

Gestion énergétique de maisons unifamiliales avec dalle à haute inertie et stockage en galets

par J. NICOLAS (*), J.-F. RIVEZ (*), V. LIEFFRIG (*) et M. FONTAINE (*)

Nomenclature

A_s	section droite du stockage en galets	m^2
C_a	capacité thermique massique de l'air	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_H	capacité thermique de la maison	J/K
C_s	capacité thermique massique apparente des galets	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
F_R	facteur d'efficacité des collecteurs solaires	
h_r	coefficient de convection air ambiant-dalle	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_s	coefficient volumique de transfert de chaleur air-cailloux	$W.m^{-3}.K^{-1}$
k	coefficient de transmission thermique	$W.m^{-2}.K^{-1}$
L	longueur de parcours dans le stockage (ici, hauteur du stockage)	m
NUT	nombre d'unités de transfert du système de stockage	
Q_v	débit d'air dans le stockage	m^3/s
Re	Nombre de Reynolds	
U_H	coefficient de transfert de chaleur total de la maison	W/K
U_c	coefficient de transfert de chaleur par mètre carré de collecteur solaire	$W.m^{-2}.K^{-1}$

Symboles grecs

α_c	coefficient d'absorption des collecteurs solaires	
α_r	coefficient d'absorption de la dalle (carrelage)	
Δp	pertes de charge dans le stockage	Pa
ϵ_s	porosité du stockage	
ρ_a	masse volumique de l'air	kg/m^3
ρ_s	masse volumique apparente des galets	kg/m^3
τ_c	coefficient de transmission thermique du vitrage des collecteurs solaires	

1. Introduction

La gestion de la chaleur dans les systèmes de chauffage basés sur l'énergie solaire et sur une distribution à air est justifiée, d'une part, par le caractère intermittent de la source énergétique et, d'autre part, par le déphasage existant entre l'offre et la demande de chaleur.

Le soleil peut entrer dans la maison de façon passive, par de larges baies vitrées orientées sud, ou de façon active, par l'intermédiaire de collecteurs solaires à air.

(*) Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL), rue des Déportés, 140, B-6700, Arlon (Belgique).

Article reçu le 15.7.1987, accepté le 21.9.1988.

Dans les deux cas, le concepteur favorisera l'accumulation de l'énergie solaire par une masse importante créant l'inertie thermique. L'énergie passive peut ainsi être accumulée dans la dalle de sol et l'énergie active peut être stockée dans un réservoir rempli de cailloux.

Le problème de la diffusion de la chaleur à travers une dalle de béton est un problème classique de conduction thermique. A l'échelle d'une habitation, il faut néanmoins tenir compte des contraintes géométriques et d'occupation des locaux.

En ce qui concerne le stockage thermique en lits de cailloux, un grand nombre d'études expérimentales et théoriques ont été menées dans le monde [7 à 9]. Il demeure néanmoins des problèmes à résoudre, notamment en ce qui concerne le dimensionnement et le contrôle des systèmes. C'est pourquoi le suivi des maisons unifamiliales, qui fait l'objet de cet article, reste d'un intérêt certain.

L'étude visera non seulement à évaluer les performances des composants originaux de ces maisons (vitrage, dalle de sol, capteurs solaires, stockage), mais également à mettre en évidence l'influence moins soupçonnée d'éléments tels que l'inertie des murs et des plafonds, l'ombre portée par le mobilier, l'occupation réelle des locaux.

Les maisons étudiées se situent à Marbehan, dans le sud de la Belgique. L'auteur de projet en est l'architecte André VIGNERON et l'entrepreneur général, la Société SOLETRA.

Implantées dans la zone agglomérée d'un village-centre, les 6 maisons de Marbehan s'insèrent dans une logique de conception évolutive :

— elles-mêmes sont basées sur un premier prototype, situé à Waltzing, près d'Arlon ;

— leur étude a permis l'amélioration du concept et a déjà donné lieu à la construction de 13 nouvelles habitations qui elles-mêmes serviront de banc d'essai pour la réalisation de 12 maisons dans une autre région belge.

2. Description des maisons

2.1. Généralités

Les maisons de Marbehan intègrent une double conception solaire : passive et active.

Il s'agit d'abord d'un habitat pratiquement bioclimatique dont les bases sont une orientation est-ouest de la ligne de faite, avec de larges baies vitrées au sud et peu de percements côté nord, des espaces tampons et une bonne isolation thermique avec élimination des ponts thermiques, localisation précise des points de rosée et de congélation.

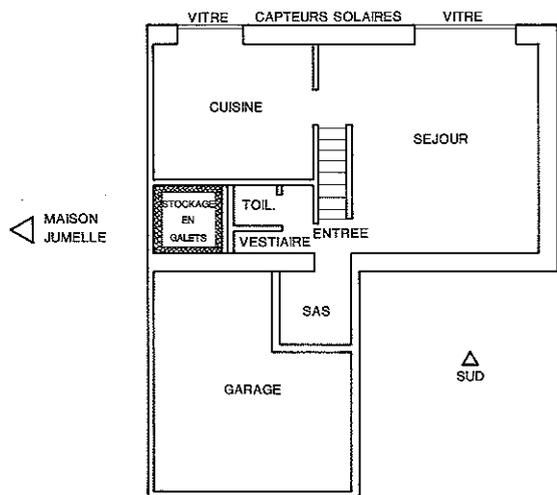


Fig. 1. — Vue en plan de la maison choisie pour l'étude

On laisse entrer le soleil au maximum par une bonne disposition des surfaces habitables et des vitrages. On garde cette énergie solaire en la stockant dans les structures mêmes de l'habitation : les murs, les plafonds, et surtout une dalle de sol constituée de 0,35 m de béton armé, et en évitant le plus possible les déperditions.

