

1970 17

**L'INERTIE DANS LA MAISON INDIVIDUELLE :
UN GAIN DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ?
SIMULATION ET ETUDE DE CAS**

**J. NICOLAS, PH. ANDRE, J.F. RIVEZ, V. DEBBAUT
FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE
AVENUE DE LONGWY, 185
B-6700 ARLON
BELGIQUE**

RESUME

L'inertie thermique dans l'habitat individuel est souvent étudiée dans le but de caractériser de façon générale la capacité des structures du bâtiment et en privilégiant l'effet de l'inertie sur le confort thermique. Cet article analyse l'influence de l'inertie sur les sommes d'argent dépensées annuellement par l'habitant pour son chauffage. La démarche est de se limiter à des conditions vraisemblables de matériaux, de structures, d'occupation et de climat. Pour ces cas, et pour différentes variantes d'inertie, de vitrage et d'occupation des locaux, les résultats de simulation démontrent que l'intérêt d'une grande capacité thermique est lié à l'importance des gains solaires, mais que les variations relatives de la charge thermique annuelle restent très modérées entre les cas extrêmes. L'analyse de mesures effectuées sur des bâtiments réels conduit par ailleurs à proposer un concept intéressant d'activation des masses passives en soufflant l'air surchauffé des locaux à l'intérieur d'une dalle composite de béton et de cailloux.

SUMMARY

The study of thermal inertia in dwellings is often performed with the aim of characterizing the capacity of building elements, in general. Especially, the effect of the temperature lag on thermal comfort is quantified in this approach.

This paper analyses the influence of inertia on annual household expenses for heating. So, the approach is limiting the study to normal conditions for materials, structures, occupancy and climate.

In these circumstances and for various conditions of inertia, glazing area and occupancy schedules, the results of simulations show that a large thermal capacity is particularly justified when the solar gains are important.

Nevertheless, relative variations of annual heat load between the extreme cases remain low.

In a second step, the analysis of measurements performed on real buildings leads to a new concept : the activation of passive masses by blowing the overheated air from the rooms directly into a sandwich-slab made up of concrete and pebbles.

1 . INTRODUCTION

Parmi les différentes façons de diminuer les besoins en énergie de l'habitat individuel, celle qui consiste à favoriser les apports gratuits de chaleur est certainement digne d'intérêt. Le problème de la consommation de combustible se pose en effet sur une partie plus réduite de la charge thermique du bâtiment.

L'énergie du soleil, qui représente l'un de ces apports gratuits, peut être captée de façon active par des collecteurs solaires en façade ou en toiture, ou de façon passive en ménageant de larges ouvertures vitrées orientées sud.

Un autre principe d'utilisation rationnelle de l'énergie, qui est d'ailleurs souvent lié au précédent, est celui qui consiste à conserver au maximum la chaleur, gratuite ou non, dans des structures de stockage.

Pour l'habitat individuel, il fut préconisé, il y a quelques années, des systèmes de collecteurs solaires à air couplés à un volume de stockage constitué de lits de cailloux. L'énergie solaire passive, quant à elle, est souvent conservée dans des structures à haute inertie : dalle de sol, mur Trombe, plafonds épais, ...

Dans une étude précédente [1] [2], nous avons cependant montré que pour la maison individuelle, ce type de solution n'est pas toujours rentable, voire efficace.

Dans le cas envisagé, en effet, un tampon de 8 m³ couplé à 18 m² de collecteurs solaires à air en façade sud, bien qu'assurant une autonomie d'une journée pour la demi-saison,

ne fournit qu'une fraction très faible de l'énergie de chauffage, malgré un surcoût non négligeable.

Par ailleurs, pour ces mêmes habitations, il fut montré qu'une dalle de sol épaisse, utilisée comme capteur et stockage passif d'énergie solaire, s'avérait peu adéquate dans la mesure où seule la zone ensoleillée et une très faible épaisseur de dalle sont réellement utiles.

Le but du présent article est d'analyser l'intérêt de l'inertie dans l'habitat individuel et, si possible, de calculer un optimum de capacité calorifique des structures du bâtiment. Le critère de comparaison sera la consommation énergétique annuelle, en essayant de conserver invariantes les autres caractéristiques, telles que le confort ou la puissance installée.

Beaucoup d'études fort pertinentes ont été menées, soit au niveau de la caractérisation de l'inertie thermique [3], soit dans le but d'évaluer la relation gains solaires - inertie [4].

Ces études présentent l'intérêt de paramétriser les caractéristiques des éléments d'inertie dans le bâtiment, de façon générale, en dehors d'un contexte spécifique.

Elles insistent souvent sur l'influence de l'inertie sur le confort thermique en calculant notamment le déphasage qui minimise les variations de température intérieure [5] [6] [7].

Cependant, peu de publications sont consacrées à l'analyse de l'influence de l'inertie sur le "portefeuille de l'habitant", c'est-à-dire le surcoût des masses thermiques et le gain en consommation annuelle, pour une configuration ordinaire d'habitation unifamiliale.

Dans la présente démarche, nous conserverons à l'esprit que nous étudions un cas plausible d'une maison de taille moyenne placée dans des conditions vraisemblables.

L'accumulation de la chaleur sera envisagée avec comme objectif le filtrage des variations diurnes, c'est-à-dire que l'étude portera sur le stockage à court terme de l'énergie.

Nous tenterons de mettre objectivement en évidence la sensibilité des critères que l'intuition nous pousse à envisager dans une analyse de l'inertie : influence des apports gratuits, du taux d'occupation des locaux, de la stratégie de contrôle.

Comme il serait hors de question de faire varier toutes ces caractéristiques sur un cas réel, surtout si l'on désire que toutes choses restent égales par ailleurs, c'est la simulation sur ordinateur qui sera choisie comme méthode de travail.

Cependant, le cas de base étudié, sur lequel plusieurs variantes sont testées, sera très similaire à un cas réel : celui des maisons de Fosses-la-Ville, en Belgique, conçues par la société Solettra.

Et c'est précisément sur ces maisons, présentant une dalle sandwich béton/galets à haute inertie que sera envisagée la seconde partie de l'étude.

Nous tenterons dans cette partie de pousser le raisonnement plus loin en se posant la question : peut-on augmenter l'inertie de l'habitation en dehors des limites habituelles tout en continuant à augmenter l'efficacité de la fonction d'accumulation ? Pour cette étude, c'est la mesure qui constituera l'outil d'analyse : les données recueillies sur 13 maisons réelles, le traitement et la comparaison des résultats permettront d'évaluer l'intérêt du concept original.

2 . OUTIL DE MODELISATION

Le logiciel de modélisation employé dans le cadre de l'analyse est SUNCODE [8], développé aux USA par Ecotope, spécifiquement pour la simulation thermique de bâtiments solaires passifs. Il utilise un modèle nodal et une méthode de résolution par différences finies.

Le logiciel prend en compte les bâtiments multizones, il effectue une simulation dynamique sur base horaire et fournit le calcul détaillé des apports solaires, en tenant compte des obstacles au rayonnement (arbres, bâtiments, protections solaires).

SUNCODE a été préféré à d'autres logiciels, en particulier parce qu'il est bien adapté à l'étude des gains solaires (prise en compte de toutes les caractéristiques thermiques et optiques des vitrages), qu'il modélise également des systèmes de stockage en galets et leurs circuits de ventilation, ainsi que les murs de type "Trombe".

