023	3.80	44.701
0.75	2.117	1.50	4.482	2.50	12.182	4.00	54.598

L'amortissement thermique de l'intérieur vers l'extérieur se détermine par la **Formule** suivante :

$$A_i = 0.95 * \frac{\alpha_i + \gamma_{if}}{\alpha_i} \quad (21)$$

II-2-2-4-2. Le déphasage thermique

Il indique l'intervalle de temps entre le moment où la température à l'extérieure atteint son maximum et le moment où la température à l'intérieur du bâtiment atteint son maximum. C'est la durée de passage de l'onde de chaleur (ou de froid) à travers une paroi extérieure, entre le moment de son absorption sur la face extérieure et l'instant de sa restitution par la face interne. Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à retarder les variations de température. C'est donc le temps que met cette onde thermique à traverser la paroi. Plus le déphasage est élevé, meilleur est le confort thermique car les variations de température extérieure se ressentent beaucoup moins rapidement à l'intérieur. L'idéal est d'avoir un déphasage compris entre 9 et 12 h, ce qui permet une diffusion régulière de la chaleur sur la journée et d'atténuer les pics de chaleur en été. Sa prise en considération permet souvent d'éviter l'utilisation de la climatisation qui est énergivore et couteuse. En thermique du bâtiment on a

coutume de représenter le déphasage thermique par les **Formules** suivantes :

$$\phi = \frac{T^*\phi}{360} = \frac{1}{15} (40.5*\sum D + \arctg \frac{Yef}{Yef+ae*\sqrt{2}} - \arctg \frac{\alpha i}{\alpha i+Yif*\sqrt{2}}) \tag{22}$$

ou par

$$\phi = 2.7*\sum D - 0.4 \text{ [7]}; \text{ou par } \phi = 1.38*d*\sqrt{\frac{1}{Df}} = 1.38 * d * \sqrt{\frac{\rho c}{\lambda}} \tag{23}$$

$$\text{ou par } \phi = \tau_{\theta i\max} - \tau_{ts\max} \tag{24}$$

différence entre temps d'apparition de la température maximale de la face intérieur et le temps d'apparition de la température résultante du rayonnement solaire et de la température extérieur. C'est donc par cette méthode qu'on calcule le décalage horaire de l'extérieur vers l'intérieur, dans le sens contraire on calcule

$$\phi_i = \frac{1}{15} \arctg \frac{Yif}{Yif+\alpha i*\sqrt{2}} \tag{25}$$

Le déphasage est exprimé en heure (h), d = épaisseur de la paroi (m).

Tableau 2 : Relation entre l'inertie thermique et le déphasage

Paroi enveloppe	$\sum D$ =somme des inerties	Déphasage(h)	Temps d'apparition de la température maximale de la face intérieure
Toiture	0.9	2	15 h
Toiture	1.7	4	17 h
Toiture	2.4	6	19 h
Toiture	3.0	8	21 h
Toiture	3.8	10	23 h
Mur	0.9	2	17 h 30 mn
Mur	1.7	4	19 h 30 mn
Mur	2.4	6	21 h 30 mn
Mur	3.0	8	23 h 30 mn
Mur	3.8	10	1 h 30 mn

NB : les valeurs de A0 et de ϕ dépendent de l'ordre des matériaux constitués de couches multiples : l'ordre des couches a de l'importance sur le comportement dynamique d'un élément de construction : un élément dont la masse est à l'intérieur et isolé extérieurement atténuera fortement les variations de température et e flux provenant de l'extérieur et présentera une grande capacité de stockage vis-à-vis de l'intérieur. Le même élément retourné par rapport aux climats (isolation intérieure et masse à l'extérieur) présentera

toujours un certain déphasage, mais l'atténuation sera plus faible et la capacité thermique interne plus basse.

