

CONFORT THERMIQUE DES BATIMENTS EN VOUTE NUBIENNE



Madiana HAZOUME

Mastère Spécialisé - EINTE

ICAM Nantes 2012- 2013

Sommaire

I. PRÉSENTATION DE LA VOUTE NUBIENNE.....	4
II. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	4
III. DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	5
IV. BATIMENT ET INERTIE THERMQUE DANS LE CONTEXTE DES PAYS CHAUDS.....	6
1. DÉFINITION DE L'INERTIE THERMIQUE.....	6
2. CARACTERISATION DE L'INERTIE.....	7
a. La diffusivité.....	7
b. L'effusivité.....	8
3. IMPORTANCE DE L'INERTIE THERMIQUE DANS LES CLIMATS CHAUDS.....	8
V. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE INTERIEURE DES BATIMENTS.....	9
1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES ET TEMPERATURE EXTERIEURE.	9
2. EVALUATION DE LA TEMPERATURE INTERIEURE.....	9
a. Valeur de la température moyenne.....	10
b. Détermination du Gain thermique.....	11
c. Détermination de l'amortissement et du déphasage.....	12
3. APPLICATION AUX BATIMENTS VN ET MACONNERIE + TOLE.....	13
a. Description des Bâtiments et orientation des parois.....	13
b. Températures extérieures.....	15
c. Calcul du gain thermique.....	16
d. Modélisation de la température extérieure et intérieure.....	18
e. Interprétation des résultats et leviers d'amélioration.....	21
VI. LE CONFORT THERMQUE.....	23
1. LES ECHANGES THERMIQUES DU CORPS HUMAIN.....	24
2. L'EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE.....	25
a. L'indice PMV (norme iso 7730).....	25
b. Le confort selon l'indice PMV.....	27
3. APPLICATION A LA VOUTE NUBIENNE ET AU BATIMENT MACONNERIE + TOLE.....	28
a. Hypothèses et limites.....	28
b. Détermination des zones de confort et d'inconfort dans les bâtiments.....	29
c. Interprétation des résultats.....	30
d. Autres conditions de confort.....	30
e. Leviers d'amélioration du confort.....	30

VII. LA CAMPAGNE DE MESURES THERMIQUES	33
1. QUELLES TEMPERATURES MESURER ?	33
2. OU MESURER CES TEMPERATURES ?	33
3. LES INSTRUMENTS DE MESURE	33
a. Mesure de la température ambiante.....	34
b. Mesure de la température des parois.....	35
CONCLUSION	37
BIBLIOGRAPHIE	38

I. PRÉSENTATION DE LA VOUTE NUBIENNE

Procédé architectural antique, venu du haut Nil, permettant de bâtir, avec un outillage de base, des matériaux locaux et des compétences simples, des habitations aux toitures voûtées, la Voûte Nubienne est proposée au Burkina Faso depuis les années 1990 par un maçon français Thomas Garnier comme une alternative à l'habitat classique des cultivateurs de la région qui était constitué d'agglomérés de maçonnerie et toit de tôle.

Les bâtiments en VN sont construits entièrement en terre crue, un matériau local et abondant et ne font appel ni au ciment ou à la tôle ondulée, matériaux chers ou importés inadaptés aux conditions économiques et au confort thermique de ces régions très chaudes, ni au bois de coffrage. Ce dernier étant souvent sauvagement prélevé sur une ressource rare en climat sahélien.

Le travail de AVN est aujourd'hui internationalement reconnu et salué par de nombreux prix dont entre autres, le prix des meilleures réalisations d'amélioration du cadre de vie par UN Habitat. L'association est soutenue par le fonds français pour l'environnement mondial (FEEM) qui finance son action à hauteur de 30% depuis 4 ans.

II. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les bâtiments en Voûte nubienne sont supposés offrir, en plus de l'avantage économique certain, un meilleur confort thermique pour les occupants, ce qui dans un pays très chaud constitue un atout majeur.

L'association souhaite expliquer puis formaliser par des études techniques et des campagnes de mesure, le confort thermique effectivement ressenti dans ces habitations.

Cette démarche lui permet d'une part de nourrir ses arguments commerciaux, fournissant aux clients et bailleurs de fond les bases scientifiques incontestables du confort thermique ressenti dans les voûtes nubiennes puis d'autre part, de déterminer les conditions de son amélioration.

Pour ce faire nous allons donc réaliser une étude comparative entre un bâtiment en VN et un bâtiment en maçonnerie et toit de tôle de volume équivalent, tacher d'évaluer le niveau de confort thermique de chacun des bâtiments et de déterminer les leviers d'amélioration.

L'étude est réalisée pour des bâtiments situés à Ouagadougou au Burkina Faso.

III. DEMARCHE METHODOLOGIQUE

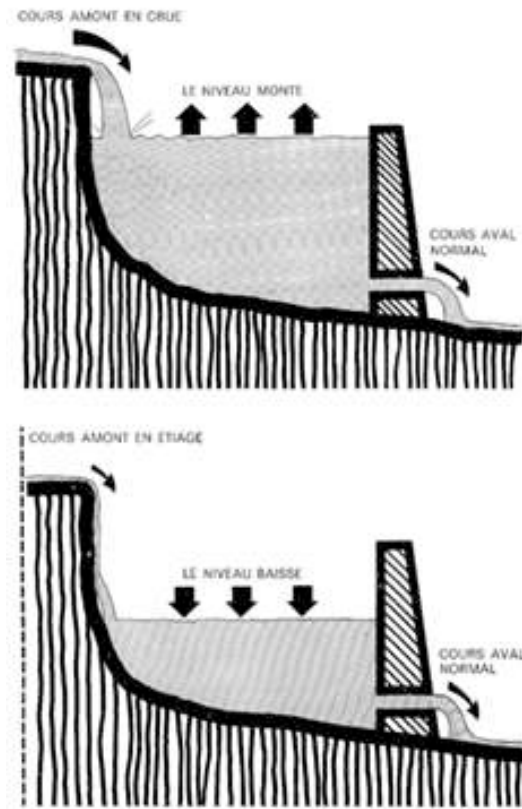
Après avoir introduit dans un premier temps, l'inertie thermique du bâtiment et son intérêt dans les pays chauds, nous allons à partir des données météo réelles prises à Ouagadougou définir pour un bâtiment en voute nubienne et un bâtiment en agglos et toiture de tôle, la température intérieure, l'amortissement et le déphasage par rapport à la température extérieure, et ce pour les mois d'avril puis de janvier qui correspondent aux mois le plus chaud et le plus doux au Burkina Faso.

Ensuite, nous allons introduire le confort thermique et expliquer comment le corps humain interagi thermiquement avec son environnement et déterminer les conditions du confort thermique dans le contexte de notre étude. Puis à partir de l'estimation de température intérieure réalisée en première partie, nous déduirons dans le cas de nos 2 types de bâtiment, pour les 2 périodes d'étude, les heures de confort et d'inconfort et tacheront de voir si des leviers d'amélioration existent et comment les faire varier

Enfin, nous mettrons en place un cahier de charge pour la campagne de mesure des températures intérieures incluant une méthodologie de mise en œuvre de ces mesures et une proposition pour les différents outils de mesurage requis.

IV. BATIMENT ET INERTIE THERMIQUE DANS LE CONTEXTE DES PAYS CHAUDS

1. DÉFINITION DE L'INERTIE THERMIQUE



Lorsque le soleil frappe le mur d'un bâtiment, une partie du rayonnement est réfléchi, l'autre partie est absorbée par la paroi. L'onde de chaleur se transmet de l'extérieur vers l'intérieur à travers les murs en subissant un certain amortissement et le maximum de cette l'onde atteint l'intérieur avec un certain retard appelé déphasage. L'amortissement et le déphasage dépendent de l'épaisseur du mur, de sa conductivité thermique et de sa chaleur massique et caractérisent l'inertie thermique.

La force d'inertie étant une force qui s'oppose à tout changement, on peut définir l'inertie thermique d'un bâtiment, comme sa capacité à stocker et à déstocker de l'énergie dans sa structure, quelle que soit la saison.

Elle définit la vitesse à laquelle le bâtiment se refroidit ou se réchauffe.

