

Performances thermiques d'une maison solaire

Nor Benradouane* et Boumediene Benyoucef

Laboratoire Energies Renouvelables, Unité Matériaux et Energies Renouvelables,
Université Abou Bakr Belkaid, B.P. 119, Tlemcen

(reçu le 24/05/05 ; accepté le 07/02/06)

Résumé - Compte tenu de l'épuisement des énergies utilisées actuellement, telles que les énergies fossiles, et du constat établi par les experts concernant les exigences écologiques, il est nécessaire de trouver des nouvelles sources d'énergies afin de préserver les ressources planétaires pour les générations futures. Dans le contexte actuel, l'énergie solaire est de loin la plus intéressante et la plus avantageuse. Notre objectif est de l'utiliser dans l'habitat. Ainsi notre travail consiste en une conception et adaptation d'une maison thermo - solaire, qui permet un stockage suffisamment important de la chaleur qui provient des rayons solaires, de façon à se passer des énergies d'appoint, en utilisant des dispositifs nécessaires pour une autonomie totale tel que le dimensionnement et l'orientation des murs, par rapport au soleil, les matériaux solaires utilisés et l'aspect architectural de la maison.

Abstract - Taking into account the exhaustion of energies used currently, such fossil energies, and report established by the experts concerning the ecological requirements, it is necessary to find new sources of energies in order to preserve the planetary resources for the future generations. In the current context solar energy is by far most interesting and most advantageous. Our objective is to use it in the dwelling. Thus our work consists of a design and adaptation of a solar thermal house; who allows a sufficiently significant storage of the heat which comes to us from the rays solar, in order to cancel the utilisation of auxiliary energy, by using devices necessary for a total autonomy such as the dimensioning and the orientation of the walls, by contribution with the sun, solar materials used and the architectural aspect of the house.

Mots clés: Energie solaire - Transfert thermique - Stockage thermique - Chauffage / climatisation - Orientation et dimensionnement de la maison.

1. INTRODUCTION - PROBLEMATIQUE

L'architecture solaire ou bioclimatique est aujourd'hui sortie de l'anonymat. Divers prototypes de maisons solaires ont été réalisés à travers le monde depuis des années. Des maisons solaires ont été également commercialisées en France, aux Etats-Unis, en Australie, et au Japon. Le premier brevet de maison solaire du professeur Trombe (CNRS) date de 1956. Ces travaux ont permis de la faire connaître. Mais elles ont aussi permis d'observer, de faire des mesures et de dégager une nouvelle philosophie de la conception des maisons et de l'équilibre financier.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important. Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) de notre pays s'intéresse à l'autonomie des maisons solaires en site isolé.

L'Unité de Recherche de Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) de l'Université de Tlemcen s'est orientée récemment vers l'architecture solaire en vue d'une conception adaptée aux constructions des maisons photo-solaires.

Une maison devrait nous protéger du soleil, de la pluie, du vent et nous garder au chaud et à l'aise. Elle devrait également être solide et durable. De nombreux facteurs interagissent pour répondre à ces besoins, notamment, l'environnement extérieur, les installations techniques (chauffage, climatisation, ventilation), les occupants et l'enveloppe de cette habitation.

L'enveloppe, qui constitue l'enceinte de la maison nous protège de ces éléments, elle comprend :

- les fondations et le plancher du sous-sol
- les murs au-dessus du niveau du sol
- la toiture
- les fenêtres et les portes.

On attend beaucoup de l'enveloppe : elle doit fournir un support structural aux murs et aux toits, empêcher la structure de se détériorer, permettre un éclairage naturel à l'intérieur et offrir une voie d'entrée et de sortie. En effet, l'enveloppe de la maison doit séparer l'environnement intérieur chaud et confortable du climat extérieur. Pour protéger notre environnement intérieur, l'enveloppe doit contrôler le flux de chaleur, d'air et d'humidité de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur.

* nahnor@yahoo.fr

La démarche conceptuelle que nous proposons comprend deux étapes :

1. un travail sur l'estimation énergétique du site,

2. un travail sur l'enveloppe visant à réduire les besoins en adoptant d'une part des mesures conservatoires allant généralement au-delà du cadre réglementaire, et en recherchant d'autre part à bénéficier au maximum d'apports solaires.

Notre travail consiste en une conception et adaptation d'une maison solaire au site de Tlemcen.