Tableau 3 : Valeurs des amortissement et déphasage thermique

Elément de construction	Composition de la paroi	Epaisseur(cm)	Amortissement (A)	Déphasage (φ)
Toiture	*Laine minérale (extérieur) *Béton	4 10	0.046	11h50mn
Toiture	*Béton *Laine minérale (intérieur)	10 4	0.45	3h00mn
Mur	*Enduit extérieur *Béton *Lame d'air *Béton *Enduit intérieur	1.5 10 - 10 1.5	0.073	10h00mn
Mur	*Enduit extérieur *Brique creuse de béton *Lame d'air *Bloc creux de béton *Enduit intérieur	1.5 10 - 10 1.5	0.056	10h50mn
Mur	*Enduit extérieur *Brique creuse *Lame d'air *Brique creuse *Enduit intérieur	1.5 10 - 10 1.5	0.10	8h45mn
Mur	*Béton *Lame d'air *Béton	15 - 15	0.073	10h00mn

II-2-3. Étude technique assurant l'isolation thermique de l'enveloppe

II-2-3-1. Détermination de la température résultante du rayonnement solaire et de la température extérieure

Pour mieux appréhender l'isolation thermique d'une enveloppe de bâtiment en été, il faut tout d'abord examiner l'effet de l'influence du climat extérieur sur l'enveloppe du bâtiment. Examinons alors l'influence de la température de l'air extérieur et de la radiation solaire sur une enveloppe (verticale ou horizontale) : soit $q_1 = I \cdot \rho_s$ la densité de flux occasionnée par la radiation solaire et $q_2 = \alpha_e (T_e - \theta_e)$ la densité de flux occasionnée par la température extérieure, le flux

total transmis par la paroi sera

$$q = q_1 + q_2 = I^* \rho_s + a_e (T_e - \theta_e) = a_e \left(\frac{I^* \rho_s}{a_e} + T_e - \theta_e \right) = a_e (T_{sa} - \theta_e),$$

$$\text{avec, } T_{sa} = T_e + \frac{I^* \rho_s}{a_e} \quad (26)$$

Température fictive équivalente au rayonnement solaire et à la température extérieure et

$$T_s = \frac{I^* \rho_s}{a_e} \quad (27)$$

Température équivalente au soleil, I = intensité du rayonnement solaire (w/m²), ρ_s = coefficient d'absorption solaire.

Cette température résultante à l'action simultanée de la température extérieure et du rayonnement solaire varie de façon périodique c'est pourquoi dans l'étude de l'isolation thermique de l'enveloppe il sera indispensable de calculer sa valeur maximale (T_{smax}) :

$$T_{smax} = T_{samoy} + A_{tsa} \quad (28)$$

avec, T_{samoy} = température moyenne de T_{sa} et A_{tsa} = amplitude de T_{sa} ;

$$T_{samoy} = T_{emoy} + \frac{I_{moy} * \rho_s}{a_e} \quad (29)$$

$$\text{et } A_{tsa} = (A_{te} + A_{ts}) * \beta \quad (30)$$

$$\text{avec, } A_{te} = T_{emax} - T_{emoy} \quad (31)$$

$$\text{et } A_{ts} = \left(\frac{I_{max} - I_{moy}}{a_e} \right) * \beta \quad (32)$$

avec β = coefficient de réduction de l'amplitude (ou facteur de correction), puisque T_{emax} et I_{max} n'apparaissent pas au même moment l'amplitude de la température résultante de leur action simultanée sera corrigée par un facteur de réduction β qui se déterminera en fonction du rapport A_{ts}/A_{te} et du taux Δτ = τ_{temax} - τ_{Imax} ou Δτ = τ_{Imax} - τ_{temax}

Tableau 4 : Valeurs de β

$\frac{A_{ts}}{A_{te}}$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$	$\Delta\tau$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.0	0.98	0.97	0.92	0.87	0.79	0.71	0.60	0.50	0.38	0.26
1.5	0.99	0.97	0.93	0.87	0.80	0.72	0.63	0.58	0.42	0.32
2.0	0.99	0.97	0.93	0.88	0.81	0.74	0.66	0.58	0.49	0.41
2.5	0.99	0.97	0.94	0.89	0.83	0.76	0.69	0.62	0.55	0.49
3.0	0.99	0.97	0.94	0.90	0.85	0.79	0.72	0.65	0.60	0.55
3.5	0.99	0.97	0.94	0.91	0.86	0.81	0.76	0.69	0.64	0.59
4.0	0.99	0.97	0.94	0.91	0.87	0.82	0.77	0.72	0.67	0.63
4.5	0.99	0.97	0.95	0.92	0.88	0.83	0.79	0.74	0.70	0.66
5.0	0.99	0.98	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.76	0.72	0.69