Elle permet d'amortir les variations de température intérieure.

2. CARACTERISATION DE L'INERTIE

L'amortissement et le déphasage qui définissent l'inertie thermique dépendent de deux paramètres essentiels que sont la diffusivité et l'effusivité du matériau de construction.

a. La diffusivité

La diffusivité thermique a exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température :

$$a = \lambda / \rho C \text{ (m}^2/\text{s)}$$

λ la conductivité thermique en $\text{W/m}^\circ\text{C}$

ρ la masse volumique en kg/m^3

C la chaleur massique en $\text{KJ/Kg}^\circ\text{C}$

ρC chaleur volumique en $\text{KJ/m}^3^\circ\text{C}$

Augmenter la diffusivité revient à faciliter la diffusion de la perturbation en température à l'intérieur du matériau.

Pour augmenter la diffusivité, il faut soit :

- Augmenter la conductivité thermique :

La diffusivité évolue dans le même sens que λ étant donné que la température d'un matériau s'élève d'autant plus rapidement que la chaleur peut facilement l'atteindre

- Diminuer la chaleur volumique (ρC_p) :

La diffusivité évolue dans le sens inverse de ρC_p puisque la température d'un matériau s'élève d'autant plus lentement qu'il faut une grande quantité d'énergie pour cela.

Plus la diffusivité sera faible meilleure sera l'inertie du matériau.

b. L'effusivité

L'effusivité thermique b est la capacité d'un matériau à absorber une puissance thermique.

$$b = (\lambda \rho C)^{1/2} \text{ (W.s}^{0,5}\text{/m}^2\text{.}^\circ\text{C)}$$

λ la conductivité thermique en W/m.°C

ρ la masse volumique en kg/m³

C la chaleur massique en KJ/Kg.°C

ρC chaleur volumique en KJ/m³.°C

Pour augmenter l'effusivité, il faut soit :

- Augmenter la conductivité thermique :

L'effusivité évolue dans le même sens que λ : la température d'un matériau s'élève d'autant plus rapidement que la chaleur peut facilement l'atteindre

- Augmenter la chaleur volumique

L'effusivité augmente dans le même sens que ρC car un matériau absorbe d'autant plus de puissance thermique que sa température s'élève peu sous l'effet de la chaleur.

Plus l'effusivité est forte, plus l'inertie du matériau est grande.

3. IMPORTANCE DE L'INERTIE THERMIQUE DANS LES CLIMATS CHAUDS

Dans les pays chauds où le gradient de température entre le jour et la nuit est sensible, le bâtiment à forte inertie prend toute son importance. En effet, les fortes températures journalières seront absorbées par l'enveloppe du bâtiment qui les restitue, amorties, plusieurs heures plus tard pendant les heures nocturnes plus fraîches.

V. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE INTERIEURE DES BATIMENTS

Les calculs en régime dynamique étant très complexes, des approximations sont faites pour mettre en évidence l'évolution de la température intérieure d'un bâtiment.

1. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES ET TEMPERATURE EXTERIEURE.

La variation de la température extérieure peut être approchée par une sinusoïde de période 24 h, calée sur la température moyenne et l'amplitude quotidienne de température.

Pour simplifier encore, on va supposer que c'est la température superficielle du mur qui varie de façon sinusoïdale et on va vérifier comment une telle perturbation pénètre dans le mur.

$$T_e = T_{emoy} + A_e \sin(\Omega t)$$

La température extérieure moyenne T_{emoy} et l'amplitude A_e sont données par la météo.

Ω est la pulsation égale à $2\pi/T$, T étant la période considérée (24 heures)

2. EVALUATION DE LA TEMPERATURE INTERIEURE

Dans une approche thermique dynamique qui tient compte de la vie du bâtiment et des différents apports, il est possible de définir la température intérieure T_i de la manière suivante:

$$T_i = T_{imoy} + A_i \sin(\Omega t)$$

$$T_{imoy} = T_{emoy} + DT$$

$$\text{Et } t' = t - R$$

$$T_i = T_{emoy} + DT + A_i / A_e \times A_e \sin(\Omega(t + R))$$

- T_i = température intérieure à un instant t ($^{\circ}\text{C}$),
- T_{moy} = Température extérieure moyenne sur 24 heures ($^{\circ}\text{C}$)
- DT = Gain thermique ($^{\circ}\text{C}$)
- A_i = amplitude température intérieure ($^{\circ}\text{C}$)
- A_e = amplitude température extérieure ($^{\circ}\text{C}$)
- A_e/A_i = 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 intérieure, où Ω 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 est égale à :

La température d'air moyenne extérieure des 24 heures précédentes

+

Un gain de température moyenne (dû aux apports internes et solaires)

+

Une fonction sinusoïdale de l'amplitude moyenne intérieure, d'une période de 24 heures

a. Valeur de la température moyenne

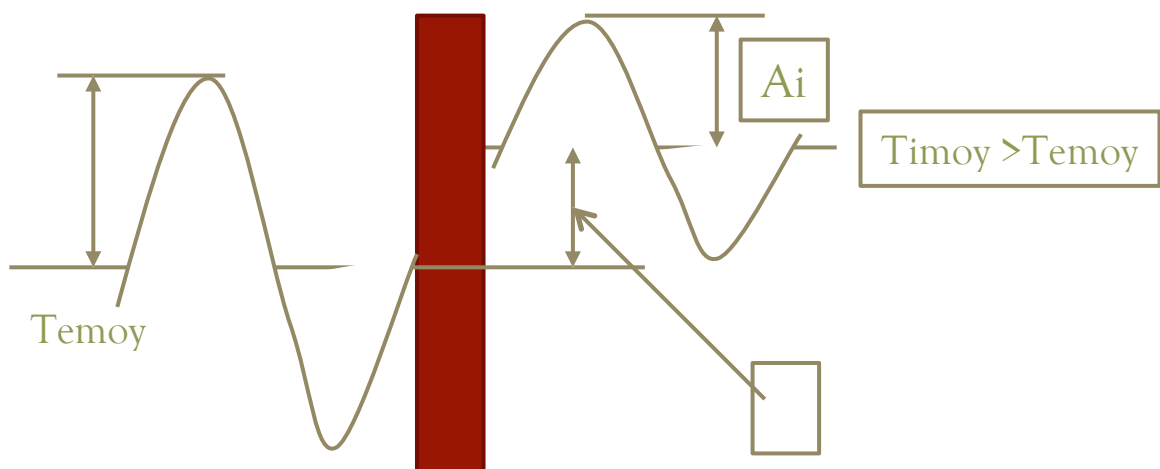
La température intérieure T_i à un instant dépend donc de sa valeur moyenne T_{moy} , et de son amplitude ($T_{\text{max}} - T_{\text{moy}}$), ou ($T_{\text{moy}} - T_{\text{min}}$).

S'il n'y avait jamais aucun apport d'énergie dans le bâtiment, la Température Intérieure moyenne T_{moy} , serait égale à la Température Extérieure moyenne, T_{moy} .

Mais il se produit inévitablement des apports d'énergie dans le bâtiment, citons-les:

- Les apports internes dus à l'occupation,
- Les apports solaires par les ouvertures,
- Les apports solaires par les parois opaques.

Cela a pour conséquence que la valeur de T_{imoy} est toujours supérieure à celle de T_{emoy}



On peut donner à cette différence de températures moyennes le nom de « gain thermique » ou « supplément de température moyenne » (CSTB).

b. Détermination du Gain thermique

Le Gain thermique est égal à :

$$DT = (P_i + P_{sv} + P_{sp}) / (U_e + 0,34q)$$

- P_i , = puissance interne due à l'occupation (W),
- P_{sv} , = puissance solaire transmise par les vitrages (W),
- P_{sp} , = puissance solaire transmise par les parois opaques (W)
- U_e , = conductance moyenne de l'enveloppe (W/°C)
- Aq , = débit de renouvellement d'air ($A = 0,34$) (W/°C)

Puissance interne due à l'occupation (W)

C'est la puissance dégagée par le métabolisme des occupants du bâtiment.

Elle varie selon l'activité de l'occupant.

Puissance solaire transmise par les parois opaques

C'est l'apport de chaleur par rayonnement solaire à travers les parois.

