

SOCIETE FRANCAISE DES THERMICIENS

JOURNEE D'ETUDE DU 14 AVRIL 1993

CONNAISSANCE ET UTILISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE:

EVOLUTION, NOUVEAUTES, RETOMBÉES PRATIQUES

L'ISOLATION TRANSPARENTE :

UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE AU SERVICE DU SOLAIRE THERMIQUE

Bruno Peuportier, Ecole des Mines, Centre d'Energétique

60 Bd St Michel, 75272 PARIS cedex 06

Résumé

Les recherches concernant l'isolation transparente ont pour but de rendre le captage solaire thermique plus efficace en maximisant l'effet de serre. Les applications les plus intéressantes concernent pour le moment le chauffage des bâtiments, l'eau chaude sanitaire, et éventuellement des gammes de température un peu plus élevées (cuisson, stérilisation,...). Divers instituts en RFA (surtout le Fraunhofer Institut de Freiburg) étudient des technologies variées, comme les structures capillaires ou en nids d'abeilles, et nous avons souhaité tester en France l'utilisation de ces matériaux pour le chauffage des bâtiments, selon de nouvelles techniques de mise en oeuvre.

L'Architecte Jacques Michel, un des spécialistes de l'Architecture Solaire, et la Société HLM ESPACE HABITAT ont accepté de tenter l'expérience, dans le cadre d'un lotissement situé à Mouzon dans les Ardennes. L'ADEME soutient cette opération en subventionnant la moitié du surcoût et la campagne de mesures. Nous présentons ici les résultats de nos travaux, à la fois théoriques et expérimentaux, sur la modélisation et les mesures in situ.

L'isolation transparente est un concept, correspondant à un matériau idéal qui maximiserait l'effet de serre. L'idée est d'obtenir un rendement de captage le plus élevé possible en recherchant une bonne transmission du rayonnement solaire et des pertes thermiques les plus faibles possibles. 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.

En effet, un industriel israélien a réussi à extruder des polymères avec des épaisseurs très faibles. Les structures ainsi obtenues ont été utilisées pour recouvrir des "mares solaires", bassins de

stockage pour des systèmes collectifs d'eau chaude sanitaire. Le Fraunhofer Institut de Freiburg a ensuite appliqué l'isolation transparente sur des bâtiments, et de nombreuses recherches ont été menées en RFA sur ce thème [1].

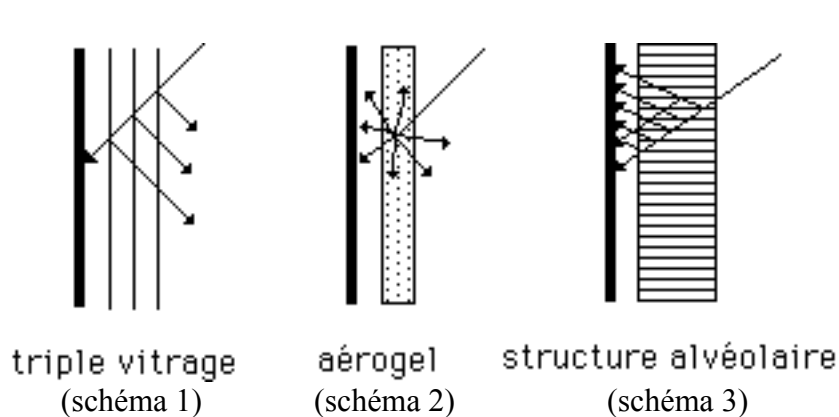
Ces technologies créent ainsi de nouvelles possibilités dans le domaine du solaire thermique, en permettant d'atteindre des rendements plus élevés et de diminuer les pertes dans les composants de type capteurs-stockeurs. En fonction de l'application et du climat, le meilleur compromis donnera la priorité à la transparence ou à l'isolation.

Les technologies

Différentes voies ont été explorées, afin de minimiser les pertes thermiques par conduction, convection, et rayonnement grande longueur d'onde, tout en maximisant la transmission du rayonnement visible et proche infra-rouge [2].

Le vide, réalisé entre deux vitrages, permet d'éviter les transferts par conduction et convection [3]. Des revêtements à basse émissivité peuvent être employés pour réduire les transferts radiatifs. Cette technique impose cependant la bonne tenue de la couverture transparente à la différence de pressions entre ses deux faces. Dans le cas du verre, cette condition est satisfaite avec une forme cylindrique (bouteille thermos). Mais dans le cas de surfaces planes, il faut recourir à des supports, qui induisent alors des échanges convectifs. Il faut également assurer une très bonne étanchéité, ce qui est difficile à réaliser en pratique. Les aérogels de silice, placés entre deux vitrages (sous-vide ou non), constituent également une voie de recherche prometteuse [4]. L'industrialisation de ces différents procédés n'ayant pas encore abouti, nous ne les considérons pas dans cet exposé concernant plutôt les applications de l'isolation transparente.

Nous nous limiterons donc aux structures capillaires ou en nid d'abeille, pour lesquelles des produits existent déjà sur le marché. Il s'agit de matériaux polymères, ou de verre, mis en forme de façon à constituer des cellules suffisamment fines pour éviter les transferts convectifs. Le matériau étant plutôt absorbant dans le domaine des grandes longueurs d'onde, les pertes radiatives sont diminuées. Par contre, la transmission du rayonnement solaire est élevée si les cellules sont perpendiculaires à la surface de l'absorbeur du capteur solaire ou du mur (cf schéma suivant).



