

Programme
Stockage de chaleur

Etude d'une maison solaire active avec stockage en dalles au Tessin

rédigé par
Dr. D. Pahud
SUPSI – DCT
LEEE
CH - 6952 Canobbio

par ordre de
Office fédéral de l'énergie

Short Abstract

A single family house is planned in Tenero, Ticino, with the objective of integrating renewable energies in the heating design. The thermal needs of the house are reduced to the Minergie standard, so that the house can be heated by its “activated” concrete plates. An “active plate” is a concrete plate in which pipes have been fixed for the circulation of a heat carrier fluid. It is a heat emitter with a very large heat capacity, which is used as heat storage for a solar heating system.

Such a solution is studied using numerical solutions. The dynamic TRNSYS simulation programme is used to build up a thermal calculation tool. It simulates the house, the concrete active plates and the solar heating system together. The dynamic simulations are used to confirm the technical feasibility of the studied concept, to establish the thermal performances of the solar heating system and the house, and to compare various variants involving an unglazed solar absorber, a larger active concrete plate area and the influence of passive solar gains on the solar heating system.

Three variants are studied to reduce the energy index of the house. The additional costs associated with each measure (improved house envelope, heat recovery with controlled ventilation, solar hot water, solar heating and increased window area) are estimated. The energy cost associated with each measure is assessed, as well as the effective annual additional cost, which also takes into account the increase in price of the auxiliary heat.

Résumé

Une maison individuelle est projetée à Tenero au Tessin, avec pour objectif l'intégration des énergies renouvelables dans le concept énergétique. La stratégie suivie est une diminution des besoins thermiques de la maison de manière à pouvoir la chauffer avec des dalles actives. Une dalle active est une dalle en béton dans laquelle des serpentins ont été placés pour faire circuler un fluide caloporteur. Elle est donc un émetteur de chaleur dont la capacité thermique est importante. Dès lors un système solaire actif peut être envisagé en couplant les capteurs solaires directement aux dalles actives (via un échangeur de chaleur), sans avoir besoin de recourir à un stockage d'eau pour le chauffage ou d'augmenter la taille du stockage de l'eau chaude sanitaire.

Une telle solution est étudiée par simulations numériques. Le programme de simulation dynamique TRNSYS est utilisé pour construire un modèle de calcul thermique incluant la maison, les dalles actives et le système solaire actif. Les simulations dynamiques sont utilisées pour confirmer la faisabilité technique du concept étudié, pour établir les performances thermiques du système solaire actif et de la maison, et pour vérifier que le confort thermique soit acceptable. En outre, elles permettent d'établir un concept de régulation et de montrer que les apports d'énergie solaire active et les apports d'énergie auxiliaire doivent être contrôlés de façon distincte. D'autre part les simulations permettent de comparer diverses variantes, comme l'usage d'absorbeurs solaires sans vitrage plutôt que de capteurs vitrés, d'évaluer l'effet d'une surface des dalles actives plus grande, ou encore d'estimer un rapport d'équivalence entre la surface des fenêtres et la surface des capteurs solaires.

Pour envisager un chauffage avec dalles actives, une maison individuelle doit pouvoir être chauffée avec une faible puissance de chauffage. Avec la maison étudiée, la surface des dalles actives ($SDA = 160 \text{ m}^2$) se monte aux $2/3$ de la surface de référence énergétique ($SRE = 240 \text{ m}^2$). La puissance de chauffage de la maison est réduite à 20 W/m^2 de SRE, ce qui correspond à 30 W/m^2 de SDA. Cette faible puissance de chauffage est obtenue en construisant la maison selon les exigences du standard Minergie (ponts thermiques réduits au maximum, murs avec 15 cm d'isolation, fenêtres double vitrage sélectifs, maison étanche et ventilation contrôlée avec récupération de chaleur). Les performances du système solaire actif sont évaluées en considérant la réduction de l'énergie auxiliaire relativement à la situation sans système solaire actif. Avec des capteurs vitrés, une surface de 15 m^2 permet de réduire l'énergie auxiliaire d'environ 60% pour l'eau chaude et de 40% pour le chauffage. La réduction globale est près de la moitié, relativement à une demande d'énergie de chauffage annuelle déjà réduite par les autres mesures. L'indice énergétique est d'environ $20 \text{ kWh/m}^2\text{an}$ ($70 \text{ MJ/m}^2\text{an}$) pour le chauffage et inférieur à $10 \text{ kWh/m}^2\text{an}$ (environ $25 \text{ MJ/m}^2\text{an}$) pour l'eau chaude.