En outre, le logiciel (sous le nom SERIRES) a été validé sur des cellules-tests dans le cadre de la tâche VIII de l'AIE et il s'est avéré être l'un des meilleurs pour modéliser à la fois les gains directs, le mur Trombe et les vérandas [9].

3 . DESCRIPTION DE L'HABITATION : CAS DE BASE ET VARIANTES

Le cas de base simulé par le logiciel Suncode est une maison individuelle possédant un volume intérieur chauffé de 263 m³, une surface de plancher de locaux chauffés de 136 m² et une surface de déperdition de 142 m² (surface extérieure totale : 278 m²).

Les locaux chauffés sont, au rez-de-chaussée, la cuisine et l'ensemble salon-salle à manger ("séjour"), et à l'étage, 3 chambres et une salle de bain. Sept autres locaux (buanderie, garage, entrée, ...) sont contigus à ces zones, mais ne sont pas chauffés.

Ce type d'habitat est assez bien représentatif de la moyenne belge pour une famille de 4 à 6 personnes.

Le climat envisagé est celui de Bruxelles, soit un climat tempéré typique des latitudes européennes moyennes (environ 2000 degrés jours 15/15 normaux).

La façade principale de la maison est orientée plein sud et peut recevoir des ouvertures vitrées favorisant les gains solaires passifs. Les fenêtres sont équipées de double vitrage à haute émissivité (coefficient K de transmission thermique = 3 W/m²K) et sont munies de volets, que l'on ferme durant la nuit, en ramenant le coefficient K à 1,5 W/m²K.

Dans la présente étude, 5 variantes ont été envisagées en ce qui concerne la surface de vitrage sud. Ces variantes sont résumées dans le tableau 1

Tableau 1 : Répartition du vitrage sud pour les 5 variantes envisagées

Les deux cas extrêmes ne sont pas réalistes, mais sont utilisés comme références de façon à situer les limites des courbes de consommation. Seuls les 3 cas intermédiaires feront l'objet d'une discussion.

En ce qui concerne le profil d'occupation pour les 4 personnes habitant le bâtiment, 3 variantes ont été envisagées, elles sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Description des 3 variantes de profil d'occupation de l'habitation

L'horaire des habitants conditionne d'une part la consigne de température imposée dans la pièce de séjour (20° lorsqu'il y a présence d'une personne active au moins, 17° lorsque ces personnes dorment ou sont absentes) et d'autre part, le gain gratuit interne qu'on estime à 100 W par personne active. Dans une première approche, les chambres, situées à l'étage, sont maintenues de façon continue à 18°.

Enfin, 5 variantes d'inertie ont été testées : elles font volontairement référence à des structures de parois classiques qu'il est possible de rencontrer dans l'habitat de nos régions.

La figure 1 montre la structure des murs extérieurs, du radier du sol, du plancher entre rez-de-chaussée et étage, et du plafond sous les combles dans les 5 cas d'inertie considérés.

Fig. 1 : Définition des 5 niveaux d'inertie des parois (cotes en cm)

En résumé, les 5 variantes suivantes sont donc envisagées :

- une inertie très légère, avec des parois en bois, y compris pour les murs extérieurs,
- une inertie légère, où l'isolation des parois extérieures est placée vers l'intérieur de la maison,
- une inertie moyenne, où cette isolation est placée à l'extérieur,
- une inertie lourde, où l'on considère des épaisseurs de parois plus importantes et l'emploi de béton armé en plusieurs endroits en remplacement de blocs de béton ordinaires ou de hourdis,
- une inertie très lourde, où les épaisseurs ont encore augmenté et où le béton armé est le seul matériau de masse utilisé.

A l'instar des 2 variantes servant de référence pour la surface vitrée, les deux cas extrêmes d'inertie sont un peu moins réalistes que les 3 cas intermédiaires.

Ils n'ont été introduits dans l'analyse que dans le souci de mieux comprendre les phénomènes en considérant les limites basse et haute de l'inertie.

Ces 5 surfaces de vitrage sud, 3 profils d'occupation et 5 cas d'inertie ont été combinés selon 75 possibilités que le programme de simulation peut traiter.

Signalons qu'en dépit des variations de vitrage et d'inertie, le coefficient de déperdition thermique totale par degré d'écart entre l'ambiance intérieure et l'air extérieur ne varie que de 810 W/K (combinaison V10 et inertie forte) à 863 W/K (combinaison V50 et inertie moyenne) pour l'ensemble des 27 combinaisons vraisemblables intermédiaires. Ce facteur peut donc, en première approximation, être considéré comme variant peu autour de la valeur moyenne.

4 . PRINCIPAUX RESULTATS DE LA MODELISATION

4.1. FAIBLES VARIATIONS RELATIVES

La première constatation générale que l'on peut faire au vu de l'ensemble des résultats des simulations est la très faible variation relative de la consommation annuelle entre les différentes variantes envisagées.

Le tableau 3 montre les valeurs des consommations pour les 3 cas intermédiaires d'inertie (avec une surface de vitrage et une occupation moyennes), ainsi que pour les 3 cas intermédiaires de surface de vitrage et les 3 cas d'occupation pour une valeur moyenne des 2 autres variables.

Tableau 3 : Valeurs des consommations annuelles pour 3 cas d'inertie, 3 cas de vitrage sud et 3 cas d'occupation pour une valeur moyenne des 2 autres variables

On constate que, pour ces cas vraisemblables, la variation relative de consommation entre les cas extrêmes d'inertie ne vaut que 1.7 %, 1.2 % entre les cas extrêmes de surface vitrée et 4.6 % entre les cas extrêmes d'occupation.

Il convient donc de ramener à de justes proportions la notion d'efficacité de l'inertie, tout au moins si le critère choisi est la consommation annuelle.

En termes de sensibilité paramétrique à la masse totale de matériaux mis en oeuvre, on constate qu'à une augmentation de 70 % de la masse ne correspond qu'un gain de 1.7 % au niveau de la charge thermique annuelle.

L'influence de l'isolation et celle de la stratégie de contrôle (envisagée ici sous le point de vue de l'occupation) semblent bien plus importantes.

4.2. TENDANCES GENERALES

D'une manière générale, on peut faire les remarques suivantes :

- La consommation diminue lorsque l'inertie augmente : ceci est dû à l'effet de déphasage des parois qui permettent de restituer de l'énergie à un moment où le bâtiment en a besoin et ainsi de réduire l'amplitude des variations de la température intérieure.

La contribution bénéfique de l'inertie est cependant compensée par l'augmentation des masses à chauffer, ce qui tend, comme nous le verrons plus loin, à faire saturer la diminution de la consommation.

- La charge thermique annuelle diminue également lorsque la surface de vitrage augmente, puisque les gains solaires gratuits augmentent également, jusqu'à un optimum où cet effet bénéfique est compensé par les déperditions croissantes à travers les surfaces vitrées.
- Enfin, la consommation augmente aussi très logiquement et de façon quasi linéaire avec le temps d'occupation des locaux, puisque la période où la consigne de température est 20°C augmente également.

4.3. ADOUCISSEMENT DES EFFETS LOCAUX

Il convient également de noter que le critère choisi, c'est-à-dire la consommation annuelle totale moyenne pour un climat ordinaire, a tendance à raboter les variations et rendre pratiquement invisibles les effets locaux.

Il est certain que si les données météorologiques introduites dans le modèle ne correspondaient pas à une année-type, mais à une année exceptionnelle avec un hiver froid, mais ensoleillé, les résultats plaideraient davantage en faveur de l'inertie élevée.