Avec un triple vitrage (schéma 1), les rayons réfléchis sur les vitres successives sont redirigés vers l'extérieur du capteur, cette énergie est donc perdue. Avec une structure diffusante, par exemple de l'aérogel en billes (schéma 2), une proportion du rayonnement diffusé est également perdue. Par contre lorsque les cellules sont perpendiculaires à la surface absorbante (schéma 3), le rayonnement est toujours réfléchi vers l'intérieur.

Les quatre paramètres caractéristiques (inclinaison, longueur et section des cellules, épaisseur de leurs parois) ayant des effets contradictoires, la maximisation des gains solaires nets dans une structure alvéolaire est assez complexe [5].

Pour maximiser les gains bruts, il faut transmettre au mieux le rayonnement visible (épaisseur des parois faible, cellules de longueur petite et de section importante). Pour réduire les pertes par

conduction, il faut également des parois fines mais une grande longueur (1ère contradiction). Pour réduire les pertes par convection, il faut diminuer la section (2ème contradiction). Pour réduire les pertes par rayonnement (la surface chaude émet un rayonnement infra-rouge vers l'extérieur), il faut des parois épaisses (3ème contradiction), une petite section et une grande longueur. Il y a donc un compromis à trouver en fonction de l'application et du climat. L'inclinaison des cellules a également une importance. Le rapport largeur/hauteur des cellules semble moins déterminant, et leur forme peut donc être choisie pour réduire le coût de fabrication.

Une section rectangulaire est préférable si on extrude d'un seul bloc un ensemble de cellules. Pour simplifier, nous adopterons pour cette structure la terminologie "nids d'abeille", même si la section n'est pas hexagonale. Un autre procédé consiste à extruder un fil, cylindrique cette fois, à l'enrouler sur un grand cylindre, à couper la longueur L voulue et à empiler les cellules ensuite. L'intérêt de ce procédé est de pouvoir obtenir des sections plus faibles, nous parlerons alors de structures capillaires.

Lorsque l'isolation thermique est prioritaire, le type capillaire sera préféré. Nos travaux de modélisation ont pour but de déterminer, en fonction de la géométrie, les paramètres énergétiques caractéristiques: le facteur solaire, qui caractérise la transmission énergétique du rayonnement, et le coefficient de pertes thermiques. Ceci a pour objectif de choisir la configuration la plus appropriée en fonction de l'application, qui détermine le niveau de température souhaité, et du climat, auquel correspondent des profils de température extérieure et de rayonnement solaire.

Le tableau suivant donne, pour différents composants transparents actuellement sur le marché, un ordre de grandeur des deux facteurs pertinents au niveau thermique, afin de synthétiser la progression des performances.

type de composant	coefficient de pertes thermiques U en W/m ² /K	facteur solaire en % à une incidence de 30°
simple vitrage 4 mm	5,7	87
double vitrage 4/6/4	3,4	79
double vitrage 4/6/4 avec revêtement à basse émissivité	2,9	74
polycarbonate extrudé triple paroi 16 mm	2,4	70
isolant transparent 5 cm	1,5	73
isolant transparent 10 cm	1,0	72

La recherche de l'isolation et de la transparence maximales constitue donc un défi technologique qui continue à motiver de nombreuses équipes de recherche.

Les applications

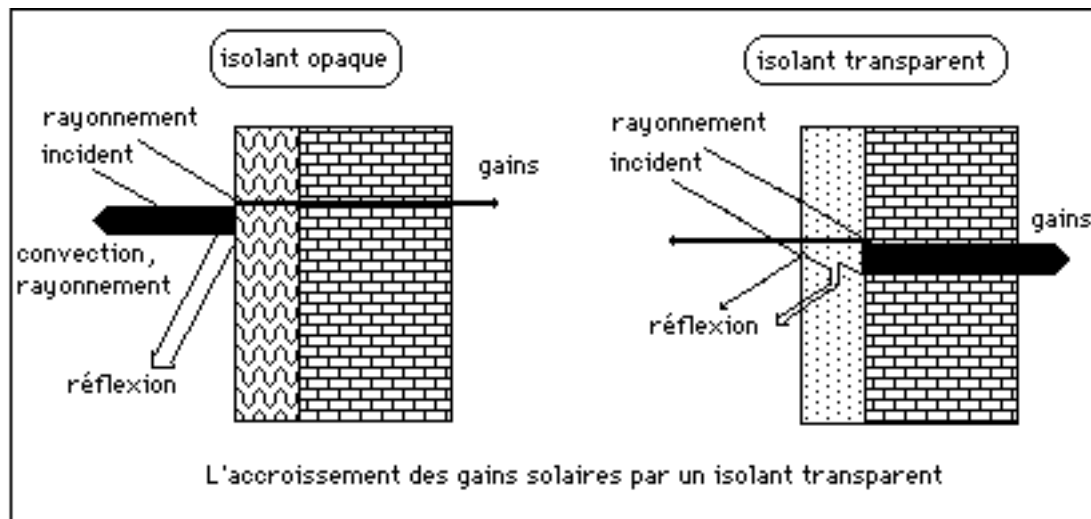
Voici l'éventail actuel des applications possibles, classées par niveau de température croissant [2].

Le chauffage et l'éclairage des bâtiments

L'isolation transparente peut se substituer à deux composants "traditionnels" du bâtiment: d'une part l'isolation thermique, et d'autre part les vitrages.

Dans le premier cas, il s'agit bien sûr d'une isolation par l'extérieur, qui doit être placée devant une maçonnerie afin de stocker la chaleur du jour sur la nuit. Le schéma 5 permet de visualiser l'intérêt de l'isolation transparente.