La quantité de chaleur qui traverse le mur est :

$$P_{sp} = \alpha \frac{U}{h_e} S R_m$$

α = coefficient d'absorption de la paroi recevant le rayonnement

S = surface de la paroi en m^2

$F = U/h_e$ = facteur de rayonnement solaire (U étant la conductance de la paroi et h_e son coefficient de convection superficiel extérieur)

R_m = rayonnement solaire absorbé sur la surface du mur en W/m^2

Le coefficient d'absorption « α » dépend de la couleur et de la nature du mur

Le facteur de rayonnement « F » indique la part de chaleur absorbée par la surface et transmise à travers le mur.

Puissance solaire transmise par les parois vitrées

Il n'y a pas de parois vitrées dans ce projet.

c. Détermination de l'amortissement et du déphasage

La température en chaque point x (distance par rapport au nu extérieur du mur) d'un mur frappé par une onde de température incidente varie

comme nous l'avons vu précédemment de façon sinusoïdale autour de sa valeur moyenne, mais avec une amplitude qui décroît exponentiellement avec x et avec un déphasage, ou un retard R , qui augmente avec x .

Le rapport entre l'amplitude de la température dans le mur à la distance x et l'amplitude initiale de la température extérieure est l'amortissement.

Chaque tranche du mur voit donc passer une onde d'amplitude :

$$Ae \times \exp(-x (\Omega / 2 a))$$

Donc atténuée du facteur d'amortissement :

$$Ai/Ae = \exp(-x (\Omega / 2 a))$$

Ω étant la pulsation de l'onde et a la diffusivité du matériau

(Source Techniques de l'ingénieur

Le retard avec lequel le maximum de l'onde arrive au point x est le déphasage :

$$R = x (1 / (2 a \Omega))$$

Ω est la pulsation égale à $2\pi/T$, T étant la période considérée (24 heures) et a la diffusivité du matériau en m^2/s .

3. APPLICATION AUX BATIMENTS VN ET MACONNERIE + TOLE

L'étude est réalisée avec les températures extérieures et les humidités correspondantes prises à Ouagadougou du 15 avril 2012 pour la période chaude et de 15 janvier 2013 pour la période douce.

a. Description des Bâtiments et orientation des parois

Les dimensions du bâtiment VN ont été prises pour correspondre un exemple typique de voûte nubienne sachant que pour des raisons structurelles les bâtiments VN ont toujours une largeur de 3,25m.

Le bâtiment maçonnerie + Tôle a été choisi de taille identique afin que la comparaison soit faite sur deux habitats de dimensions identiques.

Nous avons fait correspondre les orientations des parois aux 4 points cardinaux et placé les parois qui sont sur la largeur du bâtiment à l'est et à l'ouest afin de minimiser les apports solaires.

Les murs porteurs des bâtiments VN sont habituellement de 60 cm et 30 cm pour les murs pignons. L'épaisseur de la voûte est d'environ 30 cm mais sa mise en charge et la mise en place des contreforts peuvent faire varier cette épaisseur. Nous avons opté pour une épaisseur moyenne de 45 cm pour toutes les parois.

Les murs de la VN sont en brique de terre avec un enduit en terre.

Les murs du bâtiment sont constitués de maçonneries de 15 cm avec un enduit 1,5 cm de part et d'autre.

	Longueur (m)	Largeur (m)	Surface au Sol (m2)	Hauteur (m)	Ouverture porte (m2)	Ouverture fenêtre (m2)
Cas 1 VN simple	6	3,25	19,50	2,80	1,47	0,25
Cas 3 Maçonnerie + tôle	6	3,25	19,50	2,80	1,47	0,25

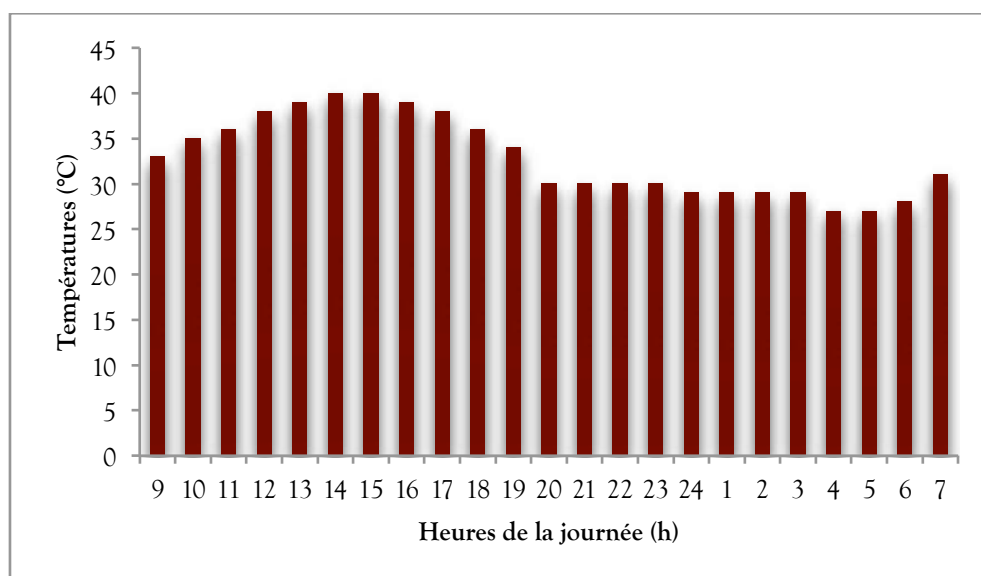
	Surface parois 1 (m2)	Surface parois 2 (m2)	Surface parois 3 (m2)	Surface parois 4 (m2)	Surface Plafond (m2)
S	16,80	16,80	9,10	9,10	19,50
Orientation	Nord	Sud	Est	Ouest	

On suppose que les bâtiments sont légèrement et naturellement ventilés à 1 volume par heure.

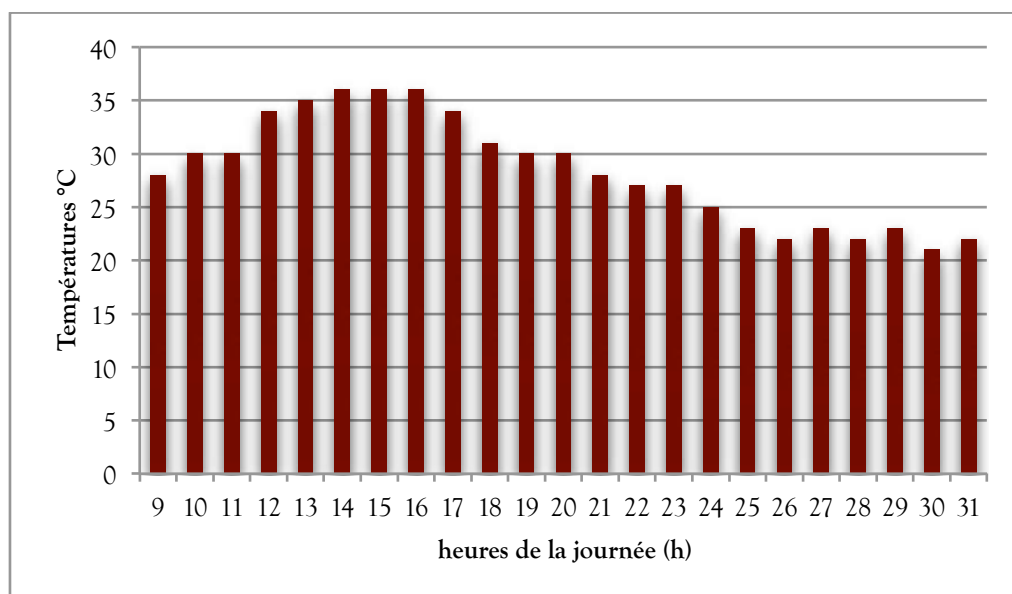
b. Températures extérieures

Nous avons récupéré sur un site de météo, les températures des journées du 15 avril 2012 et du 15 janvier 2013 à Ouagadougou.