ρ_s = coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la surface de matériau (dépendant des matériaux de surface de la paroi) : pour l'aluminium = 0.5 ; pour une peinture blanche = 0.20 ; pour une peinture noire = 0.90 ; pour sol nu = 0.75 ; autrement dit pour les couleurs claires = 0.20 à 0.40 ; pour les couleurs moyennes = 0.50 à 0.70 et pour les couleurs foncées = 0.70 à 0.90.

II-2-3-2. Détermination de la résistance thermique minimale (résistance admissible) de la paroi enveloppe

on utilise la **Formule** suivante :

$$R_{min} = \frac{(T_{samoy} - T_{imoy}) * R_i}{\Delta t_{sa}} \quad (33)$$

avec, $\Delta t_{sa} = \theta_{imoy} - T_{imoy}$;

$$\theta_{imoy} = T_{imoy} - \frac{(T_{samoy} - T_{imoy}) * R_i}{R_t} \quad (34)$$

ou pour simplifier le calcul on peut prendre

$$\theta_{imoy} = T_{imoy} + 2^\circ C ; T_{imoy} = T_{emoy} + 1.0.$$

$$R_t = R_i + \sum R + R_e \quad (35)$$

Somme des résistances thermiques de toutes les couches de la paroi enveloppe plus les résistances superficielles intérieure et extérieure.

II-2-3-3. Vérifications des résultats des résistances thermiques totale et minimale

si $R_t \geq R_{min}$ le comportement thermique de la paroi enveloppe est bon, mais si $R_t < R_{tmin}$ il faut alors prévoir une couche d'isolation thermique pour

améliorer son efficacité énergétique. Pour cela on déterminera l'épaisseur de la couche d'isolation par la formule suivante $d_i = \lambda_i (R_{tmin} - R_t)$, puis on recalculer R_t avec cette fois-ci la couche d'isolation pour avoir $R_t \geq R_{tmin}$.

II-2-3-4. Détermination du facteur d'amortissement de la paroi enveloppe et l'amortissement minimal de l'enveloppe puis comparer les résultats

$A_o = e^{0.71 \sum D} (0.5 + 2.7 \left(\frac{R_e}{6A} + A + R_e \right))$ avec $A = \frac{\sum R}{\sum S}$
 $A_{omin} = \frac{Atsa}{(A\theta i)}$ avec $[A\theta i] = 1.5 \text{ à } 2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ valeur admise par la réglementation thermique, si $A_o \geq A_{omin}$ le comportement thermique est bon c'est-à-dire que $A\theta i \leq [A\theta i]$ autrement dit $\theta_{imax} \leq (T_{emax})$.

II-2-3-5. Enfin calcul du déphasage thermique

$$\phi = 2.7 \sum D - 0.4$$

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. RESULTATS

▪ Examinons la situation d'une localité quelconque située dans une zone à climat tropicale avec les caractéristiques suivantes : température extérieure maximale 36.8°C (qui apparaît à 15h), température extérieure moyenne 29.8°C , l'intensité maximale de la radiation solaire $784 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ (qui apparaît à 12h), l'intensité moyenne de la radiation solaire $251 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$. Etudions le comportement thermique de la toiture (paroi horizontale) d'un bâtiment constituée des matériaux suivants :

- Une couche blanche de chaux de 2cm d'épaisseur et de $7.05 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient d'accumulation de chaleur périodique, de $0.60 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique
- Une dalle en béton armé de 7cm d'épaisseur et de $12.85 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient d'accumulation de chaleur périodique, de $1.33 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique
- Une couche de bitume de 0.5cm d'épaisseur et $11.05 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient d'accumulation de chaleur périodique, de $0.65 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique
- Une couche de mortier de ciment de 2cm d'épaisseur et de $8.65 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient d'accumulation de chaleur périodique, de $0.80 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique
- Une couche d'étanchéité de 1cm d'épaisseur et de $2.85 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient d'accumulation de chaleur périodique, de $0.15 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique.