Schéma 5: intérêt de l'isolation transparente pour le chauffage des bâtiments



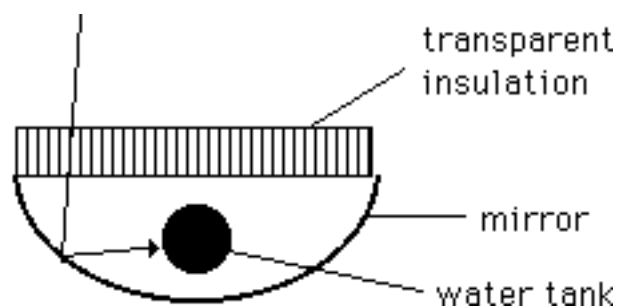
Dans le cas d'un mur à isolation opaque, la plus grande part du rayonnement solaire absorbée est perdue, étant renvoyée vers l'extérieur par convection et rayonnement. Lorsqu'on place un isolant translucide à l'extérieur du mur, le rayonnement solaire traverse ce matériau, et arrive sur la surface absorbante située du côté intérieur à l'isolant. La chaleur passe alors préférentiellement vers le mur, qui offre une résistance thermique moindre. Le mur s'échauffe, devenant source de chaleur au lieu d'être déperditif. De plus, le gain solaire est transmis avec un déphasage, et prend la relève en fin de journée des gains instantanés par les vitrages. L'énergie arrive au bon moment dans l'habitat. La pose ayant lieu à l'extérieur du bâtiment, la mise en oeuvre se prête bien à la réhabilitation de bâtiments non isolés.

L'isolation transparente peut aussi remplir toutes les fonctionnalités des vitrages diffuseurs de lumière: baies vitrées, toiture de véranda, couverture transparente de mur capteur ou de capteur solaire, etc. La diffusion de la lumière présente des avantages très intéressants en éclairage naturel. Elle permet d'éviter l'éblouissement, ainsi que les ombres sur des surfaces de travail par exemple. De plus, elle fournit un éclairage indirect qui pénètre plus profondément dans les pièces. Mais l'inconvénient est qu'il n'est pas possible de distinguer le paysage extérieur (les aérogels en plaques pourront apporter une solution à cela).

L'eau chaude sanitaire

Nous avons vu que cette application a concerné d'abord des systèmes collectifs. Depuis, divers fabricants allemands de chauffe-eau solaires individuels ont développé des produits de type capteur stockeur, selon le principe conçu à l'Institut Fraunhofer de Freiburg (cf schéma 6).

Schéma 6: chauffe eau solaire individuel

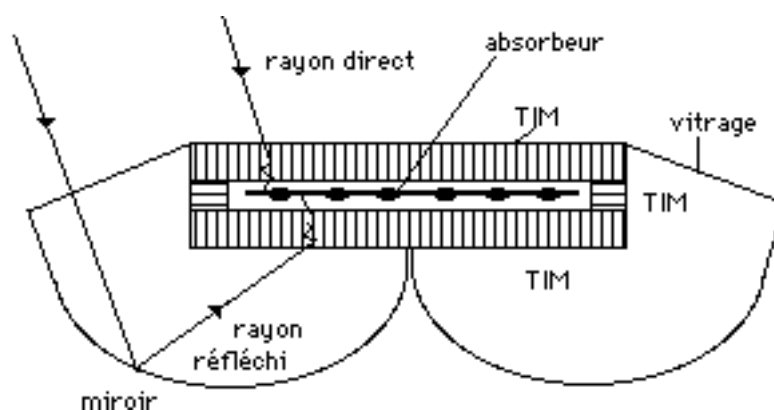


L'intérêt de ce système est d'être "naturellement" hors gel, et d'un coût moindre qu'un chauffe eau solaire classique type thermosiphon. Un tel système a été monté en façade sud d'une maison individuelle [6]. Cette configuration assure une bonne stratification des températures dans le stock d'eau.

Les usages moyennes températures

Il s'agit de procédés industriels, ou par exemple d'installations de dessalement d'eau de mer. Le niveau de température peut alors imposer de choisir des matériaux plus résistants que le polycarbonate: des téflons ou même du verre.