Des comparaisons sont établies par la simulation des diverses variantes. Un mètre carré de capteur vitré est équivalent à environ 2 m^2 d'absorbeur sans vitrage, lorsque la surface des capteurs vitrés est comprise entre 10 et 20 m^2 . Pour la maison étudiée, augmenter la surface des capteurs de 5 à 10 m^2 est équivalent à faire passer la surface des fenêtres de la façade sud de 20 à 45 – 50 m^2 . Le potentiel de réduction de l'énergie auxiliaire de chauffage est plus grand avec des gains solaires actifs qu'avec des gains solaires passifs. La réduction d'énergie auxiliaire, suite à l'amélioration de l'efficacité annuelle des capteurs solaires induite par une surface des dalles actives plus grande, est marginale. La surface des dalles actives n'est donc pas conditionnée par l'utilisation ou non de capteurs solaires, mais bien par les besoins de chauffage de la maison.

Trois variantes sont proposées pour réduire l'indice d'énergie de la maison. Elles permettent d'atteindre le niveau requis par le standard Minergie si les interventions sont effectuées jusqu'à la dernière envisagée (système solaire actif pour le chauffage ou augmentation de la surface des fenêtres). Une alternative à la dernière intervention est de remplacer le chauffage au mazout par du chauffage au bois. Les surcoûts liés à chaque intervention (enveloppe du bâtiment améliorée, récupération de chaleur sur la ventilation contrôlée, eau chaude solaire, chauffage solaire et surface des fenêtres plus grande) sont estimés de manière approximative. Le surinvestissement total, lorsque toutes les interventions sont réalisées, reste inférieur à 200 CHF/m² (rapporté à la SRE). Le coût de l'énergie associé à chaque intervention est évalué, de même que le surcoût effectif annuel, qui prend également en compte le renchérissement de l'énergie auxiliaire. Comme attendu, chaque intervention supplémentaire devient plus coûteuse, si seul le facteur énergétique est pris en compte. Du point de vue purement économique, une intervention du type « solaire actif » est équivalente à une intervention du type « solaire passif ». Le « solaire actif » donne plus de flexibilité à l'architecture dans la mesure où la contrainte sur la surface des fenêtres à insérer dans la façade sud est levée.

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. L'auteur est seul responsable du contenu et des conclusions.

Abstract

A single family house is planned in Tenero, Ticino, with the objective of integrating renewable energies into the heating design. The strategy is to decrease the thermal needs of the house, so that its concrete plates can be “activated” for the heating. An “active plate” is a concrete plate in which pipes have been fixed for the circulation of a heat carrier fluid. It is a heat emitter with a very large heat capacity. Active concrete plates can serve as heat storage for a solar heating system. They are connected directly to the solar collectors (via a heat exchanger). The water tank storage used for the hot water does not need to be enlarged, as the heating solar gains do not transit through it.

Such a solution is studied using numerical solutions. The dynamic TRNSYS simulation programme is used to build up a thermal calculation tool. It simulates the house, the concrete active plates and the solar heating system together. The dynamic simulations are used to confirm the technical feasibility of the studied concept, to establish the thermal performances of the solar heating system and the house, and to check that the thermal comfort is satisfactory. They also help to establish a system control concept. They show that the solar heating gains and the auxiliary energy have to be controlled separately. Furthermore, the simulations allow us to compare various variants such as: the use of a solar absorber without glazing instead of a glazed solar collector; the influence of a larger area of active concrete plates on the thermal performances and an estimation of an equivalence ratio between the window area and the solar collector area.