On constate notamment (voir figure 2) que le gain de consommation réalisé durant les mois de demi-saison - mars, avril, mai et octobre - pour les cas d'inertie plus élevée, représente une très faible proportion du total si l'on inclut les consommations des mois d'hiver. L'analyse des apports solaires et de l'accumulation de la chaleur dans les bâtiments solaires passifs est classiquement menée pour ces périodes de demi-saison, lorsque l'ensoleillement est encore appréciable, alors que les locaux doivent être chauffés. Les conclusions sont souvent encourageantes. Cependant, il convient de tempérer ces résultats positifs par la consommation hivernale.

Figure 2 : Variation mensuelle de la charge thermique pour les 5 cas d'inertie, 50 % de vitrage sud et une occupation moyenne

Si un adoucissement des variations s'observe en fonction du temps, c'est une réelle compensation que l'on peut parfois observer entre locaux d'un même bâtiment.

Figure 3 : Comparaison de la charge thermique annuelle dans la pièce de séjour et dans la chambre située juste au-dessus en fonction du profil d'occupation (inertie et gains solaires moyens)

Comme le montre la figure 3, c'est l'effet de l'occupation, traduisant la stratégie de contrôle, qui cette fois doit être tempéré.

Si l'étude est réalisée uniquement sur la pièce de séjour, profitant d'un abaissement de la consigne de température en cas d'absence des habitants, les résultats de consommation annuelle montrent une augmentation de presque 20 % entre la charge correspondant au cas où les personnes ne sont actives dans le bâtiment qu'entre 18 et 23 heures et celle où il reste une personne au foyer durant toute la journée. Mais si l'on ajoute la

consommation annuelle de la chambre placée juste au-dessus du séjour, l'effet de l'occupation est pratiquement annulé : il est compensé par les transferts thermiques avec la chambre, maintenue de façon continue à 18°C.

4.4. RELATIONS ENTRE INERTIE, GAINS SOLAIRES ET OCCUPATION

Sur la figure 4, on peut observer que le taux d'occupation et l'inertie sont pratiquement des variables indépendantes l'une de l'autre. En effet, si la consommation annuelle totale est toujours considérée, les courbes de variation de cette consommation en fonction de l'inertie du bâtiment, et pour différents taux d'occupation, restent pratiquement parallèles. A une occupation plus intense correspond une charge plus importante, mais indépendamment de la masse des parois. La faible augmentation des gains internes lors d'une occupation plus intense ne compense pas la nécessité de chauffer davantage les locaux.

Figure 4 : Variation de la charge thermique annuelle en fonction de l'inertie pour les 3 profils d'occupation et 30 % de la surface vitrée sud.

Remarquons sur cette figure que la valeur choisie pour quantifier l'inertie en abscisse est une constante de temps thermique du bâtiment, définie comme le produit de la résistance par la capacité thermique totale, sans tenir compte, par exemple, de la place de l'isolation dans les couches formant les murs extérieurs. Cette valeur, bien que discutable, permet néanmoins de mettre en évidence les effets relatifs.

Si donc l'inertie ne modifie pas les différences de consommation dues à différents profils d'occupation, elle semble par contre liée aux gains solaires.

Sur la figure 5, on remarque en effet que la courbe de variation de la charge thermique en fonction de l'inertie s'aplatit lorsque la surface de vitrage diminue, pour devenir pratiquement une droite horizontale à gains solaires nuls.

Figure 5 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de l'inertie pour les 5 surfaces de vitrage et une occupation moyenne

Ce résultat met en évidence la sensibilité très faible de la charge thermique aux variations d'inertie lorsque les apports solaires sont supprimés. Dans notre cas de figure, le principal intérêt de l'inertie semble donc être de déphaser d'une demi-journée les gains extérieurs.

4.5. OPTIMUM D'INERTIE EN FONCTION DES GAINS SOLAIRES

L'analyse des courbes de la figure 5 amène une autre remarque. De façon générale, la forme de la courbe en S est assez caractéristique, comprenant un palier à basse inertie, une diminution de consommation pour les inerties intermédiaires et un second palier aux inerties fortes.

Cette forme en S se déplace vers les basses inerties, plus les gains solaires sont élevés, le premier palier sortant même du cadre de la figure à partir du cas V30.

Ce palier "basse inertie" s'explique par le fait que, en deçà d'une certaine constante de temps, le système "bâtiment" évolue de façon purement statique et répond de façon instantanée aux fluctuations extérieures. La masse thermique n'a dès lors aucune influence sur la consommation auxiliaire.

En termes mathématiques, on peut raisonner sur un système simple du premier ordre du type :

$$C \frac{dT}{dt} = K\Delta T + \alpha S + U \quad (1)$$

- où
- C est la capacité thermique du bâtiment (J/K)
 - T est la température (°C ou K)
 - t est le temps (sec)
 - K est le coefficient de déperdition globale (W/K)
 - ΔT est l'écart entre température intérieure et température extérieure (K)
 - α est l'ouverture solaire (m²)
 - S est la puissance d'ensoleillement (W/m²)
 - U est la puissance délivrée par le système de chauffage (W).

Dans cette relation, si C tend vers 0, le premier membre tend à disparaître et U ne dépend effectivement plus que de la différence de température ΔT .

Par ailleurs, lorsque l'ouverture solaire α augmente, le terme $C \frac{dT}{dt}$ devient plus rapidement négligeable devant les autres termes, ce qui explique que le palier se déplace vers la gauche lorsque les gains solaires augmentent.

Quant au palier "haute inertie", il s'explique comme une saturation : plus l'inertie augmente, plus le déphasage augmente, mais également, plus le signal est amorti et plus grande est la masse à chauffer. Si bien qu'il arrive un moment où une augmentation de l'épaisseur des parois ne correspond plus à un gain appréciable de la charge annuelle.

4.6. OPTIMUM D'OUVERTURE SOLAIRE EN FONCTION DE L'INERTIE

La figure 6 montre l'évolution de la consommation en fonction de la proportion de vitrage sud pour les 5 cas d'inertie.

Figure 6 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de la proportion de vitrage sud pour les 5 cas d'inertie et une occupation moyenne

Pour une inertie très légère, on constate que l'ouverture solaire doit être aussi limitée que possible.

En effet, la structure est alors trop légère pour pouvoir stocker les apports solaires et réaliser un quelconque déphasage.

Lorsque la structure devient plus lourde, il existe un optimum de surface vitrée qui se déplace de plus en plus vers la droite. La position de cet optimum, qui est le résultat d'un équilibre entre les apports solaires croissants et les déperditions également croissantes,

montre qu'une grande surface vitrée orientée sud ne se justifie que si les structures du bâtiment peuvent assurer le déphasage des gains gratuits excédentaires.

4.7. DISCUSSION

En résumé, sous les conditions suivantes,

- l'analyse est réalisée pour des situations moyennes de climat, de type d'habitat et de confort,
- le contrôle thermique est assuré de façon simple et classique, sans algorithme particulier de contrôle optimal adapté à la mise en valeur de l'inertie,
- le critère envisagé est la consommation annuelle totale,

les deux points suivants peuvent être mis en évidence :

- l'inertie est liée aux gains solaires, son intérêt principal étant d'accumuler l'énergie solaire excédentaire gratuite,
- les variations de la charge thermique annuelle entre les cas extrêmes d'inertie restent peu importantes.

Les raisons essentielles de l'atténuation de l'effet de l'inertie sur la charge sont :

- un amortissement du signal et une augmentation des masses à chauffer lorsque les parois sont plus lourdes,
- des phénomènes de compensation.