schéma 7 : capteur "bifacial" pour moyennes températures

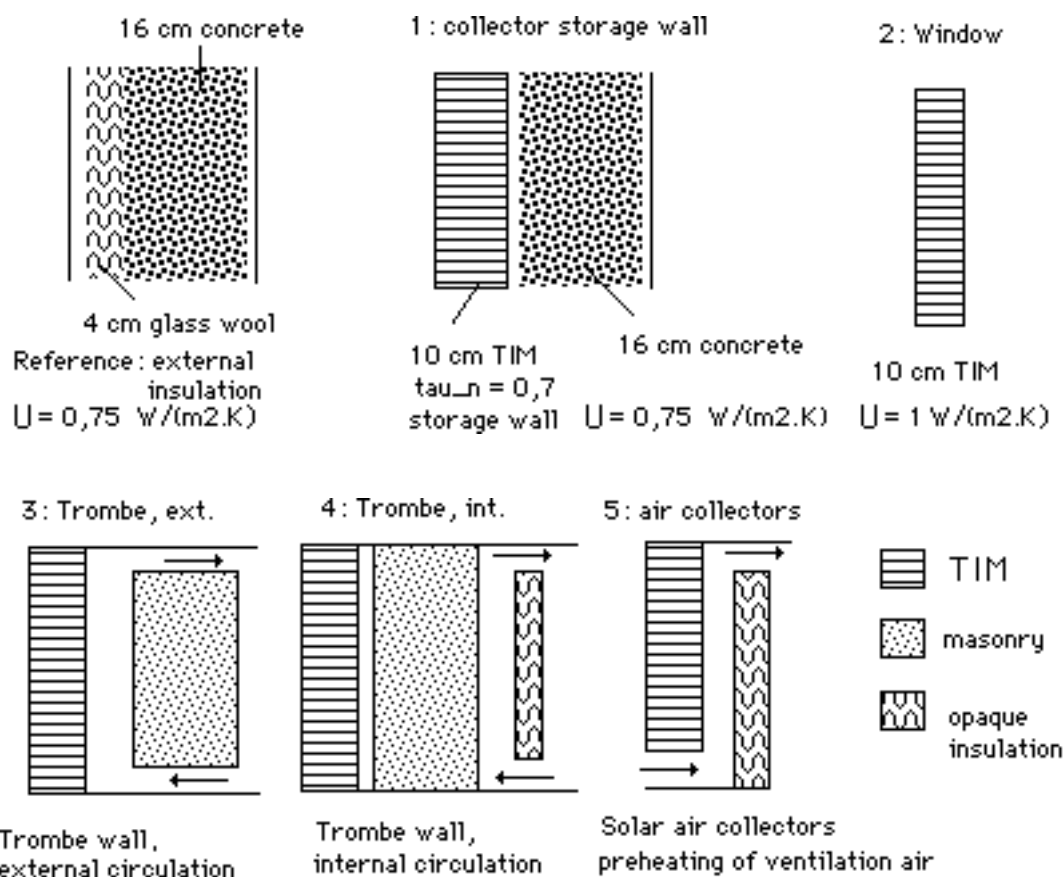


Pour diminuer encore les pertes, le matériau isolant transparent (TIM) est placé sur les deux faces de l'absorbeur. Le rendement est alors supérieur à celui de tout autre capteur solaire sans concentration, y compris les capteurs sous vide [7].

Etude comparative de différentes configurations pour le chauffage

Avant de tester expérimentalement l'isolation transparente, nous avons préféré procéder à une évaluation théorique afin de comparer diverses possibilités de mise en oeuvre. Cet examen a porté sur les performances en terme de réduction des besoins de chauffage, mais aussi en terme de confort d'été et de coût. La figure 8 suivante montre les configurations considérées : (1) un mur solaire capteur stockeur, (2) un vitrage isolant, un mur Trombe [8] avec circulation d'air intérieure (3) ou extérieure (4), des capteurs à air (5). Le mur de référence est isolé par 4 cm de laine de verre, ce qui donne un coefficient de pertes égal pour les deux types d'isolation (référence et type 1).

Figure 8 : Comparaison de divers types d'intégration architecturale



Le tableau suivant donne la productivité annuelle en kWh/m²/an pour divers climats : l'économie de chauffage réalisée par rapport à la référence est divisée par la surface d'isolation transparente (10 m²). Il s'agit ici d'une maison individuelle de 100 m². Les calculs sont effectués avec COMFIE, logiciel de simulation thermique en multizone [9].

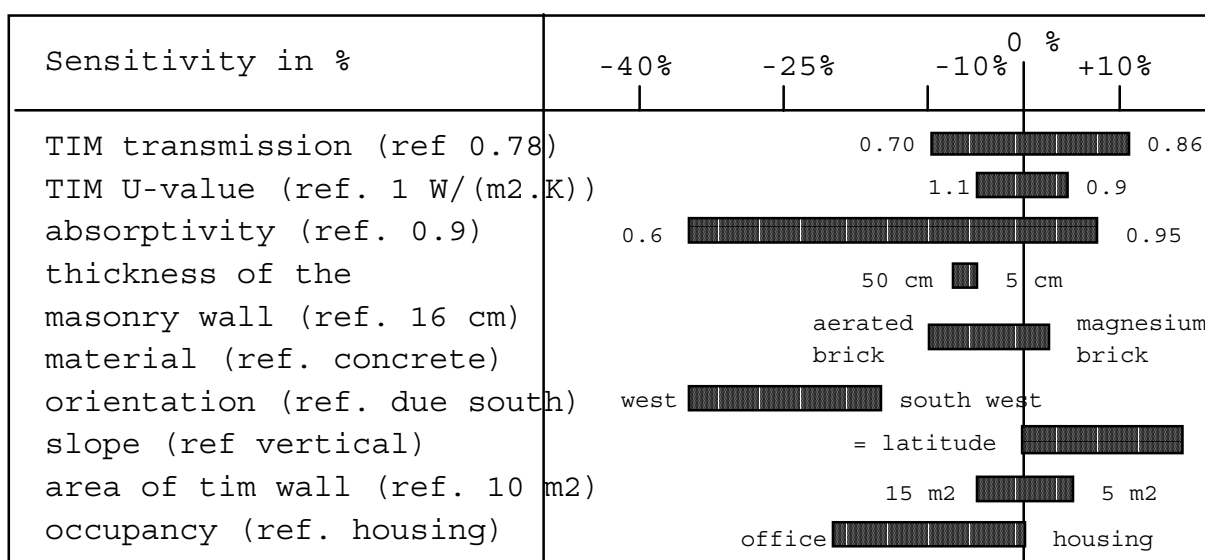
PRODUCTIVITE EN kWh/(m².an)

case	PARIS	CARPENTRAS	NICE
1 Collector storage	180 (165 = Nancy)	240	180 (320 = Alps)
2 Window	170	220	165
3 Trombe ext.	175	235	180
4 Trombe int.	150	195	160
5 Air collectors	210	215	155

On voit que ce n'est pas à Nice que la productivité maximale est obtenue: il faut que les besoins de chauffage soient élevés pour que les économies réalisables le soient aussi. Les systèmes actifs semblent plus efficaces (cas 5), les praticiens mettent cependant en garde contre les problèmes de maintenance. En ce qui concerne les systèmes passifs, nous avons préféré écarter les choix 1 et 2 du fait des risques de surchauffe. En effet, ces systèmes nécessitent des occultations amovibles qui élèvent les coûts de mise en oeuvre et compliquent la gestion pour l'occupant. Le système de mur "Trombe-Michel" à circulation intérieure semble de ce point de vue plus intéressant: la contre-cloison isolée permet d'éviter les surchauffes d'été si les événements sont fermés. L'occupant n'a donc que deux interventions - très simples - à effectuer par an. Enfin, les systèmes 4 et 5 n'avaient pas encore été testés avec une isolation transparente, les bâtiments prototypes de Freiburg correspondaient au mur capteur stockeur (cas 1) ou aux vitrages isolants (cas 2). Il était donc plus intéressant d'expérimenter ces nouvelles configurations.