Un système actif constitué de capteurs solaires à air situés verticalement en façade sud complète la récupération d'énergie. Un stockage thermique-tampon de près de 8 m³ de galets de rivière assure le déphasage de l'apport solaire. L'air chaud est distribué dans les locaux par un ventilateur et un réseau de conduits.

L'architecture climatique choisie pour le bâtiment permet une réduction notable de la charge thermique annuelle. Le système solaire actif économise l'usage du chauffage d'appoint durant la période d'entre-saisons. Il reste alors environ 60 % de la charge annuelle qui est assurée par des convecteurs électriques indépendants de la distribution aéraulique.

Deux des six maisons de Marbehan se différencient des quatre autres par une surface de capteurs solaires plus faible et par une disposition légèrement différente des espaces-tampons côté nord (garage-buanderie). Ces volumes étant considérés comme extérieurs à l'espace chauffé, leur position n'a guère d'influence sur le comportement thermique global de l'habitation.

Par rapport au premier prototype de Waltzing, les améliorations essentielles sont les suivantes :

- stockage en galets plus important (7,65 m³ au lieu de 4,7 m³), dimensionné pour assurer une autonomie d'une journée, et dans une cuve isolée en acier au lieu d'une cuve en béton, par simplicité de mise en œuvre ;

- dalle de sol isolée thermiquement par le bas au lieu d'être posée directement sur une couche de sable, afin d'éviter les pertes par le fond de la dalle ;

- surface totale du logement supérieure (126 m² en moyenne au lieu de 116 m²), pour être plus proche des dimensions conventionnelles de l'habitat belge.

2.2. Maison choisie pour l'étude

Une maison a été particulièrement étudiée : une vue en plan et une coupe nord-sud y sont représentées respectivement sur les figures 1 et 2.

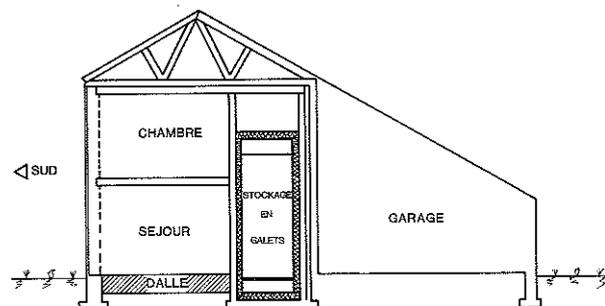


Fig. 2. — Vue en coupe nord-sud de la maison étudiée

TABLEAU I	
Caractéristiques principales de l'habitation étudiée	
Surface totale construite au sol . . .	114 m ²
Surface totale du logement	139 m ²
Surface chauffée	95 m ²
Volume chauffé	234 m ³
Surface de parois extérieures . . .	293 m ²
Surface de double vitrage sud . .	22 m ²
Coefficient moyen de transmission thermique k	0,95 W.m ² .K ⁻¹
Masse thermique	1 200 kg
(de béton essentiellement)	par m ² de logement
	(soit environ
	1 MJ.K ⁻¹ .m ⁻²)

Le tableau I reprend les caractéristiques principales de cette habitation. Cette maison est restée inhabitée pendant la durée de l'étude.

2.3. Capteurs solaires

La façade sud est occupée partiellement par le double vitrage et partiellement par des collecteurs solaires verticaux à air dont l'absorbeur est une tôle d'acier galvanisé prélaquée et munie de 8 canaux profilés parallèles. La surface totale de ces capteurs est de 17,5 m² répartie en 8 modules de 2,43 × 0,9 m.

Les caractéristiques des collecteurs sont les suivantes :

- vitrage : simple 6 mm Securit ;

- isolation arrière : 6 cm de polyuréthane + 15 cm de laine de verre ;

- efficacité optique ($F_R \tau_c \alpha_c$) : 0,7 pour un ensoleillement de 600 W.m⁻² ;

- coefficient de perte thermique ($F_R U_C$) : 4,7 W.m⁻².K⁻¹ pour le même ensoleillement.

2.4. Stockage en galets

La chaleur captée par les collecteurs solaires alimente un stockage en galets placé verticalement au centre de la maison.

Le volume de 7,65 m³ de galets de rivière roulés et lavés (16/28 mm) occupe un parallélépipède de base carrée (1,5 m de côté) et de 3,40 m de hauteur. Ce volume est séparé par des grillages d'un plenum bas de 0,45 m de haut et d'un plenum haut de 0,15 m de haut, ces hauteurs étant imposées par des contraintes architecturales.

La cuve de stockage est en acier et est isolée thermiquement par 15 cm de laine de verre.

Un calcul simple montre que le volume de stockage

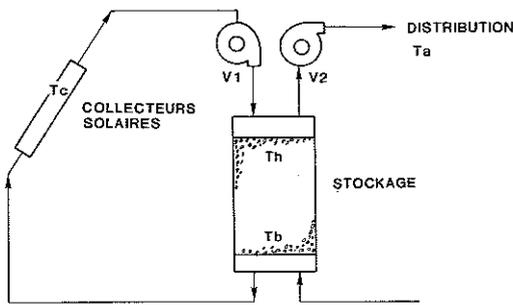


Fig. 3. — Schéma de principe du circuit solaire actif à air

assure une autonomie d'environ une journée au mois de mars pour un différentiel de température de 10 K.