1.1 Inertie thermique (ou la masse thermique)

C'est le potentiel de stockage thermique d'un local ou d'une maison. C'est la capacité d'un bâtiment à emmagasiner de la chaleur (ou de la fraîcheur). La propriété des constructions à forte inertie est de conserver une température stable et de se réchauffer ou se refroidir très lentement, alors que les constructions à faible inertie suivent sans amortissement ni retard les fluctuations de la température. Cette inertie peut être une inertie de transmission (à travers les parois soumises à l'exposition solaire) ou une inertie d'absorption (capacité à stocker la chaleur du local dans les parois internes ou périphériques).

Les enjeux de l'inertie thermique sont de deux ordres :

- ◆ L'un étant de l'ordre de la sensation : l'amélioration du confort thermique en été;
- ◆ L'autre étant d'ordre économique : la réduction des consommations.

Il est noté que tous deux ont un impact immédiat sur l'environnement, puisque réduire les consommations implique nécessairement une diminution de la facture énergétique.

1.2 Les matériaux

L'inertie thermique est liée aux matériaux et à la manière dont ils constituent un bâtiment. Les principales notions physiques des matériaux, regroupées derrière le terme d'inertie thermique, participent au bon rendement, à la bonne utilisation et au confort de la machine thermique qu'est aussi l'habitat.

En pratique, les "isolants" et les matériaux "transparents" ne sont pas parfaits, mais des progrès récents dans les procédés de fabrication ont permis d'améliorer les performances, comme l'extrusion des épaisseurs très faibles des polymères, les structures ainsi obtenues ont été utilisées pour recouvrir des "mares solaires", bassins de stockage pour des systèmes collectifs d'eau chaude sanitaire. Ces technologies créent ainsi de nouvelles possibilités dans le domaine du solaire thermique, en permettant d'atteindre des rendements plus élevés et de diminuer les pertes. Donc le tout est de faire un bon choix de matériaux de construction à utiliser.

2. ISOLATION ET DEPERDITION THERMIQUE D'UNE MAISON

2.1 Modèles de transferts de chaleur

Différentes voies ont été explorées, afin de minimiser les pertes thermiques par conduction, convection, et rayonnement de grande longueur d'onde, tout en maximisant la transmission du rayonnement visible et proche infrarouge.

Au niveau des portes et fenêtres (les ouvertures de la maison), les transferts thermiques s'effectuent par convection (ou advection) et diffusion dans le mélange gazeux. Ainsi, le flux de chaleur au travers d'une ouverture liant les zones i et j aux températures T_i et T_j s'écrit [1]:

$$\Phi_{i \rightarrow j} = (\dot{m} - C_p T_j + \dot{m} + C_p T_j) - \lambda \frac{e h}{l} (T_i - T_j) \quad (1)$$

Le transfert de thermique à travers l'enveloppe du bâtiment s'effectue par conduction, convection et rayonnement. Au niveau des surfaces de chaque élément de paroi, le bilan d'énergie entre ces trois formes de transferts peut s'écrire :

$$\Phi_{\text{conv}} + \Phi_{\text{ray}} = \Phi_{\text{cond}} \quad (2)$$

Cela veut dire que les flux de convection et de rayonnement reçus par les surfaces doivent équilibrer le flux de conduction. Pour calculer ces différents flux, nous utilisons les modèles suivants :

2.1.1 Pour le transfert conductif dans les parois

La méthode utilisée pour modéliser les phénomènes conductif est celle des volumes finis. La paroi est discrétisée en n éléments. On écrit alors l'équation de la chaleur dans chaque élément :

$$\rho_i \cdot C_{pi} \cdot e_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \Phi_{i-j,i} + \Phi_{i+1,i} \quad (3)$$

L'autre formulation qui est plus simplifiée est donnée par un modèle basé sur une analogie électrique qui est représentée par la figure 1 [2] :

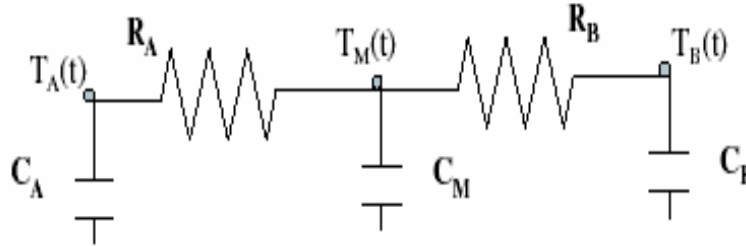


Fig. 1: Modèle de conduction

Les résistances thermiques sont calculées de la façon suivante :