Nous avons également effectué des études de sensibilité afin d'optimiser divers paramètres pour la construction de tels murs. Le tableau suivant résume les principaux résultats.

Sensibilité de la productivité à divers paramètres



Le revêtement de la surface absorbante joue donc un grand rôle. Au niveau esthétique, il faut noter que l'isolation transparente masque la surface noire tant décriée par les détracteurs du mur Trombe. On constate aussi que la productivité est liée à l'utilisation du bâtiment. Ces travaux théoriques ont contribué à mieux définir le projet expérimental que nous avons souhaité réaliser.

Description du projet de démonstration

L'Architecte Jacques Michel préparait un projet de lotissement solaire à Mouzon, dans les Ardennes, et l'Architecte des bâtiments de France avait rejeté 4 des six maisons, situées à moins de 500 mètres d'un monument historique. Le projet initial, avec des systèmes actifs, a alors dû être remanié dans ces 4 maisons pour remplacer les capteurs en toiture par des murs solaires [9]. Nous avons donc eu l'opportunité de proposer notre projet au bon moment, et le Maître d'Ouvrage ESPACE HABITAT a également été d'accord pour tenter l'expérience. L'ADEME a financé la moitié du surcoût solaire, l'entreprise étant HOUOT (constructions à ossature bois).

Deux systèmes - l'un actif, l'autre passif- peuvent ainsi être comparés sur ce site. Dans les deux configurations, deux types de composants transparents sont comparés:

- une structure capillaire en polycarbonate, encapsulée entre deux vitres et fabriquée par la Société OKALUX (maisons 3, 5 et 7);

- une plaque alvéolaire, du polycarbonate extrudé en triple paroi, fabriquée par CELAIR (maisons 3 bis, 4 et 9).

Figure 9 : SYSTEME "PASSIF" (Maisons 3,3bis,7 et 9)

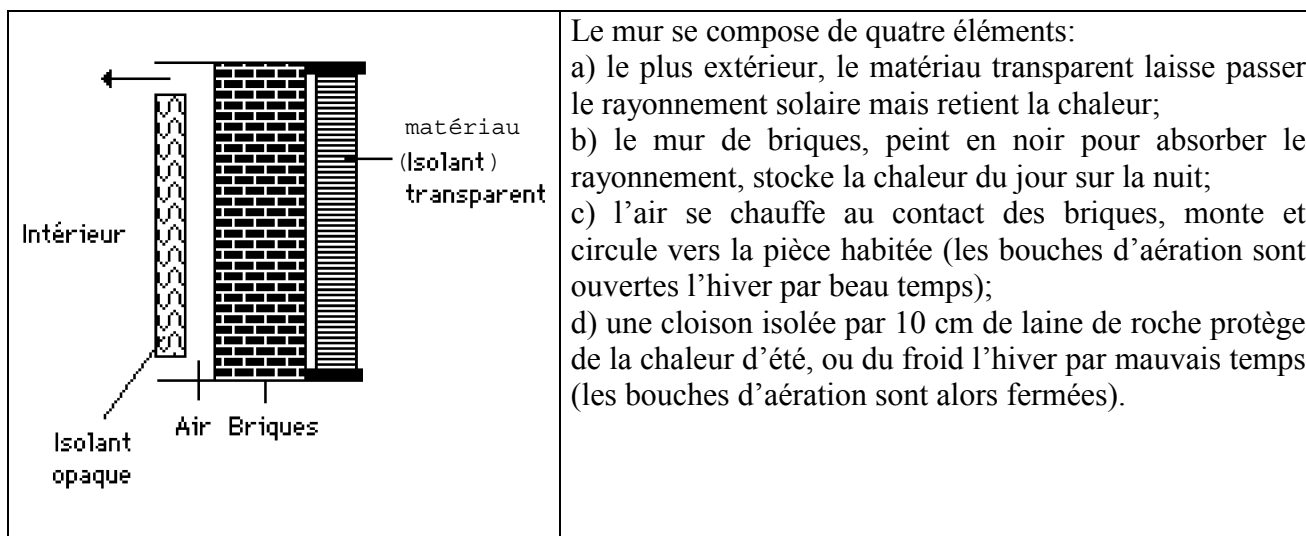
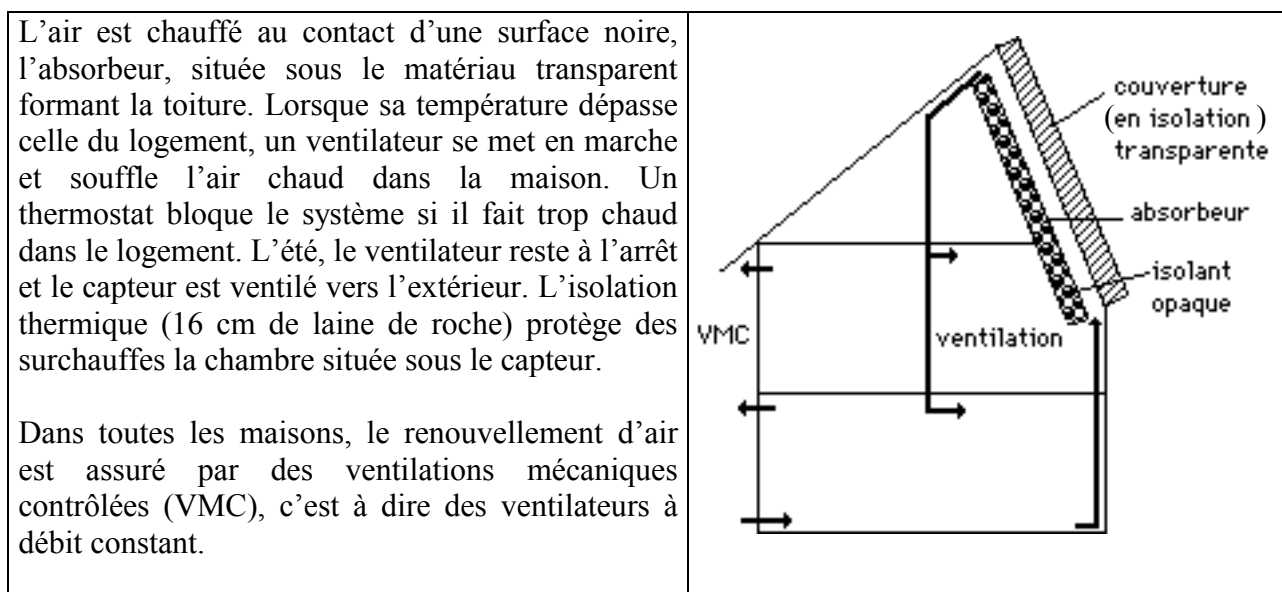