2.5. Fonctionnement du système stockage - capteurs solaires

Le schéma de principe en est donné sur la figure 3.

Lorsque la température de l'air mesurée au niveau supérieur des collecteurs solaires (T_c) dépasse de 5 K celle du bas du stockage (T_b), un premier ventilateur (V_1) injecte l'air chaud par le plenum supérieur dans le volume de galets à un débit de $700 \text{ m}^3/\text{h}$.

Si le ventilateur de charge ne fonctionne pas et si le thermostat d'ambiance, placé dans la salle de séjour, est en position de demande, un second ventilateur (V_2) extrait l'air du plenum supérieur à un débit constant de $1\ 100 \text{ m}^3/\text{h}$ et l'injecte dans l'habitation. Cette décharge n'est effective que lorsque le différentiel de température entre le haut du stockage (T_h) et la pièce de séjour (T_a) dépasse 5 K. Dans les autres conditions, le chauffage de la maison est assuré par les convecteurs électriques. On remarquera que ces conditions de fonctionnement donnent priorité au stockage de l'énergie solaire.

Insistons également sur la valeur réelle des débits calculés à partir de mesures de vitesse d'air par micro-anémométrie. Ceux-ci ne valent que 65 % des débits estimés en fonction des pertes de charge et des courbes caractéristiques des ventilateurs, montrant que les pertes de charge dans les galets avaient été sous-estimées lors des essais réalisés sur un modèle réduit. Cependant, le débit massique d'injection réel correspond à 49 kg par heure et par mètre carré de collecteur solaire, ce qui reste proche des valeurs généralement conseillées pour les capteurs à air [10]. Il s'agit, en l'occurrence, de trouver un équilibre entre un rendement maximal et un coût minimal des auxiliaires. Ce débit d'injection correspond, dans le volume de stockage, à une vitesse de l'air de l'ordre de $0,09 \text{ m/s}$, qui est inférieure à la valeur maximale de $0,125 \text{ m/s}$ préconisée par KING et BURNS [8].

3. Dispositif de mesure et outils de modélisation

Un acquéreur de données de 20 canaux analogiques (Hewlett Packard type 3421A) permet l'enregistrement sur cassette magnétique des grandeurs mesurées. Le contenu de la cassette est alors transféré sur l'ordinateur central de la FUL pour un traitement ultérieur.

Les sondes de température utilisées sont des thermistances CTN (FENWALL type UUA41J1). Leur habillage varie en fonction de l'endroit de mesure : dans le radier de béton, par exemple, elles ont été placées dans un embout métallique et noyées dans une résine conductrice de chaleur, puis descendues dans des gaines de réservation en matière plastique jusqu'à la profondeur désirée.

La maison choisie a ainsi été équipée de 40 capteurs de température :

- 5 groupes de 4 sondes superposées en divers endroits de la dalle de sol (cf. § 5) ;
- 1 sonde d'air extérieure ;
- 11 sondes dans le stockage en galets (disposées sur l'axe vertical central et sur une parallèle à celui-ci, à 15 cm du bord de la cuve) ;
- 8 sondes mobiles qui peuvent être utilisées pour la mesure de températures ambiantes, de température d'entrée d'air ou de température de parois, selon l'objectif de la campagne d'instrumentation.

L'équipement de métrologie comprend également un pyranomètre extérieur pour la mesure de l'ensoleillement, deux sources de tension permettant de visualiser l'état de fonctionnement des ventilateurs et un micro-anémomètre pour les mesures de débit d'air.

Les logiciels de traitement de données sont spécifiques à l'application et sont écrits en FORTRAN 77.

En ce qui concerne la simulation, les logiciels utilisés sont les suivants :

- LPB4 : logiciel de calcul statique des déperditions thermiques et de la consommation énergétique de bâtiments, sur base d'une année-type belge [1] ;
- MISES3 : progiciel de calcul de conduction de la chaleur par éléments finis [2] ;
- TRNSYS : progiciel bien connu de simulation transitoire de modules de chauffage et de climatisation [3] ;
- un programme de calcul des éclairagements solaires [4].

4. Étude de l'enveloppe et des apports passifs

Le programme LPB4 [1] a été utilisé pour calculer les déperditions thermiques et la consommation annuelle de l'habitation.

Les principaux coefficients de transmission employés sont les suivants :

murs extérieurs	$0,21 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
vitres.	$3,33 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
fondations.	$0,53 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
plafonds sous combles	$0,24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Le tableau II montre les résultats obtenus par la simulation au moyen d'une année-type pour la région considérée. Six cas ont été examinés ; le premier cas est le cas de référence ; il correspond à l'habitation telle qu'elle est réellement. Les cinq cas suivants constituent des hypothèses où l'on a modifié un élément de la structure de l'habitation, par rapport au premier cas de référence :

- pour le deuxième cas, on a supprimé l'isolation des murs extérieurs (16 cm de laine de roche) ;
- pour le troisième cas, la surface de capteurs

TABLEAU II		
Déperditions et besoins annuels simulés dans six cas de figure différents		
Numéro du cas	Déperditions (U_H) (W/K)	Besoins annuels (GJ)
1	283	31,604
2	390	50,401
3	335	29,845
4	427	54,348
5	469	73,225
6	214	43,115

solaires verticaux en façade sud a été remplacée par un double vitrage ;

— pour le quatrième cas, l'isolation des plafonds sous les combles a été supprimée (16 cm de laine de verre) ;

— pour le cinquième cas, l'isolation de la dalle de sol (sous le béton) a été supprimée (7 cm de verre cellulaire) ;

— pour le sixième cas, l'ensemble du vitrage sud a été remplacé par un mur extérieur isolé.