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k} \quad R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k} \quad \text{et } n = n_A + n_B \quad (4)$$

Les capacités quant à elles sont déterminées comme suit :

$$C_A = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C_{pi} e_i (1 - \beta_i) \quad C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{pj} e_j \delta_j$$

$$C_M = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C_{pi} e_i (\beta_i) + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{pj} e_j (1 - \delta_j) \quad (5)$$

$$\text{avec } \beta_i = \frac{\frac{e_i}{2\lambda_i} + \sum_{k=n}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k}}{R_A} \quad \text{et} \quad \delta_j = \frac{\frac{e_j}{2\lambda_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k}}{R_B}$$

L'utilisation correcte de ce modèle implique la détermination d'une valeur optimale pour l'épaisseur et comme nous pouvons le remarquer ce modèle est donc particulièrement attractif de par la simplicité de sa formulation. Néanmoins, la détermination de ses paramètres doit être effectuée pour chaque type de parois rencontrées dans le bâtiment.

2.1.2 Pour le transfert convectif aux abords d'une paroi

Quant au flux convectif, il est déterminé de la manière suivante [3] :

$$\Phi_{\text{conv}i \rightarrow u} = h_{cu} S_u (T_u - T_{su}) \quad (6)$$

2.1.3 Pour le transfert radiatif

Habituellement en thermique du bâtiment nous distinguons deux bandes spectrales : de courtes et grandes longueurs d'onde. La méthode utilisée pour ces deux modes de transferts est la méthode dite "de l'enceinte fictive" [4]. Elle consiste à faire l'hypothèse que chacune des surfaces de la pièce échange avec une surface fictive étant définie comme la réunion de toutes les autres surfaces de la pièce. Une seconde méthode basée sur le calcul d'une température rayonnante moyenne est également largement utilisée dans l'approche nodale [5]. La température rayonnante moyenne T_{rm} s'exprime alors par :

$$T_{rm} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{rmi} S_i T_{Si}}{\sum_{i=1}^n h_{rmi} S_i} \quad (7)$$

Le coefficient de transferts radiatifs linéarisé associé s'écrit :

$$h_{rmi} = 4\sigma \left(\frac{T_{rm} + T_{Si}}{2} \right)^3 \quad (8)$$

Il est alors possible de déterminer le flux net perdu par l'élément de paroi i de surface S_i :

$$\Phi_{\text{net GLOi}} = h_{\text{rmi}} S_i (T_{\text{Si}} - T_{\text{rm}}) \quad (9)$$

2.2 Le Coefficient de transmission thermique k des parois opaques

Le coefficient k d'un mur :

$$k = \frac{1}{R_T} \quad \text{W/m}^2\text{K} \quad (10)$$

soit :

$$\begin{aligned} R_T &= \text{résistance thermique totale du mur (m}^2\text{K/W)} \\ *R_T &= R_{\text{se}} + R + R_{\text{se}} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (\text{murs extérieurs}) \\ *R_T &= R_{\text{si}} + R + R_{\text{si}} \quad (\text{m}^2\text{K/W}) \quad (\text{murs intérieurs}) \end{aligned}$$

2.2.1 Résistance thermique des couches de construction homogènes (R)

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{m}^2\text{K/W} \quad (11)$$

2.2.2 Résistance thermique des couches d'air (R_a)

Parmi les couches d'air typiques définies par la norme figurent les vides d'air, ventilés ou non, dans les murs creux, les lames d'air dans les murs creux, les espaces clos dans les plafonds ou les toitures, ..., quand aux faux plafonds fermés non étanches à l'air, les lames d'air à l'intérieur des doubles vitrages, les vides des blocs de construction et les grands espaces ne sont pas considérés comme des couches d'air [6].

La résistance thermique des couches d'air (valeur R_a) dépend de l'épaisseur de la couche d'air, de la direction du flux de chaleur et du degré d'aération prévu dans la couche d'air concernée.

2.3 Les performances des fenêtres

Récemment, on a pu enregistrer des progrès notables concernant divers aspects du châssis et du verre; citons entre autre :

- L'amélioration des performances énergétiques en période hivernale ;
- Le contrôle des gains solaires, un aspect de plus en plus étudié, d'une part, en réponse aux nombreux aspects, entrent en jeu lorsqu'on évalue les performances d'un vitrage sous l'angle de l'énergie et du confort :
 - l'isolation thermique
 - les gains solaires et leur maîtrise
 - la transmission de la lumière
 - l'acoustique.