Figure 10 : SYSTEME "ACTIF" (Maisons 4 et 5)



Premières évaluations théoriques

Des simulations ont été effectuées sur une année type correspondant au climat de Nancy. Le tableau suivant donne les résultats pour les deux systèmes et les deux types de matériaux. La fraction solaire, prenant en compte l'ensemble des gains utiles par les parois vitrées et opaques, s'échelonne entre 30% et 45% selon les systèmes. Les surfaces d'isolation transparente sont de 13 m² pour les systèmes passifs et de 17 m² pour les systèmes actifs. Les maisons sont constituées par deux niveaux de 60 m² chacun.

configuration (surface habitable : 2 x 60 m ²)	besoins de chauffage (kWh/a)	besoins par m ² (kWh/m ² /a)	fraction solaire (%)
mur Trombe , polycarbonate	7696	64	31
mur Trombe , 10 cm OKALUX	6965	58	35

système actif, polycarbonate	6030	50	40
système active, 5 cm OKALUX	5339	44	44

Résultats comparatifs pour les différents systèmes (obtenus par simulation avec COMFIE)

Les simulations ont également montré un risque de surchauffe d'été. Mais ce risque est dû à la très faible inertie des maisons et non au chauffage solaire. En effet, les composants de captage sont isolés des pièces habitables et la circulation d'air est stoppée l'été.

Résultats des mesures expérimentales

L'objectif de ce suivi est d'évaluer les performances de ces divers composants sous nos climats, en matière d'économie de chauffage mais aussi de confort d'été, de facilité de mise en oeuvre, d'esthétique et de coût.

Les six maisons ont été instrumentées avec l'assistance technique du CSTB, et les mesures sont transmises par le réseau téléphonique à trois Centres de Recherche: l'Institut Fraunhofer de Freiburg, l'I.U.T. de Longwy, et l'Ecole des Mines.

Résultats sur l'été

Dans des constructions très légères (ossature bois, plancher bois), la température limite de confort est souvent atteinte en période de chaleur habituelle (30° à l'extérieur, 27 à 28° à l'intérieur), et le confort ne peut plus être assuré en période de canicule (température extérieure supérieure à 30°). Mais l'avantage de l'absence d'inertie est que l'on peut rafraîchir les maisons plus rapidement à la tombée de la nuit.

Les surchauffes constatées ne sont pas dues au chauffage solaire : la différence de température entre les chambres situées au sud et celle située au nord est inférieure à 1°.

Les températures atteintes dans les composants capteurs sont inférieures aux limites imposées par la bonne tenue des matériaux, ce qui permet d'espérer une durabilité satisfaisante (les matériaux en polycarbonate sont garantis 10 ans).

Les résultats prédictifs obtenus par simulation ont donc été confirmés par les mesures.

Résultats d'automne

Nous avons étudié en détail la période du 24 octobre au 3 novembre 1992. Il s'agit de 4 jours nuageux, suivis par 4 jours ensoleillés et un jour maussade. Cette période est donc assez représentative de toutes les situations possibles en mi-saison. Les températures extérieures se situaient entre 5° (minimum de nuit) et 12° (maximum de jour) en début de période pour descendre entre -2° et +3° le dernier jour.