Ces phénomènes de compensation sont inévitables si le processus de charge et décharge de l'énergie dans les structures du bâtiment reste passif. Ils se manifestent à différents niveaux :

- écrêtage des effets marqués de demi-saison lorsqu'on ajoute la consommation des mois d'hiver,
- transferts thermiques entre locaux,
- déperditions croissantes si la température des parois augmente.

Pour toutes ces raisons, il semble que l'on atteigne une saturation de la charge lorsqu'on augmente encore l'inertie et qu'il est illusoire de vouloir allonger le déphasage, par exemple, pour accumuler l'énergie d'un jour à l'autre, simplement en alourdissant le bâtiment.

La seule façon d'atteindre cet objectif est d'activer le système. La solution extrême est de rendre tout à fait indépendantes la partie captage et accumulation de l'énergie solaire, et la partie chauffage du bâtiment, par l'utilisation de collecteurs solaires et de stockage isolé. Cette solution présente cependant les inconvénients de compliquer l'architecture et les circuits de chauffage et d'augmenter les coûts de la construction.

Une solution intermédiaire est d'activer le fonctionnement passif de captage et d'accumulation des apports solaires dans les structures du bâtiment, tout en gardant un système le plus simple possible.

Le principe que nous avons testé consiste à atteindre directement le milieu des parois épaisses en y soufflant de l'air surchauffé des locaux situés au sud et recevant l'énergie solaire. Si cette activation des transferts n'est réalisée que durant la charge, lorsque la température de l'air des locaux est supérieure à celle des structures d'inertie, et que la décharge reste passive, on obtient l'équivalent d'une diode en électricité.

En effet, si les transferts entre le local, la paroi et l'air extérieur pouvaient être approchés par le simple modèle de la figure 7, la solution proposée reviendrait à court-circuiter la résistance R_1 entre le local et la masse thermique uniquement lors de la charge, c'est-à-dire à placer une diode en parallèle sur R_1 .

Figure 7 : Modèle équivalent simplifié des transferts thermiques entre un local, une paroi et l'air extérieur

Treize maisons basées sur ce simple principe ont été construites et testées à Fosses-la-Ville, en Belgique, avec cependant une différence supplémentaire. Si l'on se réfère en effet à la figure 7, on constate que l'on ne peut pas augmenter la température du mur, T_m , sans augmenter également les déperditions vers l'extérieur via la résistance R_2 .

C'est pourquoi à Fosses-la-Ville, c'est la dalle de sol, par ailleurs bien isolée dans sa partie inférieure, qui sert de structure d'inertie passive "activée".

5. ENERGIE SOLAIRE PASSIVE ET DALLE-SANDWICH ACTIVE : RESULTATS EXPERIMENTAUX

5.1. PRESENTATION DES MAISONS ET METROLOGIE

Treize maisons ont été construites à Fosses-la-Ville, en Belgique, à 60 km au sud de Bruxelles, par la société Solettra et l'architecte A. VIGNERON. Il s'agit d'habitations individuelles, en général jumelées, de taille moyenne et correspondant à la description faite au chapitre 3.

Elles présentent sur leur façade sud une surface de double-vitrage de 27 à 32 m², selon les maisons, soit une situation proche de la variante V50 analysée précédemment. L'originalité de ces bâtiments est la dalle de sol, constituée d'une structure sandwich béton/galets de rivière. Cette structure présente une inertie élevée, tout en permettant un échange thermique facile à travers les galets.

Le principe de fonctionnement, illustré sur la figure 8, est simple.

Figure 8 : Principe de fonctionnement des maisons de Fosses-la-Ville

L'énergie solaire pénètre par les larges ouvertures vitrées orientées sud et crée rapidement une surchauffe dans les locaux. Dès que la température de l'air ambiant atteint une limite d'inconfort (fixée arbitrairement à 22°C), et si le différentiel de température entre les locaux et la dalle permet un échange, l'air surchauffé est extrait dans la partie haute des locaux et est injecté dans la dalle à travers la couche échangeuse de galets, avant d'être restitué à l'habitation.

Afin de pouvoir tester plusieurs configurations, la dalle accumulatrice peut présenter quatre géométries différentes parmi les 13 maisons.

Les différences résident :

- dans la répartition de l'épaisseur de béton dans la dalle,

soit, du haut vers le bas, 8 cm de béton, 30 cm de galets et 27 cm de béton, soit une répartition 19/30/16 cm,

- dans le type de distribution de l'air dans les galets, soit à travers des briques perforées placées aux deux extrémités du volume de galets, soit à travers des drains enfouis dans les cailloux,
- dans les volumes de galets et de béton, de 6 à 10,5 m³ de galets et de 8,5 à 13 m³ de béton.

La dalle-sandwich, isolée du sol par 7 cm de verre cellulaire, présente une capacité thermique totale équivalente de 25 à 40 MJ/K. Elle constitue donc une structure très lourde qui, ajoutée aux parois très épaisses, fait de la maison un bâtiment à très haute inertie.

La constante de temps telle que définie au paragraphe 4.4. est environ 76 heures.

Dans le cadre d'un contrat, la Fondation Universitaire Luxembourgeoise a réalisé un suivi complet de ces treize maisons. L'instrumentation comprenait une station météorologique, un ensemble de 104 capteurs de température situés dans la dalle et dans les locaux des différentes maisons, des mesures ponctuelles de vitesse d'air, de flux thermique et de bruit causé par le système de ventilation, des relevés de l'état de fonctionnement du système de ventilation et de l'énergie électrique consommée. Il faut ajouter à ce suivi des tests d'étanchéité et de ventilation par pressurisation et gaz traceur, et une visualisation du bâtiment par thermographie infrarouge.

5.2. CONTROLE DES FLUX D'AIR

L'un des principaux résultats du suivi fut de mettre en évidence la très grande importance de la stratégie de contrôle du flux d'air qui permet de charger la dalle.

Le type de contrôle choisi à la conception des maisons s'est en effet avéré trop restrictif. La dalle n'est en fait chargée que lorsque la température de la pièce de séjour excède 22°C, mais si elle est supérieure à 24,5°C, on évacue l'air chaud directement à l'extérieur pour éviter la surchauffe des locaux. De plus, l'air n'est pulsé dans la dalle que si le différentiel air/galets est supérieur à 1°C.

Les conséquences de ce type de stratégie sont que la température dans le stockage ne peut jamais dépasser 23,5°C et que les périodes durant lesquelles le contrôle autorise le chargement thermique de la dalle sont très réduites dans un climat tempéré.

Il faut encore ajouter à cela l'influence du thermostat, placé dans la pièce de séjour, et qui commande le système de chauffage en cas de besoin. Etant tout à fait indépendante du contrôle des flux d'air, la régulation thermostatique conduit très souvent au chargement de la dalle accumulatrice par le système classique de chauffage, ce qui enlève tout l'intérêt de l'inertie.

La solution proposée pour optimiser le stockage d'énergie gratuite fut d'élaborer une stratégie de contrôle relativement à la position du thermostat qui fixerait dès lors les conditions d'inconfort, variables selon les habitants.

Par ailleurs, un abaissement de cette consigne à des faibles valeurs durant la nuit s'est avéré efficace, tout en maintenant un confort suffisant : le différentiel de température entre la dalle et l'air ambiant augmentant, la décharge est meilleure et on utilise moins le chauffage classique pour chauffer les masses du bâtiment.