2.3.1 Les facteurs de performance d'une vitre

On trouve ci-dessous la définition des différents facteurs permettant d'exprimer les performances des fenêtres en matière d'isolation thermique et d'apports solaire et lumineux.

La valeur k - L'isolation thermique s'exprime par le coefficient de transmission thermique k (W/m²K), qui dépend non seulement du coefficient de transmission thermique du vitrage lui-même mais aussi du coefficient de transmission thermique du châssis et des effets de bords dus aux intercalaires des vitrages multiples.

Le facteur solaire absolu (FSA) - Le facteur solaire absolu FSA ou transmission d'énergie totale, indique la fraction du rayonnement solaire incident pénétrant dans l'ambiance intérieure sous forme de chaleur.

Le facteur lumineux absolu (FLA) - Le facteur de transmission lumineuse absolu FLA est la fraction de la densité de rayonnement lumineux incident qui traverse le vitrage.

2.3.2 Isolation thermique d'une vitre

On peut améliorer l'isolation thermique du vitrage on ajoutant une couche d'air close entre deux panneaux de verre à une certaine distance l'un de l'autre.

Le vide ne règne pas dans la lame séparant les feuilles de verre d'un double vitrage. Cet espace est rempli d'air maintenu sec afin d'éviter les problèmes de condensation.

Le transfert de chaleur dans la lame d'air se fait par conduction, par rayonnement et, dans le cas d'une lame plus large, également par convection.

2.3.3 Détermination du coefficient k_f des fenêtres

Les fenêtres exercent une influence importante sur le niveau d'isolation, le coefficient k_f des fenêtres étant nettement plus élevé que celui des murs opaques isolés.

Le coefficient k d'une fenêtre dépend du coefficient k du verre, du coefficient k du châssis et du coefficient linéique k de l'intercalaire. Pour cela nous vous proposons les deux méthodes les plus utilisés pour déterminer ce coefficient.

2.3.3.1 La méthode exacte

Dans le cas de la méthode exacte, la valeur k_f de chaque fenêtre est déterminée de manière distincte, sur base des dimensions effectives du vitrage et du châssis. Cette méthode peut s'appliquer dans tous les cas. La valeur k_f se calcule selon la formule suivante :

$$k_f = \frac{A_{vc} k_{vc} + A_{ch} k_{ch} + A_{pc} k_{pc} + L_p k_L}{A_{vc} + A_{ch} + A_{pc}} \quad W/m^2K \quad (12)$$

2.3.3.2 La méthode simplifiée

La méthode simplifiée peut s'utiliser pour les habitations unifamiliales ainsi que pour les immeubles à appartements comptant au maximum 5 appartements [7]. Dans ces cas, on suppose, pour simplifier, que le rapport entre la surface vitrée et la surface de fenêtre correspond à un pourcentage fixe pour tous les châssis, soit 75 % dans le cas des châssis métalliques et 70 % dans le cas des châssis en bois ou en plastique. Le calcul de la valeur k_f peut donc être simplifié de la manière suivante :

Châssis métalliques

$$k_f = 0.75 k_{vc} + 0.25 k_{ch} + 3 k_L \quad (13)$$

Châssis en bois et en plastique

$$k_f = 0.75 k_{vc} + 0.30 k_{ch} + 3 k_L \quad (14)$$

3. MODELISATION D'UNE MAISON SOLAIRE A TLEMCEN

3.1 Le dimensionnement de la maison

Considérons une maison d'une surface S de 120 m² et d'un volume V (120.3) de 360 m³, et de 360 kg d'air à chauffer. Le principe de l'équation de chaleur suivant, qui nous a permis de calculer la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de cette masse d'air, est :

$$Q' = m C_p \Delta T \quad (15)$$

où: Q' : Quantité de chaleur restante (kcal) donnée par la formule suivante :

$$Q' = Q_{inc} - \left(\sum S_{op} K_{op} (T_i - T_e) + \sum S_{vitres} K_{vitres} (T_i - T_e) \right) + 0.34N(T_i - T_e) \quad (16)$$

Sachant que pour élever la température à l'intérieur de la maison de 1 °C, il nous faut :

$$Q = 360 \cdot 0.22 \cdot 1 = 79.2 \text{ kcal}$$

Les résultats obtenus par le programme de simulation que nous avons réalisé, des calculs relatifs à l'incidence énergétique solaire, ainsi que les déperditions thermiques à travers les parois et les surfaces vitrées de la maison, nous permettent de définir les paramètres de dimensionnement des capteurs solaires (parois et vitrages) afin d'obtenir une température adéquate en toute saison.