Remarquons tout d'abord le niveau relativement bas de la charge thermique annuelle réelle (1^{er} cas), justifié par la bonne isolation de l'habitation. Comme prévu, on observe une grande influence de l'isolation de la dalle de sol et des combles : la comparaison des cas 4 et 5 avec le premier cas met en évidence des déperditions nettement différentes. Le modèle employé est purement statique : il ne tient donc pas compte de la grande inertie de la dalle et surestime sans doute largement la consommation dans le 5^e cas. L'influence des apports passifs est évidente pour le 6^e cas : si l'ensemble du vitrage sud est remplacé par un mur isolé, les déperditions diminuent de 24 %, mais les besoins annuels, eux, augmentent de 36 % : pour une année-type, 11,5 GJ sont ainsi fournis par le soleil à travers le vitrage. L'isolation des murs extérieurs, bien qu'efficace, est cependant moins utile que celle des combles et celle de la dalle de sol, comme le montre l'examen du deuxième cas.

Enfin, et c'est là le résultat le plus intéressant, lorsque la surface de capteurs solaires verticaux est remplacée par un double vitrage (3^e cas), on observe un gain annuel de 1 759 MJ. Nous reviendrons sur ce résultat dans la partie discussion (§ 8).

Les résultats de modélisation sont corroborés par les mesures expérimentales effectuées sur la maison voisine, exactement identique, mais habitée. Pour cette maison, la consommation électrique de chauffage d'appoint fut de 27 GJ pour la période novembre 1985/novembre 1986 et l'apport des collecteurs solaires et du stockage a été estimé à 4,7 GJ pour la même période, sur base du temps de fonctionnement des ventilateurs. Le total de 31,7 GJ est fort proche de l'estimation du premier cas.

Remarquons que ces 13 % d'apport moyen du système capteurs solaires/stockage se répartissent inégalement au cours de l'année. Cette fraction ne vaut en effet que 2 % durant le mois de janvier 1986, très peu ensoleillé, mais atteint 27 % au cours du très beau mois de février 1986. Cela montre, comme prévu, qu'un tel système n'est réellement intéressant que durant les périodes d'entre-saisons (lorsque la maison

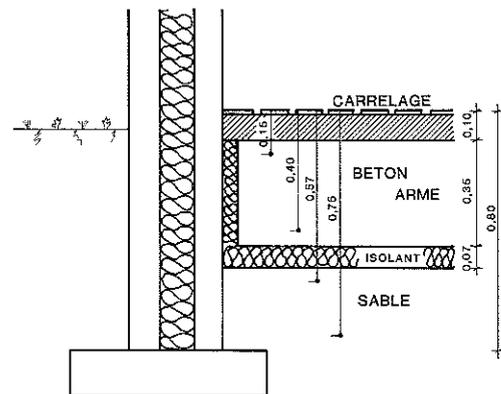


Fig. 4. — La dalle de sol et les emplacements des sondes de température (cotes en mètres)

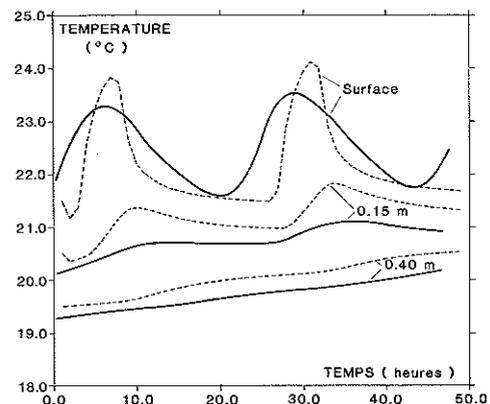


Fig. 5. — Evolution typique des températures dans la dalle de sol, au mois de juillet (valeurs mesurées en traits continus, valeurs simulées en traits discontinus)

doit être chauffée, mais que l'on peut bénéficier d'un bon ensoleillement).

Le suivi de la chute de température ambiante intérieure pendant une période de non-chauffage en octobre 1985 fournit une valeur moyenne du rapport U_H/C_H de $1,85 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, soit 0,16 degrés Celsius par jour et par degré d'écart entre la température intérieure et la température extérieure. L'inverse de ce rapport représente la constante de temps de la chute exponentielle de température intérieure qui tend vers l'ambiance extérieure, soit plus de 6 j.

Considérant une valeur du coefficient de transfert de chaleur, $U_H = 283 \text{ W/K}$, la capacité thermique de la maison est donc : $C_H = 153 \text{ MJ/K}$ (équivalent de 37 m^3 d'eau). La valeur estimée en calculant les masses du radier de sol, de la dalle du premier étage et des murs est de 133 MJ/K .

5. Étude de la dalle de sol

La figure 4 permet de visualiser la composition de la dalle de sol, ainsi que les emplacements des sondes de température à différentes profondeurs.

Plusieurs endroits de la dalle ont été testés afin de se rendre compte si celle-ci est efficace sur toute sa surface : zones ensoleillées, zones d'ombre et zones proches des murs extérieurs. Plusieurs campagnes de mesures ont été menées : en mars 1985, avril 1985 et juillet 1985.