Avril 2012



Janvier 2013



Les températures moyennes et les amplitudes relevées pour les mois d'avril et de janvier sont :

	Avril	Janvier
Temoy (°C)	33,5	28,5
Ae (°C)	6,5	7,5

c. Calcul du gain thermique

1. Caractéristiques des matériaux et données météo

VN	Parois 1	Parois 2	Parois 3	Parois 4	Plafond
λ (W/m.°C)	1				
Ep (m)	0,45				

M Tôle +	Parois 1	Parois 2	Parois 3	Parois 4	Plafond
λ (W/m.°C)	0,525				70
Ep (m)	0,18				0,003

	Parois 1	Parois 2	Parois 3	Parois 4	Plafond
h_e (W/m ² .°C)	16,7	16,7	16,7	16,7	20
h_i (W/m ² .°C)	9	9	9	9	11,1

Source « efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale », Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie

	Janvier		Avril
Irradiation journalière moyenne	4,25	KWh/m ²	5,03
	177,08	W/m ²	209,58

Source : météorologie nationale Burkina Faso

2. Apports liés à l'occupation

Les apports sont calculés sur 24 heures.

Les occupants

En supposant que les bâtiments sont occupés par 2 personnes 10 heures par jour (dont 8 de sommeil et 2 en position assise) :

$$P1 = 67 \text{ W}$$

L'éclairage

En supposant que 2 ampoules de 60 W éclairent l'habitation et que ces ampoules sont allumées 3 heures par jour, soit un coefficient d'utilisation de 13% :

$$P2 = 15 \text{ W}$$

On part de l'hypothèse qu'il n'y a pas d'autres appareils électriques dans le bâtiment.

Apports totaux liés à l'occupation

$$\mathbf{Psi = P_i + P2 = 82 \text{ W}}$$

3. Apports solaires à travers les parois

Ne disposant pas des valeurs de l'irradiation solaire en fonction de l'heure et de l'orientation pour la ville de Ouagadougou et pour les mois qui nous intéressent, nous sommes partis de l'irradiation moyenne et avons fait les hypothèses suivantes :

Sur les 12 heures d'enseuillement disponibles, les surfaces des parois à l'est, à l'ouest et les toitures reçoivent l'irradiation solaire direct 6 heures /12, la paroi au sud 4 heures /12 et celle au Nord 3 heures /12.

Sur ces bases nous trouvons les valeurs de Psp suivantes (en W) :

	Janvier	Avril
Psp (W) Bâtiment VN	186	220
Psp (W) Bâtiment maçonnerie + Tôle	674	798

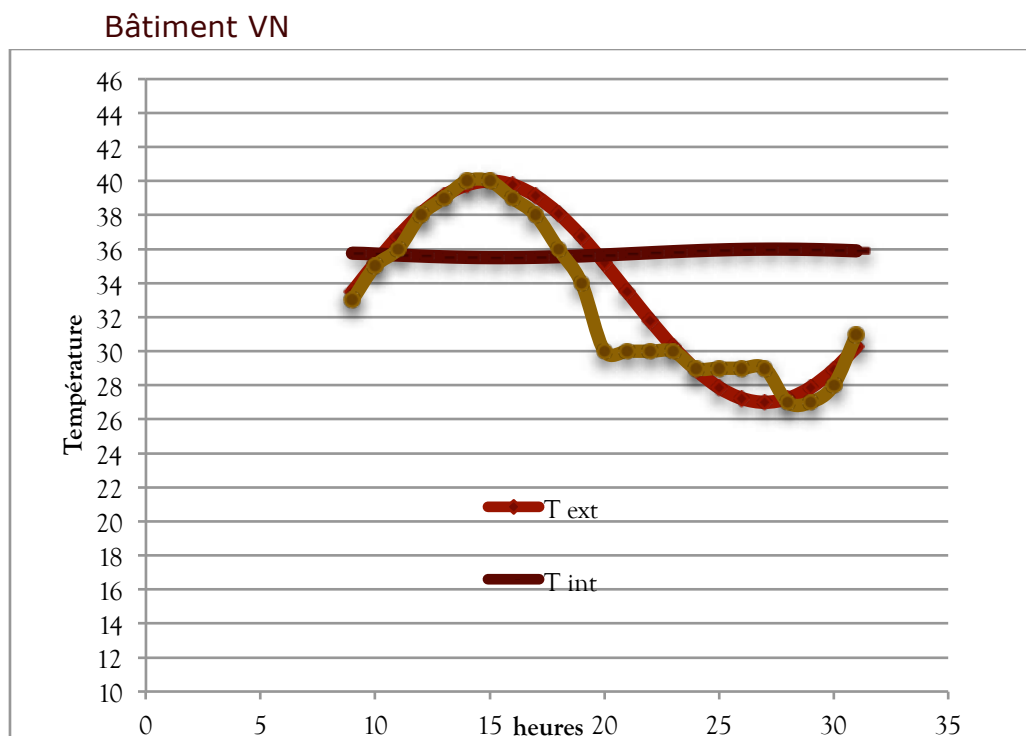
4. Le gain thermique

On déduit des apports le gain thermique en °C qui est la hausse de température intérieure générée par les apports :

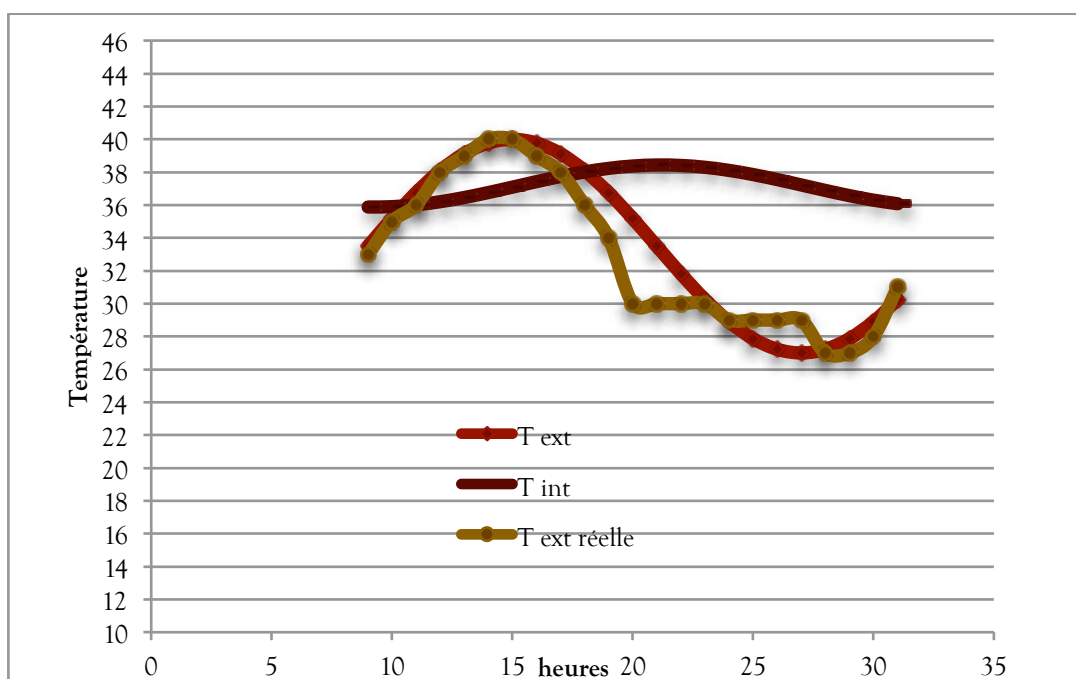
	Janvier	Avril
Bâtiment VN	2,00	2,25
Bâtiment maçonnerie + Tôle	3,14	3,66