3.2 Pour la façade Sud

Dans ce cas, on a choisi la brique comme matériau de construction. L'épaisseur du mur est fixée à 20 cm, on a fait varier la surface des vitres de 5 à 20 m² pour pouvoir dimensionner les ouvertures sur les façades selon nos besoins.

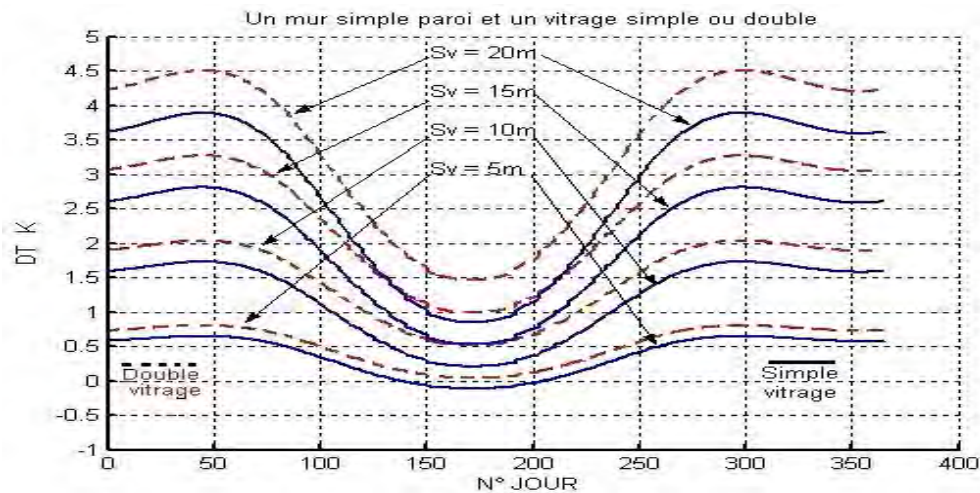


Fig. 2: Différence de température à l'intérieur de la maison (simple et double vitrage)

Comme représenté sur la figure 1, les courbes en rouge nous montrent l'élévation de la température pour un double vitrage; le maximum atteint est de 4.5 °C avec 20 m² surface vitrée en période hivernale. Quand aux courbes en bleu, représente un simple vitrage; le maximum atteint est de 3.8 °C à la même période (hiver).

Pour un mur double paroi (10-5-10), le résultat obtenu par le programme de simulation est représenté en figure 3.

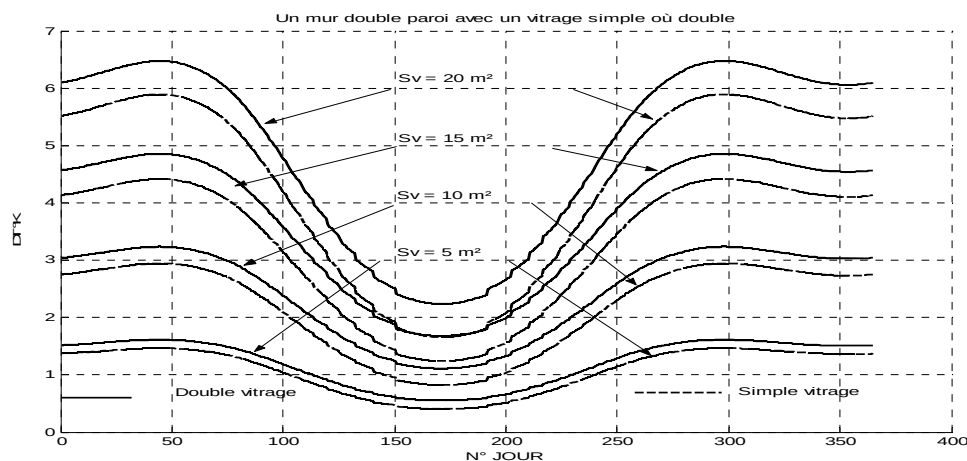


Fig. 3: Différence de température à l'intérieur de la maison (simple et double vitrage)

Les courbes en lignes continues (Fig. 3) représentant le double vitrage nous permettent une élévation de température égale à 6.4 °C, alors qu'avec un simple vitrage, courbes en lignes discontinues on ne peut avoir que 5.6 °C en hiver (avec 20 m² de vitrage).