On donne $R_i = 0.167 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$, $R_e = 0.05 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$, $\rho_s = 0.72$ et $\alpha_e = 16$

* Calcul de T_{sa} :

$$T_{sa} = T_e + T_s,$$

$$T_{smax} = T_{samoy} + \Delta T_{sa} \text{ avec}$$

$$T_{samoy} = T_{emoy} + \frac{I_{moy} \cdot \rho_s}{\alpha_e}$$

$$\Delta T_{sa} = (A_{te} + A_{ts}) \cdot \beta$$

$$T_{smoy} = \frac{I_{moy} \cdot \rho_s}{\alpha_e} = \frac{251 \cdot 0.72}{16} = 11.3^\circ\text{C}$$

$$T_{smax} = \frac{I_{max} \cdot \rho_s}{\alpha_e} = \frac{784 \cdot 0.72}{16} = 35.3^\circ\text{C}$$

$$A_{ts} = T_{smax} - T_{smoy} = 35.3 - 11.3 = 24^\circ\text{C}$$

$$A_{te} = T_{emax} - T_{emoy} = 36.8 - 29.8 = 7^\circ\text{C}$$

$$\frac{A_{ts}}{A_{te}} = \frac{24}{7} = 3.43 \quad \Delta \tau = \tau_{temax} - \tau_{Imax} = 15\text{h} - 12\text{h} = 3\text{h}, \text{ ce donne } \beta = 0.94$$

$$\Delta T_{sa} = (24+7) \cdot 0.94 = 29.14^\circ\text{C}$$

$$T_{samoy} = 29.8 + 11.3 = 41.1^\circ\text{C}$$

$$T_{smax} = 41.1 + 29.14 = 70.24^\circ\text{C}$$

* Calcul de R_t :

$$R_1 = 0.02/0.60 = 0.033 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal},$$

$$R_2 = 0.07/1.33 = 0.053 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal},$$

$$R_3 = 0.005/0.65 = 0.008 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal},$$

$$R_4 = 0.02/0.08 = 0.025 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal},$$

$$R_5 = 0.01/0.15 = 0.067 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal},$$

$$R_t = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_e = 0.167 + 0.033 + 0.053 + 0.008 + 0.025 + 0.067 + 0.05 = 0.403 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$$

* Calcul de R_{tmin} :

$$R_{tmin} = (T_{samoy} - T_{imoy}) \cdot R_i / \Delta T_{sa} \text{ avec}$$

$$\Delta T_{sa} = \theta_{imoy} - T_{imoy} = 32.8 - 30.8 = 2^\circ\text{C}$$

$$T_{imoy} = T_{emoy} + 1^\circ\text{C} = 29.8 + 1.0 = 30.8^\circ\text{C}$$

$$\theta_{imoy} = T_{imoy} + 2^\circ\text{C} = 30.8 + 2^\circ\text{C} = 32.8^\circ\text{C}$$

$$R_{tmin} = (T_{samoy} - T_{imoy}) \cdot R_i / \Delta T_{sa} = (41.1 - 30.8) \cdot 0.167 / 2 = 0.860 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$$

On remarquera que $R_{tmin} > R_t$, il faut donc prévoir une couche d'isolation thermique pour renforcer le confort car la condition était d'avoir $R_t \geq R_{tmin}$.

* Si on choisit comme couche d'isolation thermique le machefer de coefficient de conductivité thermique $0.25 \text{ kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$, calculons son épaisseur par la **Formule** :

$$D_i = \lambda_i (R_{tmin} - R_t) = 0.25 \cdot (0.86 - 0.403) = 0.114, \text{ prenons alors } d_i = 0.12\text{m},$$

donc $R_i = 0.12/0.25 = 0.480$ et $R_t = 0.403 + 0.480 = 0.883 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$.
Maintenant $R_t \geq R_{t\min}$, le comportement thermique est bon.