5.3. FONCTIONNEMENT ET PERFORMANCES DE LA DALLE

La figure 9 montre l'évolution de la température dans les galets, dans le béton situé au-dessus des galets et dans le béton situé en dessous, lors d'une charge et d'une décharge au mois de mai.

Figure 9 : Evolution des températures mesurées au mois de mai à 3 niveaux dans la dalle

Les apports solaires ont permis de charger la dalle entre 12 h 30 et 20 h le premier jour, puis celle-ci s'est relaxée en transférant son énergie aux locaux durant les jours suivants, à climat plus maussade.

Comme on peut le constater, l'énergie apportée par l'air chaud dans les galets échangeurs est bien transférée dans les couches de béton de part et d'autre.

La couche supérieure de béton, plus proche de la surface en contact avec l'air ambiant, bénéficie en outre d'un niveau absolu de température plus élevé.

Cependant, on constate dans la tranche de béton située sous les galets, une élévation de 1.4°C de la température à l'endroit de la sonde, c'est-à-dire à 65 cm sous le carrelage.

Une étude précédente avait montré qu'un transfert purement conductif dans une dalle massive en béton ne permet pas au front thermique de dépasser une quinzaine de centimètres de profondeur.

On peut donc estimer ici que l'effet d'activation du transfert vers la dalle équivaut à rendre efficace pour la fonction d'accumulation une épaisseur de matière plus importante.

La figure 10 montre le flux mesuré, en W/m^2 , à la surface du carrelage durant 7 jours au mois d'avril. Il est positif lorsque la dalle se charge et négatif lorsqu'elle restitue son énergie à l'ambiance.

Figure 10 : Evolution du flux thermique mesuré à la surface supérieure de la dalle durant 7 jours au mois d'avril

On peut constater qu'il existe un flux conductif vers le bas, comme dans une dalle classique, et un flux inverse qui permet à la dalle de restituer durant la nuit l'énergie qu'elle a accumulée.

Une intégration sur une longue période permet de constater que cette énergie restituée au local est supérieure à celle qui est transférée par conduction du local vers la dalle, ce qui montre que l'énergie injectée par l'air dans les galets est bien récupérée.

Par ailleurs, on observe aussi pendant le 5e jour, qui fut pluvieux, une restitution par la dalle de l'énergie stockée durant les jours précédents.

Les puissances échangées restent néanmoins faibles : 10 W/m^2 maximum restitués au local. Si l'on considère une surface active de la dalle de 20 m^2 , celle-ci ne représente au maximum qu'un corps de chauffe de 200 W.

Ceci est d'ailleurs confirmé par les bilans énergétiques établis sur de longues périodes : il semble que l'on ne stocke réellement que 80 % de l'énergie injectée dans les conduits aérauliques, le reste étant "perdu" dans les carneaux amenant l'air au niveau des galets.

De cette énergie stockée, la moitié est perdue vers le sol sous la dalle, ce qui représente un rendement de l'ordre de 40 % entre l'énergie injectée activement et celle qui est restituée passivement.

Or, on mesure une puissance injectée maximum de 500 à 600 W, et donc une restitution de 200 à 240 W, ce qui est cohérent avec la valeur trouvée précédemment.

Signalons enfin que les mesures de flux ont permis de calculer un coefficient de convection au niveau du carrelage d'environ $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, ce qui est également cohérent avec les valeurs généralement admises pour le plancher horizontal d'un local.

5.4. BILAN DE L'ENERGIE

Les mesures ne permettent pas de conclure de façon indéniable à la réelle efficacité de la dalle-sandwich :

- faible puissance de restitution,
- fonctionnement en accumulation des gains solaires uniquement durant les demi-saisons et les journées d'hiver fortement ensoleillées.

Et cependant,

- l'entièreté de la dalle se trouve en permanence à une température supérieure à 20° , et même souvent proche de 22° ,
- on utilise efficacement les 70 cm d'épaisseur pour stocker la chaleur,
- si les apports solaires passifs permettent de réduire d'environ 25 % la charge thermique annuelle, la dalle permet une réduction supplémentaire d'environ 10 %.

Sans conteste donc, la dalle à haute inertie constitue un élément utile dans une optique d'économie d'énergie.

Il faut néanmoins la considérer plus en termes de "ceinture" thermique assurant le confort dans l'habitation, qu'en termes de milieu efficace de stockage de l'énergie solaire gratuite.

Si cette dernière optique était privilégiée, il faudrait sans doute extraire l'air chaud d'un espace solaire, plus isolé du reste du bâtiment et agissant à l'instar d'un collecteur solaire à air classique.

Cette solution entraînerait néanmoins une complication de l'architecture et probablement une élévation des coûts, sans apporter réellement d'économie, ni de confort supplémentaire.

En effet, dans ce cas, la dalle serait portée à plus haute température et une décharge proprement passive entraînerait probablement une surchauffe des locaux, même en mars ou en avril.

Sur le principe, la solution actuelle doit donc être considérée comme valable. La structure sandwich pourrait simplement, tout au cours de l'année, être amenée à une température toujours proche de la température idéale de confort thermique, définie par la consigne thermostatique : légèrement plus élevée en hiver par stockage de l'énergie solaire et légèrement plus basse en été, par stockage d'air frais durant la nuit.

Le but n'est pas en effet de stocker de l'énergie à tout prix, au risque parfois de ne pas l'utiliser, mais simplement d'améliorer le confort tout en essayant de réduire la consommation annuelle.

Dans ce cas, et en considérant que les surcoûts d'investissements sont réduits, l'opération est toujours positive, pour autant que la consommation énergétique des auxiliaires (essentiellement la ventilation) reste réduite.

5.5. ASPECTS TECHNIQUES

C'est précisément au niveau des auxiliaires et, de manière générale, de la mise en oeuvre de ce type de système, que l'on peut améliorer le dispositif tel qu'il a été imaginé à Fosses-la-Ville.

La consommation du ventilateur reste trop importante : l'énergie électrique totale nécessaire à la circulation de l'air (4,265 GJ/an) est du même ordre de grandeur que l'énergie thermique délivrée par la dalle en saison froide (6,8 GJ). Le coefficient de performance, calculé comme le rapport de l'énergie thermique fournie à l'énergie électrique consommée, ne vaudrait alors que 1,6.

Même si l'on tient compte du fait que dans la consommation annuelle du ventilateur, 1 GJ environ est due à la ventilation estivale, le C.O.P. de production de chaleur ne s'élève qu'à 2,1.

Il est possible de diminuer cette consommation en améliorant

- la méthode de dimensionnement du ventilateur : en effet, l'évaluation initiale des pertes de charge à travers les galets s'est avérée assez éloignée de la valeur mesurée,
- l'étanchéité de la dalle composite vis-à-vis de l'extérieur : les tests réalisés au gaz traceur ont mis en évidence une fuite d'air non négligeable,
- l'évaluation du débit nécessaire à l'extraction de l'air chaud dans les locaux : la valeur actuelle de 2500 m³/h peut certainement être réduite sans préjudice à l'efficacité du système.

Ce type d'amélioration irait dans le sens d'une diminution du bruit, qui bien que largement en dessous des limites acceptables, peut néanmoins constituer un élément en défaveur de ce type de chauffage.

Les pertes thermiques de la dalle accumulatrice vers le sous-sol et les pertes thermiques en ligne dans les conduits aérauliques constituent respectivement 40 % et 20 % de l'énergie injectée. Ces pertes, bien que récupérables en partie dans le bâtiment, doivent être réduites en augmentant l'épaisseur d'isolation.