La figure 5 (courbes en traits pleins) montre un

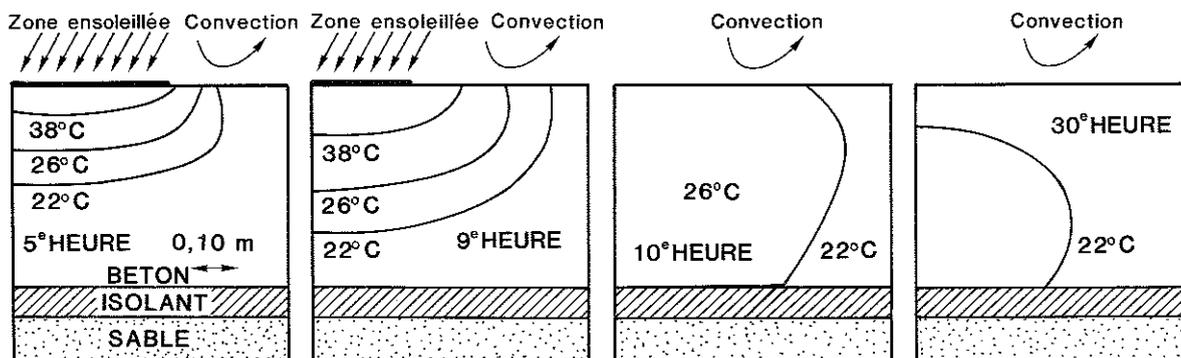


Fig. 6. — Evolution des isothermes dans le radier, calculés par le programme de simulation

résultat typique de mesure pendant une période de fonctionnement normal en juillet, pour une zone ensoleillée.

Les principales conclusions des mesures sont les suivantes :

- seuls les endroits ensoleillés sont sensibles aux variations diurnes de température, avec une amplitude pouvant dépasser 1 °C pour la sonde placée à 15 cm de profondeur ; l'élévation lente du niveau moyen de température met en évidence une accumulation de chaleur dans ces zones ; en revanche, la température varie peu dans les zones d'ombre ;

- dans le sable, sous l'isolant, la température reste quasi constante et l'on observe peu de différences entre les deux profondeurs étudiées ;

- dans les murs et le plafond, les effets quotidiens sont très nettement marqués, ce qui confère à ceux-ci un rôle que l'on avait peut-être sous-estimé dans l'étude de l'inertie de l'habitation ;

- la température ambiante intérieure sans chauffage demeure entre 10 et 14 °C, alors que la température extérieure varie de - 9 à + 10 °C (pendant 8 j au mois de mars) ; cela confirme l'effet de la bonne isolation et de l'inertie thermique de l'habitation.

En se basant sur le programme de calcul des éclairagements solaires sur une surface orientée et inclinée [4], il est possible d'estimer, pour une période fixée, la composante du rayonnement atteignant, par ciel moyen, le vitrage sud.

Connaissant les caractéristiques du vitrage, la position du soleil et la valeur de l'énergie solaire globale rayonnée, nous pouvons calculer à tout moment le coefficient de transmission thermique à travers le vitrage [5]. Ce coefficient, combiné à un calcul trigonométrique (épaisseur des murs, dimensions des fenêtres), permet de déterminer l'aire ensoleillée et la densité de puissance incidente sur le radier de sol.

Nous avons ensuite développé un programme calculant, par la méthode des différences finies dans une configuration monodimensionnelle [6], l'évolution des températures dans le béton de la dalle. Nous supposons le radier homogène, soumis sur sa surface supérieure à un échange convectif avec l'air ambiant ($h_r = 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) et recevant une puissance solaire atténuée par un coefficient d'absorption $\alpha_r = 0,6$. Pour une journée peu nuageuse (7 juillet 1985), les données d'ensoleillement mesuré sur la dalle de sol coïncident parfaitement avec le modèle. Cependant, celui-ci surestime les possibilités de stockage du radier, comme on peut le constater sur la figure 5 où les courbes en traits discontinus représentent les évolutions de

Période	Énergie stockée (MJ/m ²)
15/09 - 30/09	32,1
octobre	45,8
novembre	15,7
décembre	10,5
janvier	19,0
février	23,0
01/03 - 20/03	30,8
Total saison de chauffe	176,9

température issues de ce modèle : leurs intégrales dans le temps, images de l'énergie emmagasinée dans la dalle, sont toujours supérieures à celles des températures mesurées.

Le *tableau III* fournit, pour ces conditions idéales de la simulation et pour une maison vide, où le mobilier ne crée pas de zones d'ombre, l'énergie maximale stockable par mètre carré de radier pendant la saison de chauffe. Dans ce cas théorique idéal, il faudrait environ 3 ans pour rentabiliser l'investissement du béton pour les seules zones ensoleillées du radier.

Afin de se rendre compte de la propagation longitudinale du front de chaleur dans le béton, un programme de conduction thermique bidimensionnelle utilisant la méthode des éléments finis a été employé [2]. La densité de puissance solaire incidente a été choisie pour le 21 septembre, journée-type de demi-saison. Le pas de temps était de 1 h. Après 9 h de rayonnement sur la surface de la *tache solaire*, celle-ci est soumise au seul échange convectif avec l'air ambiant. La *figure 6* montre les isothermes dans une coupe de la dalle respectivement après la 5^e heure, la 9^e heure, la 10^e heure et la 30^e heure. On remarque la très mauvaise conduction latérale dans le béton : après 9 h, l'isotherme de 22 °C se trouve à 16 cm du bord de la zone initialement ensoleillée. Progressivement, les isothermes descendent et délimitent une zone de plus en plus petite, avant de disparaître. La zone d'ensoleillement couvre une surface moyenne de 4,2 m², avec un maximum de 6,8 m².

6. Étude du stockage en galets

Une étude expérimentale a été menée sur divers modèles réduits et petits volumes de cailloux. De cette

étude, il ressort que la valeur moyenne de la porosité ε_s du stockage est 0,39, avec un écart type de 1 ; cela correspond assez bien aux résultats d'autres stockages [7 et 8].