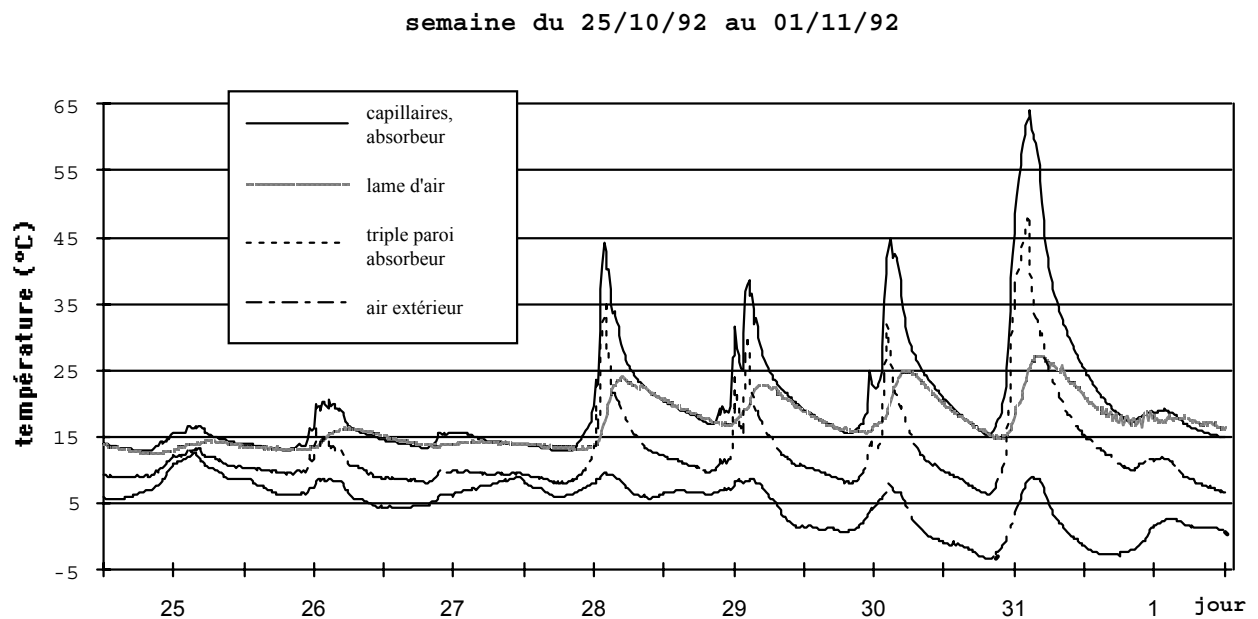
Par beau temps, les systèmes actifs constituent un vrai système de chauffage, la température peut monter dans les capteurs jusqu'à 45°, et jusqu'à 55° avec l'isolation transparente. Ils ne fonctionnent pas par mauvais temps, leur température ne dépassant pas 25° (elle baisse à 5° la nuit, il y a même gelé la dernière nuit).

La température intérieure des maisons oscille entre 15° et 25°, en fonction de l'ensoleillement et du chauffage, dont la régulation est choisie par l'occupant.

La chaleur solaire est moins "palpable" dans les systèmes passifs, car les murs stockent les gains du jour sur la nuit. Il n'y a donc pas un débit important d'air chaud, comme dans les maisons précédentes. Mais les murs restent à une température douce le jour et la nuit. On fait donc également une économie de chauffage, car les pertes de chaleur sont réduites.

La température peut atteindre 45° au niveau de l'absorbeur, et même 65° avec l'isolation transparente (schéma 11). Cette chaleur est stockée dans les briques des murs, ce qui fait que la température côté intérieur reste douce, elle oscille entre 15° et 25°. Lorsque cette température est supérieure à celle du logement, une circulation d'air s'établit (à condition que les grilles d'aération soient ouvertes).

Schéma 11: température dans les murs solaires



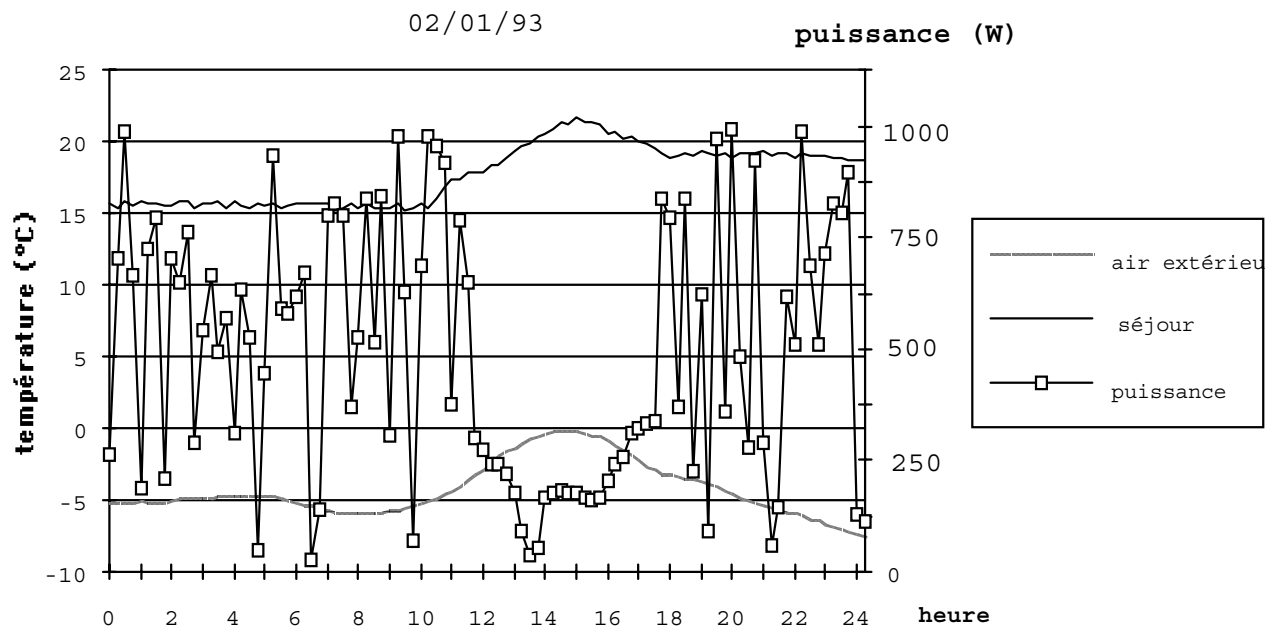
Résultats sur la période la plus froide

Nous avons analysé la semaine du 31 décembre au 7 janvier, lors de laquelle la température est descendue jusqu'à -12°C. Les quatre premières journées sont belles, les deux suivantes variables et les deux dernières très nuageuses mais plus chaudes (entre 5° et 7°C).