Un rapide calcul de rentabilité permet d'estimer qu'une augmentation d'un facteur 2 de la résistance thermique de la dalle vers le sol peut être tolérée : on améliore ainsi à la fois le coefficient de déperdition global du bâtiment et le potentiel de stockage de la dalle.

Enfin, l'intérêt d'analyser 13 maisons fut de pouvoir comparer différentes mises en oeuvre de la dalle. L'enseignement que l'on peut extraire à cet égard est le suivant.

Le but sous-jacent de la démarche est de limiter la durée de chargement thermique de la structure accumulatrice. Ce temps est directement proportionnel à la capacité de stockage,

qu'il faut par ailleurs maintenir élevée pour conserver la fonction d'accumulation. La règle sera donc de concevoir une dalle dotée de la capacité minimum qui assure l'autonomie souhaitée (dans notre cas, environ 2 jours du mois de mars). La durée de stockage est aussi inversement proportionnelle au débit d'air. On favorisera donc toujours la structure qui offre le minimum de pertes de charges, c'est-à-dire, à masses de béton et de galets équivalentes, celle qui utilise des drains enfouis dans les cailloux.

Le sens du flux, largeur ou longueur de la maison, est un élément moins utile lors du dimensionnement.

En effet, lorsque l'air circule dans le sens de la largeur, le parcours dans les galets étant plus petit, les pertes de charges sont minimisées. Cependant, lorsqu'on tient compte du fait que ce débit d'air est alors distribué sur une section plus large, on remarque que la vitesse moyenne de l'air dans les galets est inférieure (0,11 m/s contre 0,20 m/s), ce qui compense l'avantage du parcours plus petit.

6 . CONCLUSIONS

L'inertie thermique dans le bâtiment est l'une des composantes les plus étudiées en architecture bioclimatique. Son intérêt est mis en évidence lors de l'étude de cellules-tests ou encore dans le cas d'habitations particulièrement soignées et originales.

Il semble que, si l'on considère une maison unifamiliale ordinaire, avec des matériaux courants et une architecture classique, l'influence de l'inertie sur le prix que paie tous les ans l'habitant pour le chauffage des locaux soit relativement réduite.

L'effet de l'inertie ne justifie en tout cas que rarement le surcoût occasionné par les matériaux supplémentaires mis en oeuvre.

Le principal intérêt d'une grande capacité thermique dans la maison est donc d'assurer le confort, surtout durant l'été, en déphasant les apports extérieurs et en atténuant les fluctuations de la température intérieure.

Une façon peu coûteuse de concilier confort optimal et un intérêt financier au niveau de la consommation annuelle, est de rendre active la charge thermique des masses.

Une dalle composite béton + galets peut contribuer à réunir ces deux objectifs. Même si la mise en oeuvre et le dimensionnement s'avèrent un peu délicats, le principe mérite certainement d'être retenu pour l'architecture de demain.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NICOLAS (J.), RIVEZ (J.-F.), LIEFFRIG (V.), FONTAINE (M.),
Gestion énergétique de maisons unifamiliales avec dalle à haute inertie et stockage en galets, *Revue Générale de Thermique*, n° 323, novembre 1988, pp. 577-583.
- [2] NICOLAS (J.), RIVEZ (J.-F.), LIEFFRIG (V.), FONTAINE (M.),
Managing energy in solar dwellings with high inertia concrete slab and pebble bed storage, *Communication at Energy 88 - June 5-11 - 1988, Tiberias (Israël)*.
- [3] LEFEBVRE (G.),
Caractérisation de l'inertie thermique d'un bâtiment par analyse modale, *Revue Générale de Thermique*, n° 332-333, août-septembre 1989, pp. 501-512.
- [4] DEPECKER (P.), ACHARD (G.), ALLARD (F.),
La récupération solaire par les baies dans l'architecture passive : sur la caractérisation des parois internes des locaux en matière d'inertie, *Revue Générale de Thermique*, n° 267, mars 1984, pp. 203-218.
- [5] DUFFIN (R.J.), KNOWLES (G.),
Temperature control of buildings by adobe wall design, *Solar Energy*, vol. 27, n° 3, 1981, pp. 241-249.
- [6] DUFFIN (R.J.), KNOWLES (G.),
A passive wall design to minimize building temperature swings, *Solar Energy*, vol. 33, n° 3/4, 1984, pp. 337-342.
- [7] DUFFIN (R.J.), KNOWLES (G.),
Use of layered walls to reduce building temperature swings, *Solar Energy*, vol. 33, n° 6, 1984, pp. 543-549.
- [8] DELAHUNT (M.J.),
Suncode - PC, A program user's manual, *Ecotope* 1985.
- [9] International Energy Agency Task VIII (Passive and Hybrid Solar Low Energy Buildings), "Simulation model validation using test cell data", Edited by Ove C. MORCK, June 1986.

LISTE DES LEGENDES DES TABLEAUX ET DES FIGURES

- Tableau 1 : Répartition du vitrage sud pour les cinq variantes envisagées.
- Tableau 2 : Description des trois variantes de profil d'occupation de l'habitation.
- Tableau 3 : Valeurs des consommations annuelles pour trois cas d'inertie, trois cas de vitrage sud et trois cas d'occupation pour une valeur moyenne des deux autres variables.
-
- Figure 1 : Définition des cinq niveaux d'inertie des parois (cotes en cm).
- Figure 2 : Variation mensuelle de la charge thermique pour les cinq cas d'inertie, 50 % de vitrage sud et une occupation moyenne.
- Figure 3 : Comparaison de la charge thermique annuelle dans la pièce de séjour et dans la chambre située juste au-dessus en fonction du profil d'occupation (inertie et gains solaires moyens).
- Figure 4 : Variation de la charge thermique annuelle en fonction de l'inertie pour les trois profils d'occupation et 30 % de surface vitrée sud.
- Figure 5 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de l'inertie pour les cinq surfaces de vitrage et une occupation moyenne.
- Figure 6 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de la proportion de vitrage sud pour les cinq cas d'inertie et une occupation moyenne.
- Figure 7 : Modèle équivalent simplifié des transferts thermiques entre un local, une paroi et l'air extérieur.
- C_a = capacité thermique de l'air et des meubles
- C_m = capacité thermique des parois
- R_1, R_2 = résistances thermiques des parois
- R_s = résistance de couplage entre air extérieur et air intérieur.
- Figure 8 : Principe de fonctionnement des maisons de Fosses-la-Ville.
- Figure 9 : Evolution des températures mesurées au mois de mai à trois niveaux dans la dalle.
- Figure 10 : Evolution du flux thermique mesuré à la surface supérieure de la dalle durant sept jours au mois d'avril.