d. Modélisation de la température extérieure et intérieure

En Avril

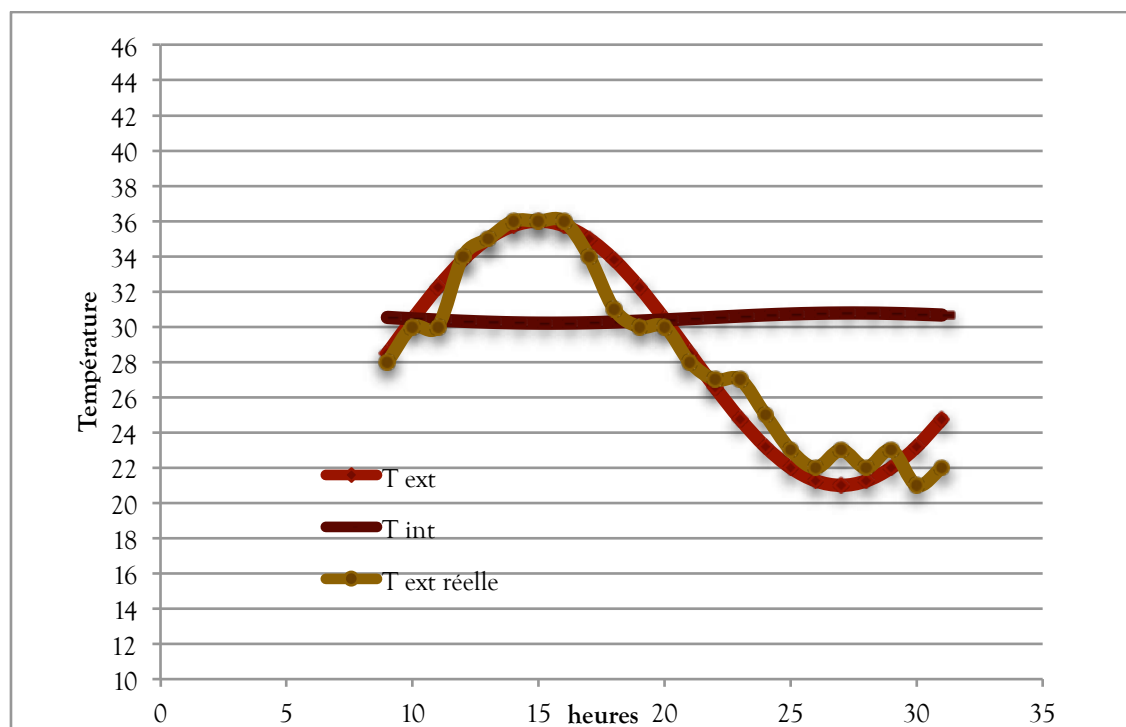


Bâtiment Maçonnerie + Tôle

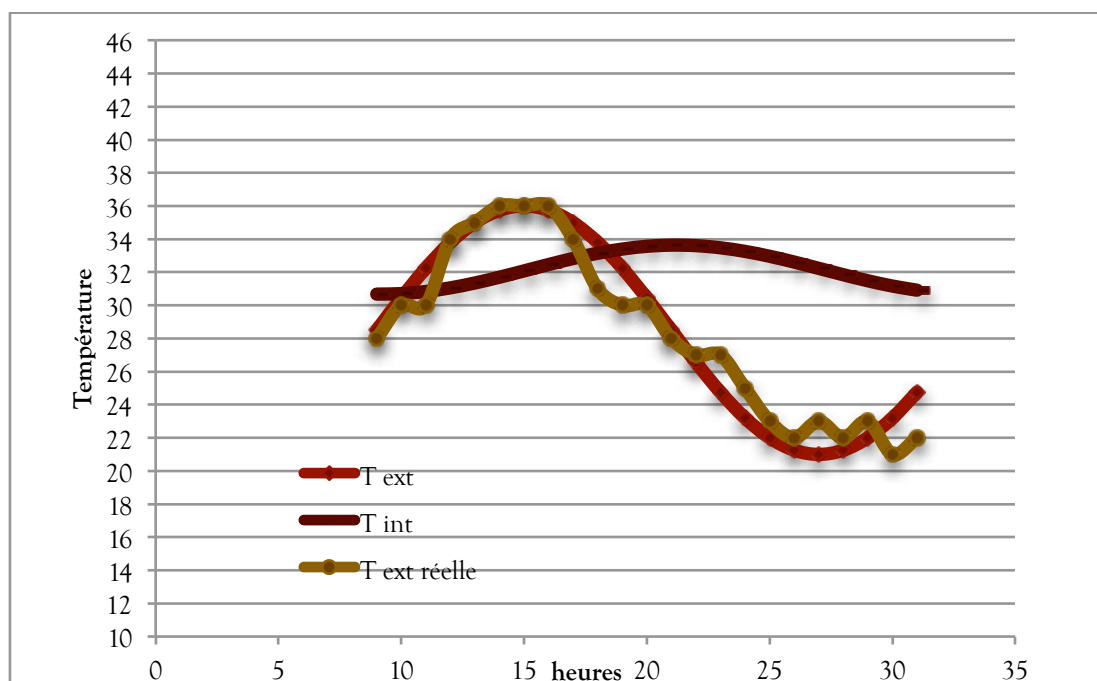


En Janvier

Bâtiment VN



Bâtiment Maçonnerie + Tôle



Caractéristiques de l'onde de température intérieure

La température intérieure est caractérisée par l'amortissement et le déphasage suivants :

	VN	Maçonnerie
Amortissement	0,039	0,197
Déphasage (heures)	12,44	6,20

	VN		Maçonnerie + tôle	
	Janvier	Avril	Janvier	Avril
Tmax int (°C)	30,8	36,0	33,6	38,4
Tmax ext (°C)	36	40	36	40
Delta T (°C)	5,2	4,0	2,4	1,6

e. Interprétation des résultats et leviers d'amélioration

Interprétations des résultats

Avec une faible diffusivité (7^E-7) et une effusivité relativement forte (1200) le bâtiment VN a une forte inertie.

Le déphasage est 2 fois plus important dans le bâtiment VN que dans le bâtiment en maçonnerie.

Le déphasage de 12 heures dans la voûte nubienne permet au pic de chaleur de la journée d'atteindre l'intérieur du bâtiment en soirée, mais ce pic est très atténué.

En effet l'amplitude de la température est très amortie dans le bâtiment VN la rendant quasiment constante sur la journée.

La différence de température maximale entre l'extérieur et l'intérieur plus importante dans le bâtiment VN (5,2 °C en janvier et 4 °C en avril) que dans le bâtiment en maçonnerie.

L'écrtage du pic de température extérieure est un facteur important de confort thermique car les écarts de température à l'intérieur d'un bâtiment sont en général source d'inconfort.

La température est relativement peu amortie dans le bâtiment en maçonnerie et passe par un maximum clairement sensible avec un retard de 6 heures, il fait donc très chaud dans ces habitations l'après midi. Cela est du à la présence de la tôle qui a une conductivité thermique de 70 W/m.°C contre 1 pour la terre crue.

Les températures moyennes à l'intérieur sont plus élevées que les températures extérieures moyennes.

Quelques leviers d'amélioration de la température intérieure.

Considérant que l'on ne touche pas à la structure ni à la conception de l'enveloppe de la voûte nubienne, il existe quelques leviers, notamment en rapport avec l'augmentation de la température moyenne intérieure qui peuvent contribuer à améliorer la T_i .

Les apports internes liés au rayonnement solaire peuvent être réduits en protégeant par l'extérieur les parois trop exposées au soleil (auvents, pare

soleil) et en créant des ombres avec la végétation. Par ailleurs, les grandes ouvertures doivent être plutôt positionnées sur les parois au sud et au nord.

Les parois d'un bâtiment, exposées au soleil, s'échauffent. Leur température devient supérieure à celle de l'air extérieur. Cet échauffement résulte de l'absorption d'une part plus ou moins importante de l'énergie solaire incidente, donc principalement de la couleur des parois et de leur orientation. Il faut donc éviter les couleurs foncées sur les parois soumises à un fort ensoleillement en particulier lorsqu'il s'agit de parois Est ou Ouest ou horizontales. Ainsi, en peignant les parois extérieures très exposées au soleil dans les couleurs les plus claires possibles, afin de faire baisser le coefficient d'absorption, on contribuera aussi à faire baisser les apports solaires.

L'isolation de la toiture est essentiel car le rayonnement solaire est plus important sur les surfaces horizontales (même si dans notre étude, faute de données plus précises nous avons utilisé des irradiation moyenne) et la part de chaleur qui passe par la toiture est très importante contribuant fortement à l'augmentation des apports solaire.

La ventilation par tirant d'air avec une ouverture en hauteur permet une ventilation plus efficace que la ventilation transversale. L'augmentation du débit de ventilation fait baisser la température intérieure.