3.3 Pour les façades Est et Ouest

Pour un mur simple paroi (0.20 m), nous représentons les résultats par la figure 4. Comme nous pouvons le constater sur cette figure 4, l'utilisation d'un simple vitrage (courbes en bleu) nous fait gagner 2.5 °C en été, et avec un double vitrage (courbes en vert) on a jusqu'à 3.2 °C, ce qui n'est pas avantageux compte tenu du but recherché (gain en hiver mais pas en été).

Pour un mur double paroi (10-5-10), le résultat obtenu par le programme de simulation est représenté en figure 5. L'utilisation du mur à double paroi (Fig. 5) avec simple et double vitrage nous font bénéficier d'une élévation de température en été jusqu'à 3.8 °C pour le premier (courbes en lignes discontinues) et 4.5 °C pour le deuxième (courbe en lignes continues), ce qui n'est pas du tout favorable pour le confort d'été.

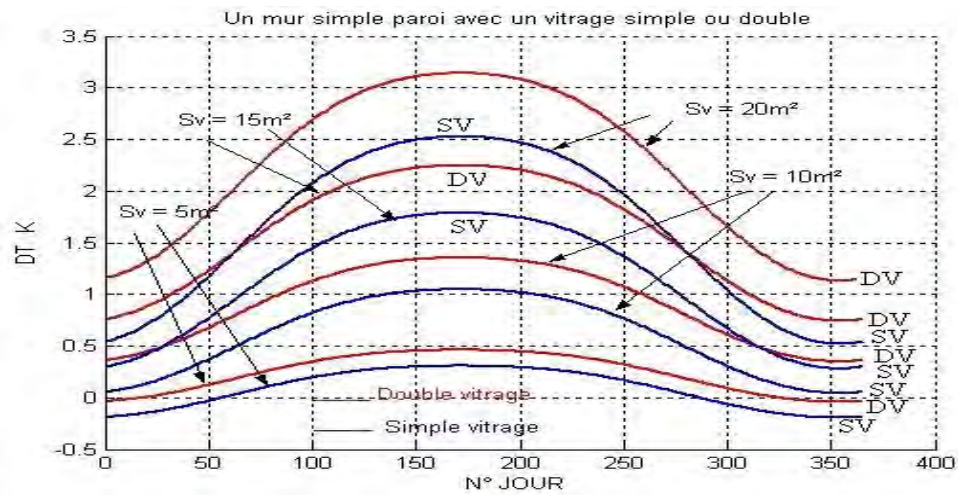


Fig. 4: Différence de température à l'intérieur de la maison (simple et double vitrage)

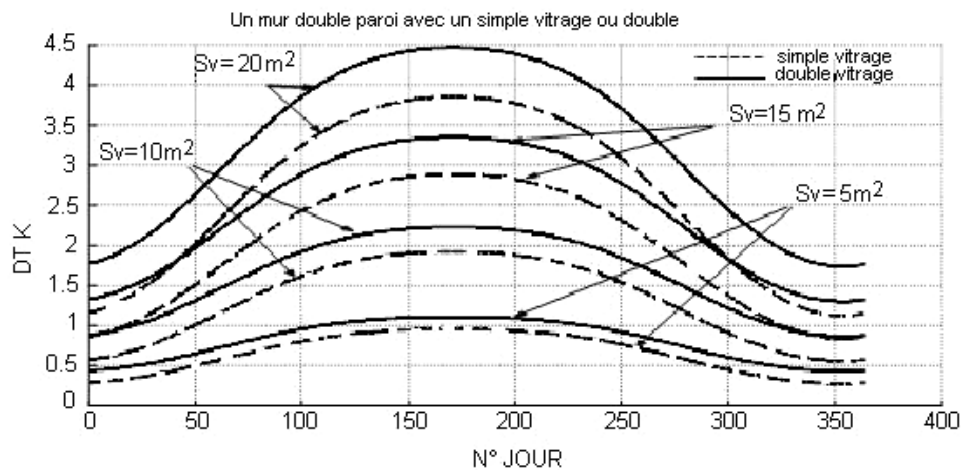


Fig. 5: Différence de température à l'intérieur de la maison (simple et double vitrage)

3.4 Pour le toit

Sachant que les matériaux utilisés sont le béton ($\lambda = 1.75 \text{ W/m}^2$) et l'ourdie ($\lambda = 1.1 \text{ W/m}^2$), les résultats obtenus sont en figure 6.