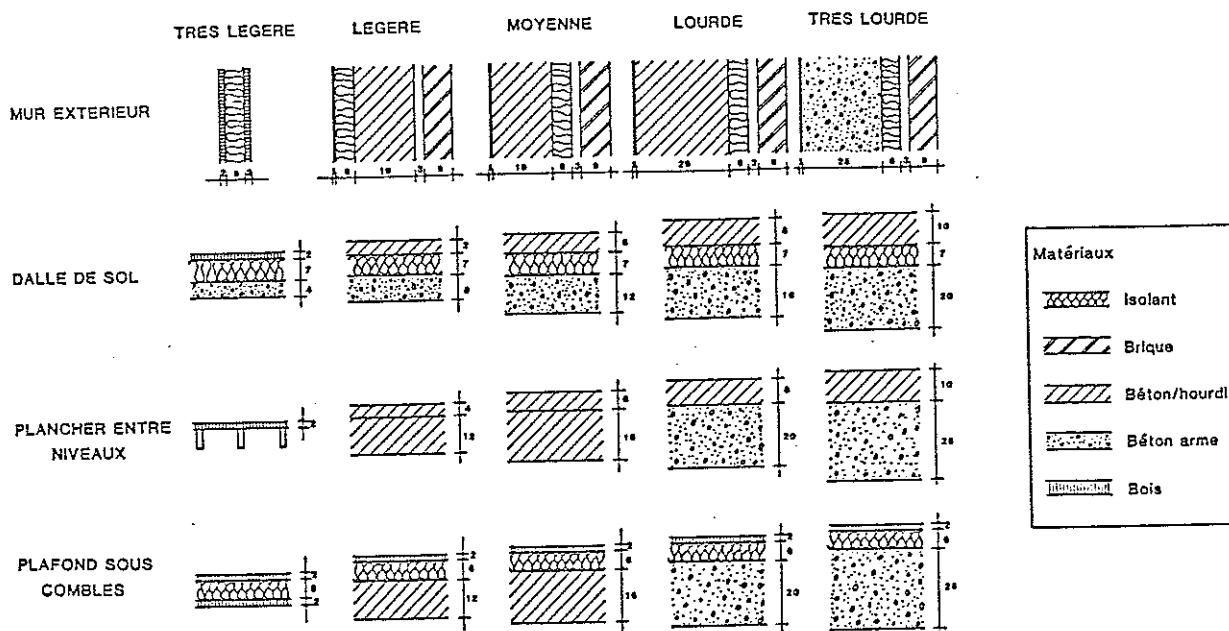


Figure 1 : Définition des cinq niveaux d'inertie des parois (cotes en cm).

Identification de cas	V0	V10	V30	V50	V100
Surface vitrée sud-séjour (m ²)	0	3.28	9.83	17.11	25.50
Surface vitrée sud-chambres (m ²)	0	2.51	7.54	13.13	32.40
Surface vitrée sud totale (m ²)	0	5.79	17.37	30.24	57.50
Pourcentage de surface vitrée sud par rapport à la surface de la façade sud (%)	0	10	30	52	100

Tableau 1 : Répartition du vitrage sud pour les cinq variantes envisagées.

Identification du cas	Horaire des personnes	Temps où la consigne est de 20°C (heures)
Travail temps plein	4 personnes actives de 18 à 23 h.	5
Travail mi-temps	1 personne active de 13 à 18 h. 4 personnes actives de 18 à 23 h.	10
Foyer	1 personne active de 8 à 18 h. 4 personnes actives de 18 à 23 h.	15

Tableau 2 : Description des trois variantes de profil d'occupation de l'habitation.

Variante		Consommation (GJ/an)
Inertie	légère	41.35
	moyenne	41.18
	lourde	40.67
Vitrage	V10	41.67
	V30	41.18
	V50	41.40
Occupation	temps plein	40.31
	mi-temps	41.18
	foyer	42.19

Tableau 3 : Valeurs des consommations annuelles pour trois cas d'inertie, trois cas de vitrage sud et trois cas d'occupation pour une valeur moyenne des deux autres variables.

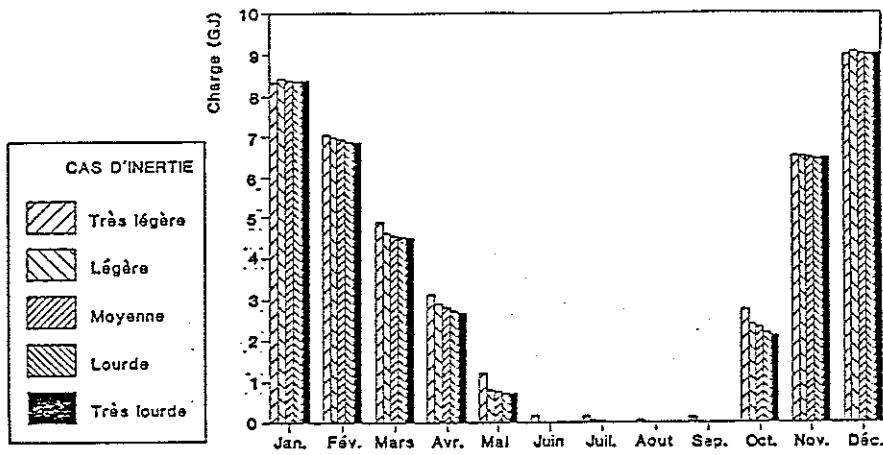


Figure 2 : Variation mensuelle de la charge thermique pour les cinq cas d'inertie, 50 % de vitrage sud et une occupation moyenne.

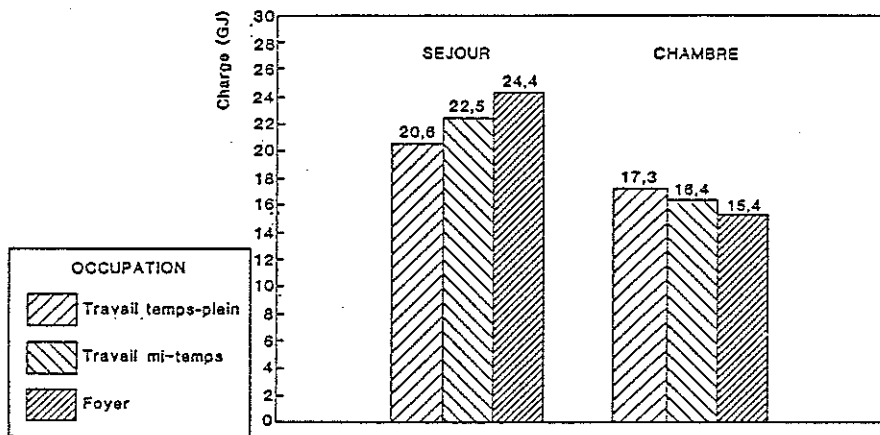


Figure 3 : Comparaison de la charge thermique annuelle dans la pièce de séjour et dans la chambre située juste au-dessus en fonction du profil d'occupation (inertie et gains solaires moyens).

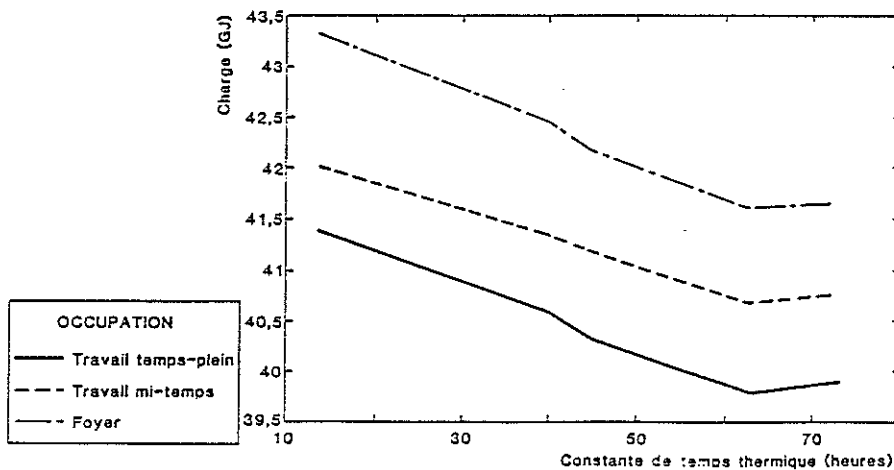


Figure 4 : Variation de la charge thermique annuelle en fonction de l'inertie pour les trois profils d'occupation et 30 % de surface vitrée sud.