Dans le bâtiment en VN, l'ajout d'un faux plafond de 3 mn en contreplaqué fait baisser le gain thermique de plus de 30%.

Gain thermique (°C) VN	2,25
Gain thermique (°C) VN + Faux Plafond en CP	1,54
Baisse	31,59%

Nous allons dans la prochaine partie voir quelles sont à partir de ces températures intérieures le confort thermique de ces bâtiments et analyser les différents moyens de l'améliorer.

VI. LE CONFORT THERMIQUE

A.S.H.R.A.E (**A**merican **S**ociety of **H**eating **R**efrigerating and **A**ir **C**onditioning **E**ngineers) en 1992 définit le confort thermique comme étant « l'état d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique ».

D'un point de vue physiologique, l'être humain éprouve une sensation de confort thermique lorsque les conditions climatiques environnantes permettent au corps d'éliminer la chaleur produite au rythme de son métabolisme, sans pour cela transpirer ou frissonner d'une manière désagréable.

L'inconfort est ressenti lorsque l'organisme n'a pas atteint cet équilibre.

Si l'organisme ne réussit pas à dissiper ou à conserver la chaleur à un niveau interne acceptable, il en résulte une accumulation de chaleur, qui conduit à une augmentation de la température interne et à des sensations d'inconfort.

Le confort thermique dépend de nombreux facteurs:

Des facteurs liés à l'individu:

- Ses vêtements,
- Son activité,
- Son état physique,
- Son état psychologique

Des facteurs liés à l'environnement immédiat:

- Température de l'air
- Température des parois
- Vitesse de l'air
- Taux d'humidité relative de l'air ambiant

Les exigences de confort doivent donc être définies en prenant en compte tous ces paramètres.

La façon la plus simple d'appréhender le confort thermique consiste à considérer uniquement l'effet de la température ambiante et à évaluer le nombre d'heures durant lesquelles cette température dépasse une valeur donnée.

1. LES ECHANGES THERMIQUES DU CORPS HUMAIN

La température intérieure du corps humain est constante et égale à 37°C. Il y a donc un transfert thermique entre l'intérieur du corps et l'ambiance extérieure à température variable.

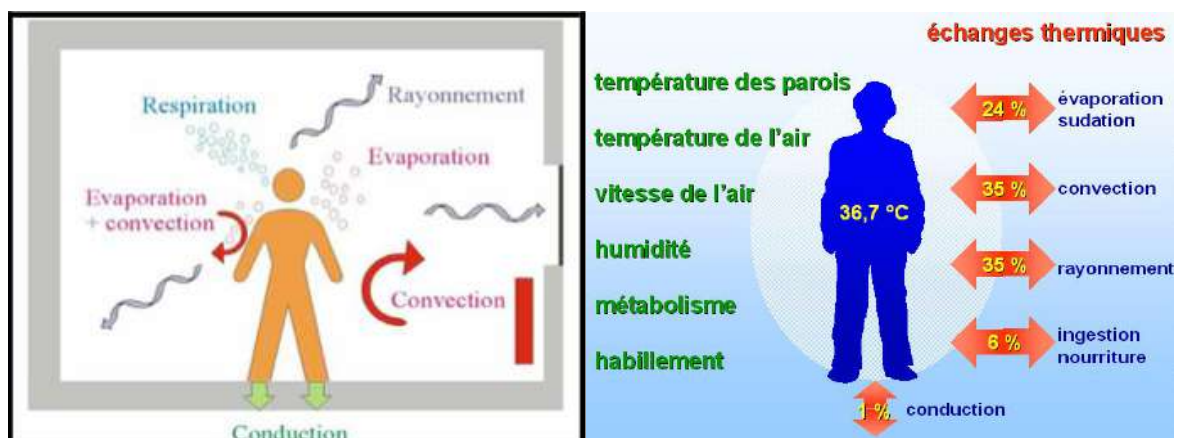
On conçoit aisément que l'état d'équilibre est atteint lorsque le corps est capable d'équilibrer la quantité de chaleur échangée entre l'intérieur et l'extérieur. Pour cela, le corps humain fabrique continuellement de l'énergie qui est essentiellement fonction de l'âge, du sexe et de l'activité physique de l'individu.

Cette énergie est appelée métabolisme humain.

Le métabolisme M peut être mesuré expérimentalement à partir du volume d'oxygène consommé. Dans la pratique, il est estimé à partir des tableaux qui donnent le métabolisme en fonction de la description de l'activité ou la tâche. La puissance métabolique est donnée par rapport à la surface corporelle. Elle est exprimée souvent en Met, l'unité de Met est égale à 58.15 W/m² et correspond au métabolisme d'un individu assis au repos.

L'équilibre thermique du corps va donc s'établir entre ce métabolisme et les différents modes d'échange de chaleur entre le corps humain et son environnement que sont : la convection, le rayonnement, les échanges par évaporation et ceux liés à la respiration.

La conduction est négligée car les surfaces de contact sont trop petites.



2. L'ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE

a. L'indice PMV (norme iso 7730)

L'un des indices thermiques les plus connus est l'équation de confort de Fanger spécifique aux espaces intérieurs. **Fanger, 1970**, a déterminé expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et sudation) nécessaires pour le confort thermique sous des conditions thermiques homogènes et stationnaires. En écrivant le bilan thermique, il a exprimé, à l'aide de l'indice PMV, la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui qui correspond aux conditions de confort. Cet indice exprime la sensation thermique moyenne éprouvée par un large groupe d'individus sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + \left[0,028 \right] [(M-W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}])$$


Bilan thermique du corps

Où les différents termes représentent respectivement :

M – Le métabolisme (W/m^2);

W – le travail externe (W/m^2);

H – Les pertes de chaleur sensible (convection et rayonnement);

E_c – la chaleur échangée par évaporation cutanée;

C_{res} – la chaleur échangée par convection respiratoire;

E_{res} – la chaleur échangée par évaporation liée à la respiration.

Dans l'équation 1, les termes H , E_c , C_{res} , and H_{res} , correspondent aux échanges de chaleur entre le corps et son environnement immédiat et sont calculés avec les équations suivantes :

$$H = \underbrace{3,96E^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4]}_{\text{Rayonnement}} + \underbrace{f_{cl} \times h_c \times (t_{cl}-t_a)}_{\text{Convection}}$$

$$E_c = \underbrace{3,05E^{-3} \times [5733 - 6,99 \times (M \cdot W) \cdot p_a]}_{\text{Evaporation}} + \underbrace{0,42 \times [(M \cdot W) - 58,15]}_{\text{Transpiration}}$$

$$C_{res} = 0,0014 \times M \times (34-t_a)$$

$$E_{res} = 1,7E^{-5} \times M \times (5867-p_a)$$

où:

I_{cl} est la résistance de l'habillement ($m^2 \text{ K/W}$);

f_{cl} est le facteur d'habillement;

t_a est la température ($^{\circ}\text{C}$);

t_r est la température radiante moyenne ($^{\circ}\text{C}$);

v_{ar} est la vitesse de l'air relative (m/s);

p_a est la vapeur d'eau partielle (Pa);

t_{cl} est la température de surface du vêtement ($^{\circ}\text{C}$).

Le problème principal dans le calcul du PMV est que le terme t_{cl} correspondant à la température externe des vêtements est à priori inconnu. Cette température doit être déterminée par itération à partir d'une équation de l'équilibre thermique à la surface du bâtiment.

En régime permanent, le flux de chaleur transmis par conduction à travers

le vêtement à la température de la peau est égal à la somme de l'échange de chaleur par convection et par radiation avec l'environnement immédiat

$$(t_{sk} - t_{cl}) / I_{cl} = 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl}-t_a)$$

D'où on déduit

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \times 3,96E^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl}+273)^4 - (t_r+273)^4] - I_{cl} \times f_{cl} \times h_c \times (t_{cl}-t_a)$$

où t_{sk} est la température de la peau établie par Fanger comme :

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028 (M-W).$$

Dans le cadre de cette étude nous avons développé sur EXCEL un outil permettant de calculer l'indice PMV.

b. Le confort selon l'indice PMV

Le confort thermique selon Fanger est atteint pour un PMV compris entre -0,5 et 0,5 (aussi bien en terme de chaleur que de froid).