La masse volumique apparente moyenne de ces galets, ρ_s , est 1 638 kg/m³. Compte tenu de la porosité, la masse volumique de la pierre est donc 2 685 kg/m³.

La capacité thermique massique apparente mesurée, C_s , est 997 J.kg⁻¹.K⁻¹. Le volume du stockage, 7,65 m³, correspond donc à une capacité de 12 493 kJ/K.

En considérant une variation de la température du volume de galets de 20 °C à 60 °C maximum, l'énergie stockable s'élèverait donc à 500 MJ. Compte tenu d'un rendement moyen de collecteurs solaires de 40 %, cette énergie maximale peut être accumulée en 7 j moyens de demi-saison (mois de mars), ou en moins de 4 j si les journées sont particulièrement ensoleillées.

Les pertes de charges, le coefficient volumique de transfert de chaleur entre l'air et les cailloux et le nombre d'unités de transfert ont été calculés par les formules fournies dans [7]. Le *tableau IV* résume les résultats obtenus.

Le nombre d'unités de transfert (*NUT*) est défini, de la même façon que dans la théorie des échangeurs, comme le rapport du transfert de chaleur air-cailloux ($h_s A_s L$), qui représente la capacité de l'échangeur, à la capacité d'échange du fluide ($\rho_a C_a Q_v$). Ce nombre sans dimension peut donc être considéré comme un facteur de taille de l'échangeur.

Selon DUNKLE et ELLUL [9], la température de l'air à la sortie du stockage varie peu lorsque *NUT* est supérieur à 100, ce qui assurerait un meilleur rendement de stockage. Dans notre cas, cette condition n'est pas respectée : cela semblerait montrer que la puissance échangée entre le fluide et les galets reste légèrement trop faible.

Les 11 mesures de température à l'intérieur du volume de cailloux montrent une excellente répartition du flux d'air, sans passages préférentiels quelconques. Cela est dû au soin apporté à la fois au choix du diamètre et de la forme des cailloux et également à la mise en place des galets afin d'obtenir un lit le plus homogène possible. De plus, la section droite du stock (2,25 m²) est grande pour le volume envisagé. Cependant, on constate expérimentalement un net court-circuit du flux thermique par conduction à travers les parois métalliques de la cuve : en mode de charge, on observe une avance du front thermique pour les zones périphériques (à 15 cm du bord) par rapport à la zone centrale de la cuve.

7. Étude du système capteurs solaires-stockage

Les performances moyennes des capteurs solaires ont été mesurées au cours de journées ensoleillées du mois de septembre.

Pour un ensoleillement de 400 W/m², le rendement moyen mesuré des capteurs est 0,5, soit un coefficient $F_R \tau_c \alpha_c$ de 0,65 et un coefficient $F_R U_c$ de 5,6 W.m⁻².K⁻¹. La perte thermique est légèrement supérieure à la valeur estimée (§ 2,3).

Le ratio du volume de stockage à la surface de

TABLEAU IV		
Caractéristiques du système de stockage en galets		
	Charge	Décharge
Débit d'air Q_v (m ³ /s)	0,194	0,306
Nombre de Reynolds Re	136	215
Coefficient de transfert h_s (W.m ⁻³ .K ⁻¹)	2 274	3 129
Pertes de charge Δp (Pa)	41	88
Nombre d'unités de transfert <i>NUT</i>	75	65

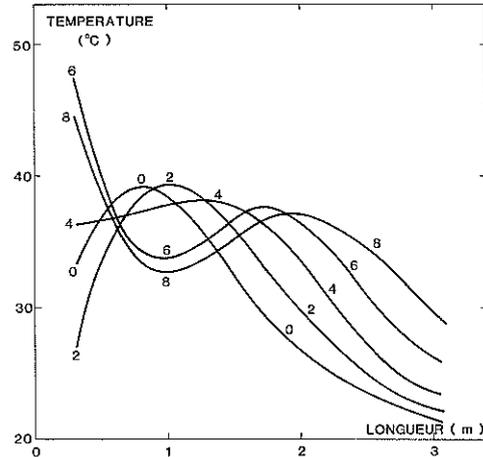


Fig. 7. — Charge thermique : températures relevées dans le stockage (les chiffres accompagnant chaque courbe représentent des heures de charge)

capteurs est égal, dans notre cas, à 0,44 m³/m², ce qui est évidemment nettement inférieur aux ratios préconisés pour les stockages de longue durée, d'au moins 5 m³/m² [7].

La *figure 7* montre l'évolution d'une onde thermique lors de la charge pour le 26 septembre 1986 à partir de 9 h 30. On y observe les mesures de température, lissées par des fonctions splines, en fonction de la profondeur dans le volume de stockage. Pour la clarté de la figure, seules les 8 premières heures de charge sont représentées.

Dès la 6^e heure de charge (à 15 h 30), la température à l'entrée du stockage a commencé à diminuer. Normalement, la régulation devrait alors stopper le flux thermique en provenance des collecteurs. Pour cette campagne de mesures, nous avons mis la régulation hors-circuit, de façon à visualiser l'onde thermique jusqu'à la 17^e heure, ce qui met en évidence un effet ondulatoire bien marqué. Le suivi s'est poursuivi alors jusqu'à la 24^e heure, à débit d'air nul.

La vitesse moyenne de déplacement d'un maximum de température (passage par zéro de la dérivée) a été estimée à 0,16 m/h, avec cependant un écart type important : 0,1 m/h.