**Calculons les amortissements et le déphasage thermiques :*

$$A_o = e^{0.71 \sum D} (0.5 + 2.7(\text{Re}/6A + A + \text{Re}))$$

$$R_1 = 0.033 \quad S_1 = 7.05 \quad R_1/S_1 = 0.0047 \quad D_1 = R_1 * S_1 = 0.233$$

$$R_2 = 0.053 \quad S_2 = 12.85 \quad R_2/S_2 = 0.0041 \quad D_2 = 0.681$$

$$R_3 = 0.008 \quad S_3 = 11.05 \quad R_3/S_3 = 0.0007 \quad D_3 = 0.088$$

$$R_4 = 0.025 \quad S_4 = 8.65 \quad R_4/S_4 = 0.0029 \quad D_4 = 0.216$$

$$R_5 = 0.067 \quad S_5 = 2.85 \quad R_5/S_5 = 0.0235 \quad D_5 = 0.191$$

$$R_6 = 0.480 \quad S_6 = 3.40 \quad R_6/S_6 = 0.141 \quad D_6 = 1.632$$

$$\sum R = 0.033 + 0.053 + 0.008 + 0.025 + 0.067 + 0.480 = 0.666$$

$$\sum R/S = 0.0047 + 0.0041 + 0.0007 + 0.0029 + 0.0235 + 0.141 = 0.177$$

$$\sum D = 0.233 + 0.681 + 0.088 + 0.216 + 0.191 + 1.632 = 3.041$$

$$A = \sum R/S = 0.0047 + 0.0041 + 0.0007 + 0.0029 + 0.0235 / \sum R =$$

$$0.033 + 0.053 + 0.008 + 0.025 + 0.067$$

$$A = 0.177 / 0.666 = 0.266$$

$$0.71 * \sum D = 0.71 * 3.041 = 2.16$$

$$e^{2.16} = 8.67$$

$$A_o = 8.67 * (0.5 + 2.7 * (0.05/6 * 0.266 + 0.266 + 0.05)) = 12.46$$

$A_{\min} = A_{tsa}/(A\theta_i) = 29.14/2.5 = 11.7$, $A_o > A_{\min}$ le comportement thermique est bon.

Le déphasage thermique sera $\phi = 2.7 * \sum D - 0.4 = 2.7 * 3.041 - 0.4 = 8.20 - 0.4 = 7.8\text{h}$ soit 7 h 48 mn et le temps d'apparition de la température maximale de la face intérieure sera $\tau_{\theta_{i\max}} = \tau_{tsa\max} + \phi = 13\text{h} + 7.8\text{h} = 20,8\text{h}$ soit 20 h 48 mn. Ce qui explique que dans le local la température maximale du plafond apparait aux environs de 21 h (avec donc un retard de 9h de temps). Ce qui est convenable pour un bâtiment à usage de bureau, mais si on veut encore retarder ce temps, il faut augmenter l'épaisseur de la couche d'isolation.

▪ Examinons maintenant le cas d'une paroi enveloppe verticale située dans une zone à climat tropical : soit à analyser le comportement thermique d'un mur de façade (Ouest) constituée de la manière suivante :

(1). Une couche de mortier de chaux blanche de 2cm d'épaisseur, de 0.81 w/m. $^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique, de 10.07 w/m ^2C de coefficient d'accumulation de chaleur périodique

(2). Une couche de maçonnerie en brique de terre de 24cm d'épaisseur, de 0.81 w/m. $^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique, de 10.63 w/m ^2C de coefficient d'accumulation de chaleur périodique

(3). Une couche de mortier de ciment de 2cm d'épaisseur, de 0.93 w/m. $^\circ\text{C}$ de coefficient de conductivité thermique, de 11.37 w/m ^2C de coefficient d'accumulation de chaleur périodique.