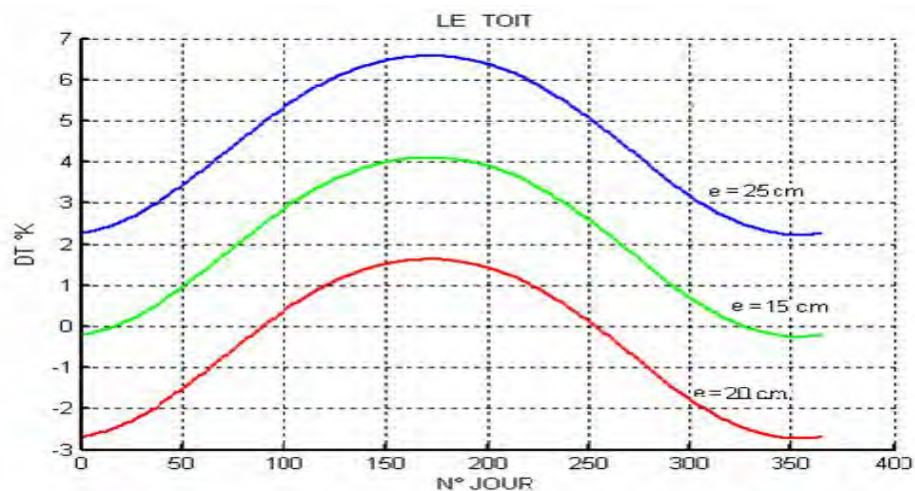


Fig. 6: Différences de température à l'intérieur de la maison

L'élévation de la température obtenue par le toit à différentes épaisseurs (15, 20, 25 cm) est de 1.7, 4 et 6.5°C respectivement comme illustré sur la figure 5.

3.5 Bilan énergétique de la maison

Compte tenu de ce qui précède, les critères de conception de la maison solaire sur le site de Tlemcen, il nous apparaît utile d'apporter certaines précisions que nous jugeons importantes :

1. Orientation plein sud,
2. Dimensionnement.

Soit pour la façade Sud d'une surface de 30 m² dont 20 m² en double vitrage et 10 m² en double paroi, l'augmentation de température obtenue à l'intérieur est de :

- de 5 à 6.5 °C en période hivernale,
- de 2 à 3° en période estivale.

Pour la façade Est, la conception de la façade est tout autre à savoir, pour une surface de 36 m² dont 5 m² en double vitrage et 31 m² en double paroi, l'augmentation de la température est de

- de 1 à 2 °C en période hivernale,
- de 2 à 3 °C en période estivale.

Ce qui s'applique à la façade Ouest.

Pour le toit d'une surface de 120 m², sa contribution à l'élévation de la température est importante plus en été qu'en hiver, puisqu'il est constaté pour la période hivernale une augmentation de 2.3 à 5 °C et en période estivale de 5 à 6.7 °C.

Il va de soi que le manque d'avantages en incidence solaire sur la façade Nord nous incite à minimiser au maximum les surfaces vitrées. Comme il est défini sur la figure 7.

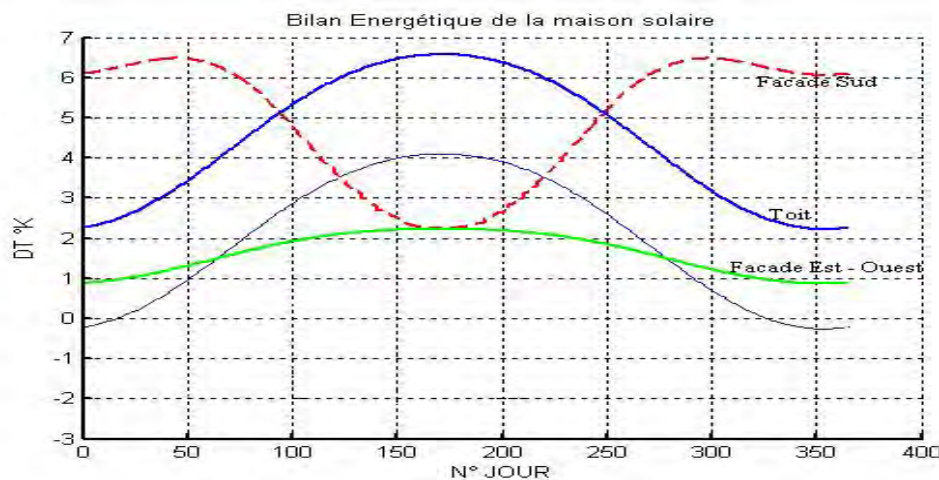


Fig. 7: Bilan énergétique de la maison

4. CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons développé le concept d'une maison solaire pour une adaptation au site de Tlemcen.