Les quatre premiers jours, la température dans les capteurs est montée jusqu'à 30-35°C, jusqu'à 25° le cinquième jour, 20° le sixième et elle est restée à 10°C durant les deux journées nuageuses. La température dans les maisons a varié en fonction de la régulation choisie par les occupants.

Pendant les belles journées, le ventilateur a fonctionné entre 12 heures et 18 heures. Durant cette période, la consommation de chauffage a été fortement réduite, environ divisée par 3 (cf schéma 12). Pendant les journées nuageuses, le ventilateur ne fonctionne pas car la température du capteur est trop basse.

Schéma 12: réduction de la puissance de chauffage lors du captage



En ce qui concerne les systèmes passifs, la température entre le mur de briques et le composant transparent (au niveau de la surface peinte en noir) monte jusqu'à 55°C avec la structure capillaire, jusqu'à 40°C avec la plaque alvéolaire.

Les mesures se poursuivent, un bilan définitif et une comparaison avec les simulations seront effectués ensuite. Afin d'assurer une bonne communication entre les différents partenaires de ce projet (Centres de recherche, Maître d'Ouvrage, Architecte, Entreprises, Industriels, Collectivités locales et ADEME), le public et, bien sûr, les locataires, une lettre d'information a été éditée. D'autre part, des modes d'emploi très simples ont été distribués aux locataires.

Conclusions

Le secteur du bâtiment est propice aux applications des ENR : techniquement, il offre des surfaces de captage solaire importantes; économiquement, les surcoûts peuvent être réduits (voir nuls) grâce à une intégration architecturale appropriée; socialement, la valorisation d'une énergie gratuite permet de réduire les charges de chauffage. Enfin, les réalisations sont visibles auprès d'un public large, ce qui renforce l'impact d'opérations de démonstration visant à faire connaître des pratiques de conception ou des technologies nouvelles.

L'enjeu est important, les secteurs résidentiels et tertiaires représentant plus de 40% de l'ensemble de la consommation française d'énergie. Les gains solaires dans les bâtiments représentent 15 MTep selon une étude de la CEE (in systèmes solaires n° 69) et 3,6 MTep selon l'Observatoire de

l'Energie. La réalité se situe sans doute entre ces deux valeurs, une telle évaluation n'est pas simple. La même étude CEE évalue d'autre part à 6 MTep les gains solaires supplémentaires valorisables dans le bâtiment. Le "solaire architectural" n'est donc pas à négliger dans les bilans.

D'après les atlas, le rayonnement solaire qui tombe sur une maison, sur la saison de chauffe (sans compter l'été), est égal à huit fois les besoins de chauffage. Le rendement de captage pour une maison typique actuelle est de 4%. Nous avons donc cherché à améliorer cette contribution solaire en utilisant des technologies nouvelles, tout en limitant les coûts de construction aux prix plafonds HLM. Les premiers calculs par simulation montrent que, même dans le climat difficile des Ardennes, l'isolation transparente permet de réduire de 20% les besoins de chauffage par rapport à une isolation opaque de référence (10 cm de laine de verre). On éviterait ainsi de rejeter 2,75 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère par an et par maison: l'effet de serre à l'échelle de la maison permet de réduire l'effet de serre à l'échelle planétaire.

Le premier choc pétrolier a suscité l'émergence de l'isolation thermique. En passant de l'isolation par l'intérieur à l'isolation par l'extérieur, les gains solaires sont mieux valorisés avec un meilleur confort thermique. L'isolation transparente peut constituer une prochaine étape dans cette démarche, pour progresser vers des bâtiments de plus en plus respectueux de l'environnement.

Bibliographie

- [1] A. Goetzberger, J. Schmid et V. Wittwer, Transparent insulation system for passive solar utilization in buildings, 1st E.C. Conference on solar heating, Amsterdam, 1984
- [2] L. Jesh, ateliers TI1... TI5 "Transparent Insulation Workshop", 1986...1992, Birmingham et Freiburg
- [3] R.E. Collins, A.C. Fischer-Cripps et J.Z. Tang, Transparent evacuated insulation, Solar Energy vol 49 n°5, nov. 1992
- [4] P. Achard, Aérogels de silice, Journées isolation 88, séminaire AFME, Sophia Antipolis, nov.-déc. 88
- [5] K.G.T. Hollands, An approximate equation for predicting the solar transmittance of transparent honeycombs, Solar Energy vol 21 pp 231-236, 1978
- [6] E. Bollin, Monitoring and evaluation of a residential house with transparent insulation, Atelier TI 5, Freiburg, mai 1992
- [7] A. Goetzberger, J. Dengler, M. Rommel, J. Götsche, et V. Wittver, A new transparently insulated bifacially irradiated flat-plate collector, Solar Energy vol 49 n°5, nov. 1992
- [8] Brevet ANVAR Trombe-Michel BF 7123778 (France: 29/06/1971) et additif
- [9] I. Blanc Sommereux et B. Peuportier, A Bioclimatic design aid based upon multizone simulation, ISES 1991 solar world congress, Denver
- [10] J. Michel, Application du principe de l'isolation transparente, maisons solaires dans les Ardennes, Séminaire ADEME sur l'architecture bioclimatique, juillet 1991, Sophia Antipolis