Ces expérimentations ont été établies sur des individus vivant dans des pays aux climats tempérés ou froid.

Les travaux de Lawson ont montré qu'un individu vivant dans des climats chauds peut trouver supportables des températures plus élevées que ceux qui vivent dans les climats tempérés.

Jannot et Djiako ont considéré qu'un tel sujet pouvait trouver acceptable en terme de confort un $PMV \geq 1,5$ (seule la limite supérieure sera considérée puisque nous nous trouvons en climat tropical).

Nous allons donc pour notre étude considérer que notre zone de confort thermique correspond à un $PMV < 1,5$

3. APPLICATION A LA VOUTE NUBIENNE ET AU BATIMENT MACONNERIE + TOLE

a. Hypothèses et limites

Ne disposant d'aucune mesure in situ, la température moyenne radiante qui peut être approximée en 1ère approche comme la température des parois pondérée par la surface des parois a été prise égale à la température de l'air. Cette approximation fait de la voûte nubienne un milieu homogène ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Mais la campagne de mesure à venir permettra de disposer des températures de parois et donc de calculer la température moyenne radiante.

Nous avons considéré un individu sédentaire et accoutumé à son environnement, assis au repos et habillé avec une tenue tropicale ($R = 0,047 \text{ m}^2\text{°C/W}$)

Dans ces conditions :

En avril le PMV de 1,5 correspond à une température d'environ 32°C avec une vitesse de l'air d'environ 0,05m/s et une humidité de l'air de 13%.

En janvier le PMV de 1,5 correspond à une température d'environ 31°C avec une vitesse de l'air d'environ 0,05m/s et une humidité de l'air de 50%.

b. Détermination des zones de confort et d'inconfort dans les bâtiments

Bâtiment en maçonnerie et tôle					
Janvier			Avril		
t (h)	Temp (°C)		t (h)	Temp (°C)	
9	30,7	OK	9	35,9	Inconfort
10	30,7	OK	10	35,9	Inconfort
11	30,8	OK	11	36,0	Inconfort
12	31,1	Inconfort	12	36,2	Inconfort
13	31,4	Inconfort	13	36,5	Inconfort
14	31,7	Inconfort	14	36,8	Inconfort
15	32,1	Inconfort	15	37,1	Inconfort
16	32,5	Inconfort	16	37,4	Inconfort
17	32,8	Inconfort	17	37,7	Inconfort
18	33,1	Inconfort	18	38,0	Inconfort
19	33,4	Inconfort	19	38,2	Inconfort
20	33,6	Inconfort	20	38,4	Inconfort
21	33,6	Inconfort	21	38,4	Inconfort
22	33,6	Inconfort	22	38,4	Inconfort
23	33,5	Inconfort	23	38,3	Inconfort
0	33,3	Inconfort	0	38,1	Inconfort
1	33,0	Inconfort	1	37,9	Inconfort
2	32,6	Inconfort	2	37,6	Inconfort
3	32,2	Inconfort	3	37,2	Inconfort
4	31,8	Inconfort	4	36,9	Inconfort
5	31,5	Inconfort	5	36,6	Inconfort
6	31,2	Inconfort	6	36,3	Inconfort
7	30,9	OK	7	36,1	Inconfort
8	30,7	OK	8	35,9	Inconfort

Bâtiment en VN					
Janvier			Avril		
t (h)	Temp (°C)		t (h)	Temp (°C)	
9	30,5	OK	9	35,8	Inconfort
10	30,5	OK	10	35,7	Inconfort
11	30,4	OK	11	35,7	Inconfort
12	30,3	OK	12	35,6	Inconfort
13	30,3	OK	13	35,5	Inconfort
14	30,2	OK	14	35,5	Inconfort
15	30,2	OK	15	35,5	Inconfort
16	30,2	OK	16	35,5	Inconfort
17	30,2	OK	17	35,5	Inconfort
18	30,3	OK	18	35,6	Inconfort
19	30,3	OK	19	35,6	Inconfort
20	30,4	OK	20	35,7	Inconfort
21	30,5	OK	21	35,7	Inconfort
22	30,5	OK	22	35,8	Inconfort
23	30,6	OK	23	35,8	Inconfort
0	30,7	OK	0	35,9	Inconfort
1	30,7	OK	1	36,0	Inconfort
2	30,8	OK	2	36,0	Inconfort
3	30,8	OK	3	36,0	Inconfort
4	30,8	OK	4	36,0	Inconfort
5	30,8	OK	5	36,0	Inconfort
6	30,7	OK	6	35,9	Inconfort
7	30,7	OK	7	35,9	Inconfort
8	30,6	OK	8	35,8	Inconfort

c. Interprétation des résultats

En avril aucun des 2 bâtiments ne permet à aucun moment de la journée de rentrer dans une zone de confort thermique.

En janvier le bâtiment VN est tout le temps dans la zone de confort thermique quand le bâtiment en maçonnerie et tôle ne l'est pas entre 12h et 6h du matin avec dans cette tranche horaire une température maximale de **33,6°C soit un PMV de 2,68 en air calme.**

d. Autres conditions de confort

L'équilibre du bilan thermique est une condition nécessaire de confort mais elle est non suffisante. Les facteurs ci dessus peuvent être source d'inconfort.

- Gradient vertical de température trop important ($\Delta T > 2^{\circ}\text{C}$)
- Température du sol trop élevée
- Asymétrie du rayonnement
- Sensation de courant d'air

e. Leviers d'amélioration du confort

La ventilation nocturne est le principal facteur sur lequel nous pouvons jouer pour améliorer le confort.

A partir de la température maximale d'inconfort de 33,6°C dans le bâtiment en maçonnerie et tôle en janvier, dans un environnement homogène, on regarde l'impact sur le PMV d'une augmentation de la vitesse de l'air pour un individu au repos et habillé d'une tenue légère tropicale.

V (m/s)	0,05	0,5	1
PMV	2,75	2,71	2,68

On constate que pour une température intérieure de 33,6°C la ventilation forcée ne permet pas de revenir dans la zone de confort.

Pour une vitesse de ventilateur de 1 m/s, l'indice PMV limite de 1,5 correspond à une température de 32°C. On en déduit que la ventilation permettra de réduire la zone d'inconfort aux températures supérieures à 32°C (au lieu de 31°C).

La zone d'inconfort avec la convection forcée va de 16h à 3h du matin.

La zone de confort thermique a été élargie de 6 heures.

Température équivalente

L'utilisation de l'indice PMV étant limitée à des vitesses de l'air de 1m/s, nous avons recherché une autre façon d'évaluer l'impact de la ventilation sur l'amélioration de la température de confort, en utilisant la température équivalente. Cela nous permettra de mettre en oeuvre des vitesses de l'air plus importantes.

La température équivalente est une température qui conduit, dans un environnement donné, aux mêmes échanges thermiques que l'Homme aurait, s'il était dans un environnement homogène, en air calme

La température équivalente est un critère particulièrement intéressant et correspond en fait à ce que donne le mannequin calorimétrique : calibré en climat homogène ($T_a = T_r$) à faible vitesse d'air ($V_a < 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), il mesure le flux perdu par effet Joule qu'il convertit, quelle que soit l'origine (température, vitesse d'air, vêtement) en température équivalente. Ces données sont intéressantes pour :

- l'estimation des effets locaux des paramètres ambiants ;*
- les effets des améliorations apportées par des modifications sélectives locales ;*

(CANDAS)

La formule empirique permettant de calculer la température équivalente est :

$$T_{eq} = 0,55 \times T_a + 0,45 \times T_{mr} + ((0,24 - 0,75 \times V_a^{0,5}) / (1 + I_{cl})) \times (36,5 - T_a)$$

(T_a et T_{mr} étant respectivement la température de l'air et la température moyenne de rayonnement en °C, I_{cl} la résistance de l'habillement, et V_a la vitesse de l'air)

Donc tous les autres paramètres étant fixes, il s'agit de faire varier un seul paramètre (la vitesse de l'air) pour voir son impact sur la température par rapport à la température perçue en air calme (hc_0)

A partir de la température maximale d'inconfort de 33,6°C dans le bâtiment en maçonnerie et tôle en janvier, dans un environnement homogène, on regarde l'impact sur la température d'une augmentation de la vitesse de l'air.