Selon la théorie, la vitesse de déplacement du flux thermique devrait idéalement valoir : $Q_v \rho_a C_a / A_s \rho_s C_s$ soit, dans notre cas, environ 0,23 m/h lors de l'injection et 0,36 m/h lors du soutirage.

Le temps réel nécessaire au flux pour parcourir la longueur totale du volume est 21 h, soit presque une journée. Cela, ajouté aux données de capacité thermique, montre que le volume de stockage en galets a été correctement dimensionné pour une autonomie d'un jour.

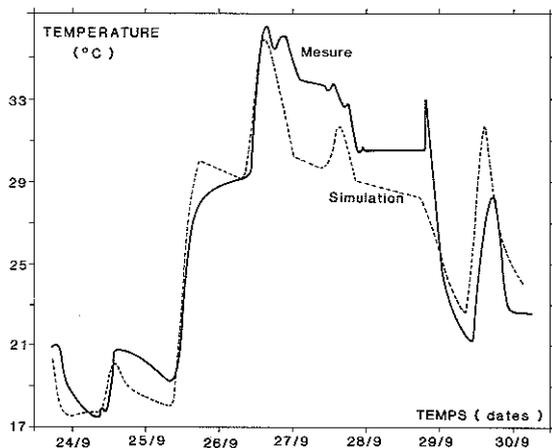


Fig. 8. — Comparaison de l'évolution de la température moyenne mesurée dans le stockage (trait continu) et du résultat d'une simulation par TRNSYS (trait discontinu)

Entre la 17^e et la 24^e heures, la relaxation à débit nul entraîne, comme on pouvait s'y attendre, un aplatissement progressif de la courbe de température, dû uniquement à la conduction, sans mouvement unidirectionnel.

Citons enfin quelques résultats d'une étude réalisée sur le système capteurs solaires-stockage, simulé au moyen du logiciel TRNSYS. Les paramètres réels ont été injectés dans les modules collecteurs solaires (type 1), stockage en lits de cailloux (type 10), ventilateur (type 3) et contrôleur tout ou rien (type 2).

La figure 8 montre l'évolution de la température moyenne dans le stockage pour une semaine du mois de septembre. La courbe en trait plein représente la température mesurée et la courbe en trait discontinu représente le résultat de la simulation par TRNSYS où ont été injectées les conditions réelles de températures initiales, de régulation et de climat extérieur. On constate une assez bonne similitude en ce qui concerne l'allure générale de ces courbes. Certaines variations ne sont cependant pas expliquées par cette simulation trop simple : le modèle du stockage est unidimensionnel, il néglige le gradient de température dans les galets et suppose un flux uniforme de l'air dans le lit de cailloux. Une telle simulation, même imparfaite, reste cependant appropriée pour comparer des comportements relatifs et étudier l'influence des paramètres.

Cette étude systématique a été réalisée et les résultats, que nous ne reproduisons pas ici dans le détail, ont donné lieu à des conclusions intéressantes. C'est ainsi que, dans les conditions de débit et de volume de stockage envisagés, on constate que la surface de captation de l'énergie solaire (17,5 m²) est effectivement très proche d'une valeur optimale au-delà de laquelle la température atteinte après une journée-type de stockage n'augmente plus de façon sensible. En revanche, les conditions de régulation (différentiel de température, hystérésis) n'influencent pas fortement les performances du système à long terme. Le rendement de collecte et de stockage de l'énergie solaire atteint une quasi-saturation pour un débit d'air égal à 1 000 m³/h, qui est proche du débit calculé initialement par le concepteur de l'installation.

Enfin, le modèle indique que le paramètre le plus sensible est l'isolation de la cuve de stockage : l'énergie stockée quotidiennement peut doubler entre une

isolation de 10 cm et une isolation de 30 cm de laine de verre.

8. Discussion

Dans l'esprit des concepteurs, ces maisons devaient répondre à un certain nombre de critères :

- très grande inertie, donc masse importante ;
- faible consommation, donc bonne isolation thermique ;
- apport solaire passif, donc grande surface vitrée côté sud ;
- conservation de cet apport passif, donc dalle de sol épaisse ;
- raccourcissement de la période de chauffage électrique, donc capteurs solaires ;
- stockage de l'énergie solaire, donc volume de galets.

A l'issue des campagnes de mesures, on peut affirmer que le contrat est rempli. En effet, avec une capacité thermique de 153 MJ/K, une charge annuelle de 32 GJ, un apport passif de 11 GJ à travers 22 m² de vitrage sud, une dalle de sol recevant 177 MJ d'énergie solaire par mètre carré, un apport de 15 % de la charge par les collecteurs solaires à air et un tampon de près de 8 m³ de galets assurant juste une autonomie d'une journée pour la demi-saison, ces maisons répondent en effet à l'attente des concepteurs.

Cependant, une analyse des bilans réels n'encourage pas ce type de démarche. La charge thermique totale de l'habitation s'élève à 43,2 GJ au cours d'une année normale. Lorsque l'on déduit les apports passifs par le vitrage sud, la charge nette à fournir est 31,7 GJ.

Dans la maison habitée, on a pu mesurer un apport du système solaire actif avec son stockage de 4,7 GJ. Et, si l'on tient compte de la consommation des ventilateurs (2,1 GJ), la fraction solaire active s'élève à 8 % seulement de la charge nette. Les estimations des concepteurs, corroborées par des extrapolations faites en partant des mesures réalisées sur la maison inhabitée, étaient plus optimistes en annonçant une fraction solaire active de l'ordre de 20 % [10].