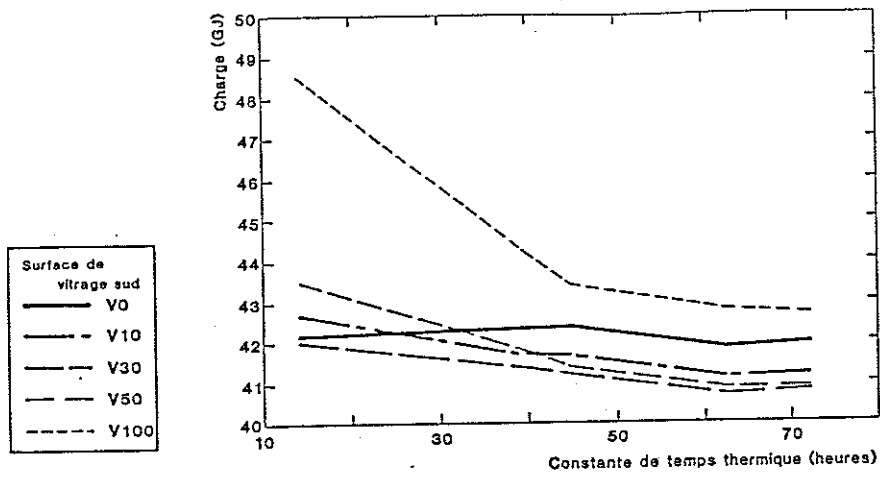


Figure 5 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de l'inertie pour les cinq surfaces de vitrage et une occupation moyenne.

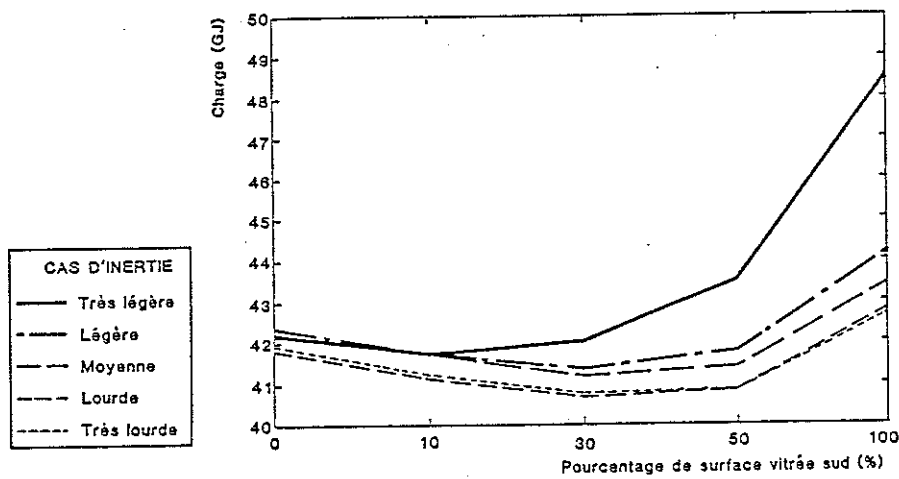


Figure 6 : Evolution de la consommation annuelle en fonction de la proportion de vitrage sud pour les cinq cas d'inertie et une occupation moyenne.

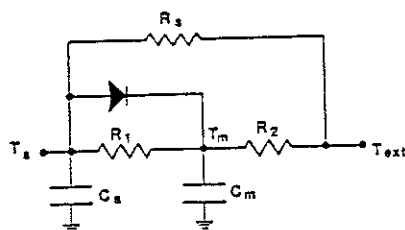


Figure 7 : Modèle équivalent simplifié des transferts thermiques entre un local, une paroi et l'air extérieur.

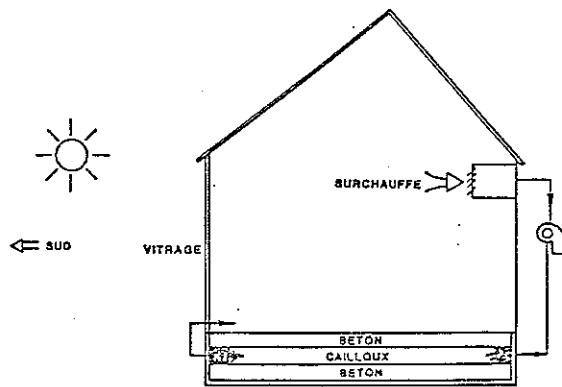


Figure 8 : Principe de fonctionnement des maisons de Fosses-la-Ville.

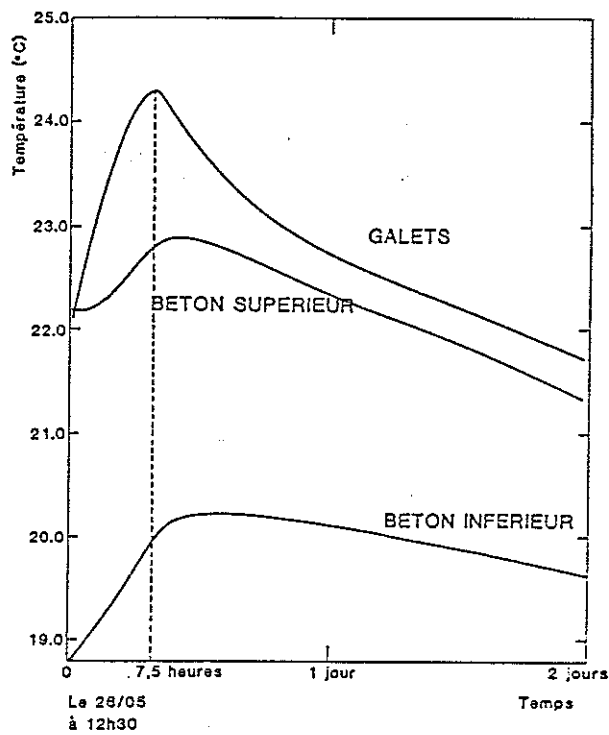


Figure 9 : Evolution des températures mesurées au mois de mai à trois niveaux dans la dalle.

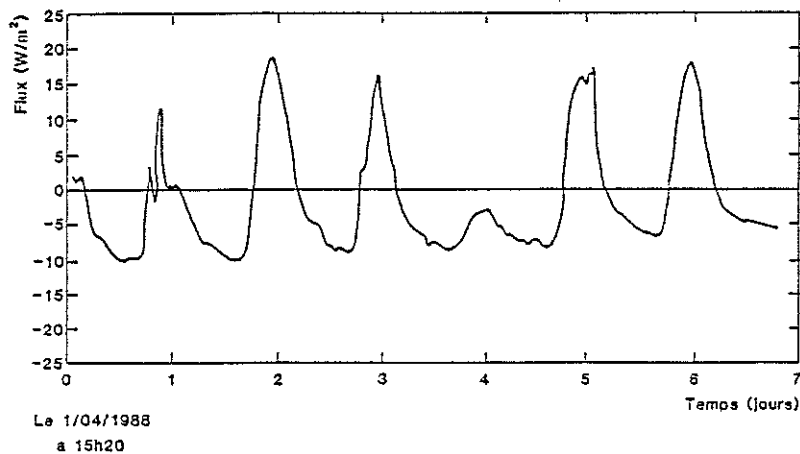


Figure 10 : Evolution du flux thermique mesuré à la surface supérieure de la dalle durant sept jours au mois d'avril.