- Nous avons modélisé d'une part les trois modes du transfert thermique, et d'autre part les bilans énergétiques de la maison.
- Nos résultats ont montré que l'implantation, l'orientation et le dimensionnement jouent un rôle important dans l'optimisation des performances écono - énergétiques des maisons solaires.
- Ceci nous permet d'être renseigné sur l'utilité de l'orientation et le respect du dimensionnement du vitrage à utiliser sur la façade de la maison en fonction de son orientation : Sud, Est et Ouest.
- Au cas où des surchauffes seront constatées, il est toujours possible d'utiliser le système d'occultation, pour le toit il serait judicieux d'employer le système d'étanchéité.

NOMENCLATURE

Φ	Flux de chaleur (W)
C_p	Capacité calorifique de l'air ($J.kg^{-1}.^{\circ}C$)
$\dot{m}$	Débit massique de fluide ($kg^{-1}.s$)
e	Epaisseur
λ	Conductivité thermique (W/mK)
l	Longueur (m)
h	Hauteur (m)
e_k	Epaisseur de l'élément k (m)
β_i	Coefficient d'expansion volumétrique (K^{-1})
δ_j	Epaisseur de la couche limite (m)
ρ_{ij}	Masse volumique du fluide (kg/m^3)
h_{cu}	Coefficient d'échange convectif dans la direction u ($W/m^2.^{\circ}C$)
h_{rm}	Coefficient d'échange radiatif linéarisé ($W/m^2.^{\circ}C$)
S_u	Surface de la paroi u (m^2)
S_i	Surface (m^2)
T_{su}	Température de la surface d'orientation u (K)
T_u	Température de la zone u (K)
T_{si}	Température de la surface i (K)
T_{rm}	Température rayonnante moyenne (K)
σ	Constante de Stefan
k_f	Coefficient k de la fenêtre dans son ensemble (W/m^2K)
A_{vc}	Surface de la partie visible de la vitre posée (m^2)
k_{vc}	Coefficient k de la partie médiane de la vitre (W/m^2K)
A_{ch}	surface de projection du châssis sur un plan parallèle à la vitre (m^2)
k_{ch}	Coefficient k du châssis ou du profilé (W/m^2K)
A_{pc}	surface de la partie visible du panneau de remplissage opaque (m^2)
k_{pc}	Coefficient k des éléments de remplissage opaques (W/m^2K)
L_p	Longueur du pourtour des parties apparentes des éléments de remplissage (verre ou panneaux opaques), (m)
k_L	Coefficient linéique de conductivité thermique, indiquant l'influence exercée sur k_f par l'intercalaire éventuellement présent dans le vitrage ou dans l'élément de remplissage (W/mK)
M	Masse d'air (kg)
N	Apport humain = 0.34

REFERENCES

- [1] F. Allard, "Contribution à l'Etude des Transferts de Chaleur dans les Cavités Thermiquement Entraînées : Application aux Cellules d'Habitation", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, INSA de Lyon, France, 1987.
- [2] P. Rumianowski, J. Brau and J.J. Roux, "An Adapted Model for Simulation of the Interaction Between a Wall and the Building Heating System", In "Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV Conference", pp. 224 – 233, Orlando, USA; 1989, repris par (Cron, Inard et Belarbi, 2003).
- [3] G.E. Whittle, "Computation of Air Movement and Convective Heat Transfer within Buildings", International Journal of Ambient Energy, 3, pp. 151 – 164, 1986.

- [4] G.N. Walton, *“A New Algorithm for Radiant Exchange in Room Loads Calculations”*, ASHRAE Transactions, 86 (2), pp. 190 – 208, 1980.
- [5] F. Cron, C. Inard and R. Belarbi, *“Numerical Analysis of Hybrid Ventilation Performance Depending on Climate Characteristics”*, International Journal of Ventilation, 1 Special Edition, pp. 41 – 52, 2003.
- [6] M. Blais, *“Enveloppe des Bâtiments”*, Notes du Cours- 19141, Québec: Université Laval, Faculté d’Aménagement, d’Architecture et des Arts Visuels, École d’Architecture, 2003.
- [7] Etude SENVIVV, *“Les Fenêtres sous l’Angle de la Physique du Bâtiment”*, CSTC Magazine, Bruxelles, 1997.