On donne $R_i = 0,115$ et $R_e = 0.043$, $\alpha_e = 23.26$ et $\alpha_i = 8.72$, les données du climat local sont : $T_{moy} = 31.1^\circ\text{C}$, $T_{max} = 35.6^\circ\text{C}$ (apparaît à 15h), $I_{moy} = 206 \text{ w/m}^2$, $I_{max} = 768 \text{ w/m}^2$ (apparaît à 16h), ρ_s (mortier de ciment) = 0.60. Dans les conditions de ventilation naturelle étudier le comportement thermique de cette paroi enveloppe de bâtiment.

* Calcul T_{smax} :

$$T_{smax} = T_{samoy} + A_{tsa}$$

$$T_{samoy} = T_{moy} + (\rho_s * I_{moy}) / \alpha_e = 31.1 + (0.6 * 206) / 23.26 = 36.41^\circ\text{C}$$

$$A_{tsa} = (A_{ts} + A_{te}) * \beta$$

$$A_{ts} = (I_{max} - I_{moy}) * \rho_s / \alpha_e = (768 - 206) * 0.6 / 23.26 = 14.50^\circ\text{C}$$

$$A_{te} = T_{max} - T_{moy} = 35.6 - 31.1 = 4.5^\circ\text{C}$$

$$A_{ts} / A_{te} = 14.5 / 4.5 = 3.2$$

$$\Delta\tau = \tau_{I_{max}} - \tau_{T_{moy}} = 16\text{h} - 15\text{h} = 1\text{h d'où } \beta = 0.99$$

$$A_{tsa} = (14.5 + 4.5) * 0.99 = 18.81^\circ\text{C}$$

$$T_{smax} = 36.41 + 18.81 = 55.22^\circ\text{C}$$

$$\tau_{tsa} = \tau_{T_{max}} + (A_{ts} / (A_{ts} + A_{te})) * \Delta\tau = 15\text{h} + (13 / (14.5 + 4.5)) * 1 = 15.76\text{h}$$

soit 15 h 46 mn donc vers 16 h

Tableau 5 : Calcul des amortissement et déphasage thermique

N°	Matériaux	d (m)	λ (w/m°C)	R= d/ λ	S ₂₄	R/S ₂₄	D= S ₂₄ * R
1	Mortier de chauxX	0.02	0.81	0.025	10.07	0.00248	0.249
2	Béton armé	0.24	0.81	0.296	10.63	0.02785	3.146
3	Mortier de ciment	0.02	0.93	0.022	11.37	0.00193	0.250
				$\Sigma R = 0.343$		$\Sigma R/S_{24} = 0.322$	$\Sigma D = 3.645$

$$R_t = 0.115 + 0.343 + 0.043 = 0.488 = 0.50 \text{ m}^2\text{C/W}; (\Sigma R/S_{24}) / \Sigma R = 0.094 ;$$

$$0.71 * 3.645b = b2.60 ; e^{-0.6b} = 13.46$$

$$R_{tmin} = (T_{samoy} - T_{imoy}) * R_i / \Delta t_{sa} = (36.41 - 32.1) * 0.115 / 2 = 0.25 \text{ m}^2\text{C/W}.$$

$R_t > R_{tmin}$ le comportement thermique est bon on peut ne pas prévoir de couche d'isolation thermique.

$$A_{omin} = A_{tsa} / [A\theta_i] = 18.81 / 2.5 = 7.52$$

$$A_o = e^{0.71\Sigma D} (0.5 + 2.7 (R_e / 6A + A + R_e)) = e^{0.71*3.645} (0.5 + 0.043 / 6 * 0.094 + 0.094 + 0.043)) A_o = 13.46 * 0.713 = 9.60 \text{ donc } A_o > A_{omin} \text{ le comportement thermique est bon.}$$

Analysons maintenant le déphasage thermique :

$$\phi = 2.7 * \Sigma D - 0.4 = 2.7 * 3.645 - 0.4 = 9.44 \text{ h soit } 9 \text{ h } 26 \text{ mn le temps d'apparition de la température maximale de la face intérieure du mur sera :}$$

$\tau_{\theta_{\text{imax}}} = \tau_{\text{tsamax}} + \phi = 13\text{h} + 9,44\text{h} = 22\text{ h } 44\text{ mn}$ soit 22 h 26 mn, la température maximale de la face intérieure du mur apparaît donc aux environs de 22h30mn. NB : cette méthode de détermination technique du comportement thermique d'une enveloppe de bâtiment peut être appliquée à toute zone à climat tropical (les données physiques seront fournies par les services météorologiques locales).