T_a (°C) = 33,60
 T_{mr} (°C) = 33,60
 I_{cl} (clo) = 0,300 (= 0,047 m².°C/W)

Va (m/s)	T_{eq} (°C)	Delta T
0,2	33,39	0,21
0,5	32,95	0,65
0,8	32,64	0,96
1	32,46	1,14
1,2	32,30	1,30
1,4	32,16	1,44
2	31,77	1,83

On constate qu'une convection forcée (utilisation de ventilateur) à 2m/s permet de faire baisser la température de l'air de 1,83°C.

VII. LA CAMPAGNE DE MESURES THERMIQUES

Une campagne de mesure thermique consiste à mesurer les températures intérieures des bâtiments pendant plusieurs mois. Pour cela, des thermomètres sont mis en place, permettant de relever à une fréquence définie les différentes températures.

Dans le cas de la VN cette campagne est indispensable pour déterminer en dehors de tout modèle théorique les températures in situ dans les bâtiments et déterminer quelles sont les réelles conditions de confort qu'offrent ces bâtiments.

1. QUELLES TEMPERATURES MESURER ?

Dans notre cas, nous sommes intéressés par la mesure de la température de l'air et par celle des la température des parois.

Il aurait été intéressant de mesurer aussi la température du globe noir pour calculer la température moyenne radiante mais cette dernière s'approxime bien en connaissant les températures des parois.

2. OU MESURER CES TEMPERATURES ?

La milieu n'étant certainement pas homogène (contrairement à notre hypothèse), il y aura une différence entre la température près du sol et la température au niveau de la voûte.

Par ailleurs, les épaisseurs des murs pignons et des murs porteurs étant différents il y aura une différence de température sur les 2 types de parois.

Nous proposons donc pour chaque bâtiment VN de mesurer :

- la température de l'air ambiant au centre de la VN
- la température des parois au pied et au sommet d'un mur porteur
- la température des parois au pied et au sommet d'un mur pignon.

3. LES INSTRUMENTS DE MESURE

Pour les mesures de températures dans les bâtiments VN, il n'est point besoin de matériels trop sophistiqués, car il s'agit juste de mesurer les températures de l'air et des parois.

Il importe que le matériel soit robuste et résistant à la poussière.

Pour des raisons de logistiques, un enregistreur de températures dont les valeurs sont ensuite directement relevées sur les ordinateurs nous semble pertinent.

Il existe sur le marché plusieurs catégories de ces enregistreurs que nous allons présenter ici.

a. Mesure de la température ambiante

Des petits « data-loggers », permettent d'enregistrer dans le temps l'évolution d'une température. Leur taille est celui d'une boîte d'allumettes ou d'une grosse clé USB. Ils peuvent contenir plusieurs milliers de données de température. La fréquence d'enregistrement se programme (1 mesure toutes les minutes, ou toutes les 20 minutes, par exemple) et un câble permet de transférer ensuite vers un PC les données, d'une manière similaire à celle que permet de transférer vers un PC les données.

Une exploitation des résultats par Excel est alors possible.

Nous présentons 2 data loggers USB, le second présentant un écran LCD permanent de lire en direct la température.

PCE-HT 71N, 66 euros TTC





EL-USB-2-LCD, 75 euros TTC

b. Mesure de la température des parois

La technologie infrarouge

La technologie infrarouge mesure la longueur d'onde dans l'infrarouge émise par la surface visée, éventuellement corrigée par le facteur d'émissivité du matériau considéré. Ainsi sa température peut être déduite. Sans contact, cette mesure est très facile à réaliser, très rapide, mais est limitée aux surfaces et n'est pas très précise. Cependant les résultats obtenus ne sont pas toujours simples à analyser par des profanes et la température déduite peut s'avérer erronée. Par ailleurs cet outil ne dispose pas d'enregistreur sur le long terme et est à usage ponctuel. Nous avons donc fait l'option de ne pas proposer de thermomètre infrarouge étant donné le contexte dans lequel se passeront les mesures.

Les enregistreurs avec sonde externe

Etant donné que l'enregistrement automatiquement des données est une contrainte forte de l'association AVN, nous proposons pour la mesure des températures des parois des enregistreurs avec des sondes externes qui pourront être fixées par un petit dispositif contre les parois. L'enregistreur qui peut conserver des milliers de données peut être à une ou plusieurs voies permettant de mesurer par les sondes 1 ou plusieurs températures simultanément.

Nous proposons 2 modèles d'enregistreurs à sonde : le premier est à 2 voies et le deuxième à 4 voies.



LOG110EXF, 179 € TTC

« Cet enregistreur est équipé d'une sonde externe température/humidité dotée d'un cordon de 2m permettant d'éloigner le boîtier de l'enregistreur de l'emplacement de la sonde. Il enregistre jusqu'à 60000 données avec une fréquence ajustable allant d'une seconde à 24 heures. Logiciel PC et câble USB fournis. LOG110EXF possède un écran LCD et calcule la température du point de rosée. On peut lui ajouter une sonde de température externe supplémentaire (en option) »



DVT4, 369 € TTC

« Cet enregistreur de température 4 voies, se caractérise aussi par une grande capacité mémoire et une autonomie électrique importante. Il possède une sonde interne et trois sondes externes livrées chacune avec 4,5m de câble (non extensible). L'écran graphique permet de visualiser l'évolution comparée des températures avant même leur transfert sur PC. Fourni avec un logiciel pour Windows et un cordon USB »

Sites des fournisseurs.

<http://www.littoclimate.net/enregistreurs-de-temperature,fr,3,39.cfm>

<http://www.pce-france.fr/>

<http://www.lascarelectronics.com/>

CONCLUSION

Le bâtiment en voûte nubienne est incontestablement plus apte à offrir le confort thermique que le bâtiment classique en maçonnerie et toit de tôle. Quelque soit la saison, l'inertie permet un fort écrêtage des températures dans les voûtes nubiennes, rendant ces dernières pratiquement stables sur la journée.

Par ailleurs pour les journées où les conditions de confort ne sont pas remplies, l'utilisation d'un ventilateur permettra d'améliorer de réduire la période d'inconfort.

La toiture étant une source importante d'apport de chaleur une ventilation de la toiture peut être envisagée.

Notons également que la forme de la VN est favorable à une ventilation par tirant d'air avec une ouverture au niveau du sommet de la voûte.

Nous retenons aussi l'idée du puits canadien dans un matériau pas trop onéreux pour ramener de l'air frais via la fraîcheur du sol à l'intérieur de la VN créant ainsi une source fraîche pour la ventilation.

Dans le cadre de cette étude nous avons considéré les bâtiments comme des milieux homogènes où la température ambiante est égale à la température radiante. En réalité ce n'est pas tout à fait le cas, nous ne disposons pas de mesures de ces températures in situ.

Une campagne de mesures est donc absolument nécessaire pour voir quel est le réel comportement du bâtiment en Voûte Nubienne et quels sont les écarts de la température ambiante par rapport à la modélisation et ce dans le but d'améliorer les conditions de vie dans ces éco-habitations.

BIBLIOGRAPHIE

- **CONFORT THERMIQUE** , *Victor Candas* (Techniques de l'ingénieur)
- **THERMAL CONFORT**, *Fanger*, 1973
- **ECONOMIE D'ENERGIE ET CONFORT THERMIQUE EN ZONE TROPICALE** par *T. Djiako et Y. Jannot*, 1992
- Norme ISO 7730
- www.deparisnet.be
- **BIOCLIMATISME ET PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATIMENTS**, *Armand Dutreix*
- Cours sur le principe de superposition :
<http://diamonddust.free.fr/TD%20COURS%20PLEIADES/inertie1.pdf>
http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/M22C_cours3.pdf
www.planete-sciences.org/enviro/archives/rnste6/ateliers/.../inertie.ppt
- **EFFICACITE ENERGETIQUE CLIMATISATION EN MILIEU TROPICAL** : Institut de l'Energie et de l'environnement de la francophonie
- **ENERGIE SOLAIRE POUR LE CHAUFFAGE, LES CONCEPTS FONDAMENTAUX** (Techniques de l'ingénieur)
- <http://www.energieplus-lesite.be>