Par ailleurs, une étude technico-économique un peu plus approfondie révèle un certain nombre de défauts au système actuel. La dalle de sol, utilisée comme capteur et stockage d'énergie solaire, s'avère peu adéquate : seule la zone ensoleillée est réellement utile et l'épaisseur est un peu exagérée. Par rapport au cas idéal modélisé, il faut tenir compte de l'occupation des locaux : mobilier, rideaux, ombres diverses, etc. Dans un cas réel, les murs et les plafonds semblent participer davantage à l'accumulation de la chaleur.

Par ailleurs, comme nous l'avons signalé, lorsque la surface de capteurs solaires verticaux est remplacée par un double vitrage, le gain annuel d'énergie solaire passive s'élève à 1 759 MJ, soit seulement 2,5 fois moins que l'apport solaire actif : l'investissement est-il justifié ? Pourtant, avec la surface actuelle de vitrage sud, il se pose déjà des problèmes de surchauffe pendant les jours ensoleillés. Ces problèmes sont partiellement résolus par la fermeture de volets extérieurs : on coupe la source de chaleur. Il serait probablement plus rationnel d'extraire cet excédent

d'énergie à l'intérieur de l'habitation et de le stocker. Dans ces conditions, même une surface de vitrage plus grande pourrait être supportée lors de journées ensoleillées. La maison agirait dès lors comme un immense collecteur solaire, remplaçant avantageusement les capteurs en façade. Une optimisation de la surface de vitrage pourrait allier les contraintes de coût, de confort, de captation d'énergie gratuite et de déperditions thermiques. Et, pour garder le principe d'une dalle énergétique, au demeurant très valable, on pourrait y inclure, en sandwich, le stockage en galets et éviter d'empiéter sur le volume habitable.

C'est ce nouveau dispositif qui a été imaginé par les concepteurs pour les 13 nouvelles maisons de la série, sur base des mesures effectuées sur les prototypes. En partant du même type d'enveloppe, bien isolée, la surface de vitrage sud a été portée à 32 m². Un système de bouches et gaines d'air permet d'extraire la chaleur des pièces avec un débit de 2 500 m³/h et de l'injecter dans un volume de 6 m³ de galets inclus dans une dalle de 8,5 m³ de béton.

Au point de vue économique, cette conception nouvelle permet de réduire de moitié le surcoût *solaire* de la maison en l'amenant ainsi à environ 7 % du coût global de l'habitation. L'économie liée à cette configuration est due à la parfaite intégration d'un système de chauffage dans le gros œuvre classique de l'habitation.

Ces maisons font actuellement l'objet d'un suivi scientifique. Les premiers résultats sont encourageants. Une étude complète sera publiée dans un prochain article.

9. Conclusion

Le contact permanent entre concepteurs et équipes de recherche engendre l'action et l'amélioration des processus. Ici, l'idée de la gestion énergétique d'une habitation par l'intermédiaire d'une dalle de sol a mûri et a évolué d'un prototype à l'autre.

Cette idée est à retenir ; les volumes mis en œuvre correspondent aux bons ordres de grandeur, et c'est en ajoutant une variable supplémentaire — le coût de la maison — que le concepteur pourra aboutir à la forme finale d'une habitation où confort et économique d'énergie sont réunis.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LORENTZ (F.) — *User's guide LPB4*. Laboratoire de Physique du Bâtiment, Université de Liège. Dans le cadre du Programme National RD Energie financé par les Services de Programmation de la Politique Scientifique et avec la participation des Communautés Européennes.
- [2] PIRCHER (H.). — *Description of the finite element program system MISES3*. Technische Datenverarbeitung, Rev. 7.40, décembre 1983.
- [3] TRNSYS. — *A transient simulation program*. Solar Energy Laboratory, Rep. n° 38, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, February 1978.
- [4] DOGNIAUX (R.) et LEMOINE (M.). — *Programme de calcul des éclairagements solaires énergétiques et lumineux de surfaces orientées et inclinées*. Institut Royal Météorologique de Bruxelles, 1976.
- [5] DUFFIE (J.A.) and BECKMAN (W.A.). — *Solar energy thermal processes*. Wiley - Interscience Publication, 1974, p. 111.
- [6] ROHSENOW (W.M.) and HARNETT (J.P.). — *Handbook of heat transfer*. McGraw Hill Book Company, 1973, p. 4-51.
- [7] BOURDEAU (L.), DELCAMBRE (B.), MARTIN (L.) et RUBINSTEIN (M.). — *Stockage thermique de longue durée par lits de cailloux*. Cahier 1856 du CSTB, n° 240, juin 1983.
- [8] KING (R.) and BURNS (A.P.). — *Sensible heat storage in packed beds*. Proceedings of International Conference on Energy Storage, Brighton, UK, April 29-May 1, 1981.
- [9] DUNKLE (R.V.) and ELLUL (W.M.J.). — *Randomly packed particulate bed regenerators and evaporative coolers*. Mech. and Chem. Eng. Trans. I.E. Aust, vol. MC8, n° 2, 1972, p. 117-121.
- [10] DUTRE (W.), CYPERS (L.), BERGMANS (J.), DEBOSSCHER (A.) et GILLIAERT (D.). — *Gebruik van zonne-energie in de woonruimte*. Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, 1979, p. 182.

REMERCIEMENTS

Ce travail a pu être mené à bien grâce à la collaboration de la société SOLETRA, représentée par Monsieur J.-P. BARBASON, et à celle de l'architecte, A. VIGNERON. Qu'ils soient remerciés par la confiance qu'ils nous ont accordée dans le cadre de cette étude.