III-2. Discussion

Couramment, les études des échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement se traitent en supposant les flux passant à travers les parois enveloppes soit permanents (ou stationnaire) sous l'effet du gradient thermique lui-même permanent, ou tout au moins dont la prise en compte n'entraîne pas de gros écarts sur le bilan thermique : c'est ce qu'on appelle le régime permanent. Dans un tel régime le comportement thermique de l'enveloppe est caractérisé principalement par le coefficient de transmission thermique K des parois (appelé également conductance thermique), et par conséquent la conductivité thermique λ et de l'épaisseur d des matériaux constituant l'enveloppe. Mais dans la réalité le régime thermique stationnaire n'existe pas, et cela se remarque principalement dans les régions à climat tropical et ce qui nous concerne en particulier. La température extérieure varie entre jour et nuit et on n'est pas toujours dans l'obligation de chauffer le volume habité. Si la température intérieure du bâtiment n'est pas pilotée par un système de climatisation en été et de chauffage en hiver, la température intérieure fluctue inévitablement elle aussi.

Les conditions d'études du régime thermique permanent qui sont utilisées dans les zones à climat d'hiver ne peuvent pas s'appliquées aux zones à climat tropical pour assurer le confort thermique optimal et le calcul de l'évolution de la température intérieure ne peut être effectué sous les hypothèses du régime thermique stationnaire. On est donc contraint pour assurer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment de passer à l'analyse des échanges thermiques à travers les parois enveloppes de bâtiment en régime thermique dynamique (ou variable). Ce régime met en jeu d'autres grandeurs caractérisant les parois enveloppes de bâtiment, notamment celles qui gèrent la transmission des variations de température et de stockage des flux thermiques : coefficient d'accumulation de chaleur périodique (Sp) ; l'inertie thermique des matériaux (D) ; l'admittance thermique (Y) ; l'amortissement thermique (Ao) et le déphasage thermique (ϕ). L'analyse du comportement thermique concernera les conditions suivantes :

- ✓ Après avoir calculer la résistance thermique totale (Rt) de la paroi enveloppe, on déterminera la résistance thermique minimale (Rtmin) puis on compare les deux résultats : si $R_t \geq R_{t\text{min}}$ le comportement

thermique de la paroi enveloppe est bon, mais si $R_t < R_{tmin}$ l'efficacité thermique de la paroi enveloppe est mauvaise, il faudra prévoir une couche d'isolation thermique dont l'épaisseur sera calculée par $d_i = \lambda_i (R_{tmin} - R_t)$, puis on recalcule R_t avec la couche d'isolation thermique.

- ✓ On déterminera la valeur de l'amortissement thermique (A_o) et la valeur de l'amortissement minimale (A_{omin}) puis on compare également les deux résultats : si $A_o \geq A_{omin}$ le comportement thermique de la paroi enveloppe est bon car on aura $\theta_{imax} \leq T_{emax}$.
- ✓ On déterminera enfin le déphasage thermique (ϕ) et le temps d'apparition de la température maximale de la face intérieure de la paroi enveloppe ($\tau_{\theta_{imax}}$) : $\tau_{\theta_{imax}} = \tau_{tsamax} + \phi$.

IV - CONCLUSION

Le bâtiment est conçu pour jouer un rôle de filtre thermique permettant de recréer un microclimat intérieur indépendant des fluctuations météorologiques extérieures. Ainsi pour construire durable et confortable sous nos latitudes il est nécessaire de savoir qu'un bâtiment n'est jamais en régime stable, il sera en permanence en régime dynamique. En réalité tout bâtiment a un comportement thermique dynamique principalement dû aux variations climatiques extérieures (température, radiation solaire, vent), aux régimes d'occupation intérieures (température de consigne, comportement des occupants, apports internes, installations de chauffage et de climatisation). C'est donc ce comportement thermique dynamique que doit tenir en compte les concepteurs (architectes, ingénieurs) des parois enveloppes de bâtiments pour que le confort thermique soit assuré. Dans cet article nous venons d'étudier les principales grandeurs thermiques caractérisant les échanges thermiques en régime dynamique et de donner les méthodes de calculs des paramètres qui permettent d'analyser le comportement thermique des parois enveloppes de bâtiment que tout concepteur doit savoir et ne pas négliger dans la phase de conception particulièrement sous nos climats tropicaux. Nous pensons avoir étendu le domaine d'application de l'analyse harmonique à la méthode des transferts thermiques en régime dynamique. Nous souhaitons que cet article puisse servir de document de référence (aux ingénieurs et architectes) pour améliorer la conception des parois enveloppes afin d'assurer aux usagers des bâtiments un meilleur cadre de vie et de confort thermique sous ventilation naturelle.

RÉFÉRENCES

- [1] - HAUGLUSTAINÉ & SIMON, (2006)
- [2] - KUZNIK, DVID JOHANES & ROUX, (2011)
- [3] - S. NEZZAR and M. GOURDE, « Etude des Performances Energétiques d'une Conception Bioclimatique en Région Aride », Word Energy Council, (1999)
- [4] - Document, « Règlementation thermique des bâtiments d'Habitation, Règles de Calcul des Déperditions calorifiques », Fascicule1, DTR C 3-2, CNERIB, (1998)
- [5] - Document, « Climatisation, Règles de Calcul des Apports calorifiques des Bâtiments », Fascicule1, DTR C 3-4, CNERIB, (1998)
- [6] - R. BEN HABIB, A. AIT. MOKHTAR and F. ALLARD, « Analyse Bioclimatique de l'Habitat Traditionnel des Régions Désertiques Nord Sahariennes », Conférence Européenne, Performance Energétique et qualité des Ambiances dans le Bâtiments, Lyon, (Novembre 1994)
- [7] - Y. JANNOT et T. DJIAKO, « Economie d'énergie et confort thermique en zone tropicale », *International Journal of Réfrigération*, Vol. 17, N°3 (1994)
- [8] - Ouvrage, « L'isolation thermique écologique » Jean- Pierre Oliva, Samuel Courgey, (Mars 2010)
- [9] - Dossier CSTB, « Isolation par l'intérieur des murs, Expérience française dans le domaine de l'isolation par l'intérieur en construction neuve ou en rénovation », (Septembre 2010)
- [10] - J. DREYFUS, le confort dans l'habitat en pays tropical : la protection des constructions contre la chaleur, problème de ventilation. Editions Eyrolles, Paris, (1960) 363 p.
- [11] - M. N'GUESSAN, Analyse des performances thermiques des constructions en climat tropical. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Paris, (199) 382 p.
- [12] - ABDEL MOURTADA, ENSTP, Laboratoire de physique du Bâtiment, BP. 1083, Yamoussoukro, COTE D'IVOIRE « Conception bioclimatique de l'habitat en climat tropical », AUPELF/UREF, ENI, Bamako, Mali, (Février 1993)
- [13] - J. MINANE Jacques- Rémy, Confort thermique et Méthode de climatisation passive ou à faible cout : application au puits canadien. Mémoire de fin d'Etudes 2ie, (2010)
- [14] - F. LAWSON, Evaluation du confort thermique dans l'habitat individuel à Ouagadougou. Mémoire de fin d'Etudes, EIER Ouagadougou, (1991)
- [15] - AL-AZRI et al., « Développent of bioclimatic chart for passive building design in Muscat-Oman », Département d'ingénierie mécanique industrielle, Université Sultan Qaboos, Muscat, Oman, (2012) disponible via http://www.Icrepq.com/ICREPQ_12/841-al-azri.pdf.
- [16] - Solener, ADEME, 2014. Guide climatisation tertiaire en Guyane, ADEME Guyane, (version d'Octobre 2013)
- [17] - G. OLIVE, Comportement thermique des bâtiments en régime variable Stage CAST, Lyon, (1976)