In order enable heating by active concrete plates, it is necessary that the peak heating power of the house is low. For the studied house, the active concrete plate area ($ACPA = 160 \text{ m}^2$) is two thirds of the heating reference area ($HRA = 240 \text{ m}^2$). The heating peak power is reduced to 20 W/m^2 of HRA, which corresponds to 30 W/m^2 of ACPA. This low heating power is obtained if the house is constructed according to the requirements of the Minergie standard (thermal bridges reduced to a minimum, walls with 15 cm of insulation, selective double glazed windows, air tight house and controlled ventilation with heat recovery). The thermal performances of the house are assessed in considering the reduction of the auxiliary heat in relation to the situation without a solar heating system. With glazed solar collectors, an area of 15 m^2 reduces the auxiliary heat by about 60% for the hot water and 40% for the heating. The global reduction is nearly half of an annual energy demand which is already greatly decreased by the other measures. The energy index is about $20 \text{ kWh/m}^2\text{year}$ ($70 \text{ MJ/m}^2\text{an}$) for the heating and less than $10 \text{ kWh/m}^2\text{year}$ (about $25 \text{ MJ/m}^2\text{an}$) for the hot water.

Comparisons are established with the help of the simulations of the various variants. One square meter of glazed collector is equivalent to about 2 m^2 of unglazed absorber, when the glazed collector area is between 10 and 29 m^2 . For the house studied, an increase of the collector area from 5 to 10 m^2 is equivalent to increase the south window area from 20 to 45 – 50 m^2 . The reduction potential of the auxiliary heating energy is greater with solar collectors than with solar passive measures. A greater active concrete plate area improves the annual efficiency of the solar heating system. However the effect is small and the resulting reduction of auxiliary heat marginal. The active concrete plate area is not conditioned by the use of solar collectors, but by the heating requirement of the house.

Three variants are studied to reduce the energy index of the house. They fulfil the low energy level required by the Minergie standard if all the measures are completed (solar heating

system or greater window area in the south façade). An alternative to the last measure is to replace oil heating with wood heating. The additional costs associated with each measure (improved house envelop, heat recovery with controlled ventilation, solar hot water, solar heating and increased window area) are estimated roughly. The total additional investment, when all the measures are realised, remains below 200 CHF/m² (relative to the HRA). The energy cost associated with each measure is assessed, as well as the effective annual additional cost, which also takes into account the increase in price of the auxiliary heat. As expected, each supplementary measure becomes more expensive, if only the energy aspect is considered. From the economic point of view, a “solar heating system” measure is equivalent to a “solar passive” measure. The “solar heating system” measure gives greater flexibility to the architecture in the sense that the constraint on the window area to be inserted in the south façade is removed.

Remerciements

L’auteur remercie l’Office Fédéral de l’Energie pour son support financier. Il remercie M. Charly Cornu pour les discussions fructueuses relatives aux dalles actives, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué au projet.

Table des matières:

1. Introduction, objectifs.....	p. 1
2. Caractéristiques géométriques de la maison.....	p. 2
3. Les dalles actives.....	p. 3
4. Le système solaire actif.....	p. 5
5. Outils et modèles de simulation thermique.....	p. 6
5.1 Modèle thermique de la maison.....	p. 6
5.2 Simulation des dalles actives.....	p. 6
5.3 Ombrages fixes de la façade sud.....	p. 10
5.4 Température du terrain.....	p. 11
5.5 Système solaire actif.....	p. 12
5.6 Régulation du système et de la maison.....	p. 12
6. Quel niveau d'isolation choisir ?.....	p. 17
7. Performances thermiques de la maison avec la variante dalles actives.....	p. 18
7.1 Températures intérieures simulées et confort thermique.....	p. 19
7.2 Bilan thermique de la maison.....	p. 22
7.3 Capteurs solaires vitrés versus absorbeurs solaires.....	p. 24
7.4 Gains solaires actifs versus gains solaires passifs.....	p. 26
7.5 Surface des dalles actives plus grande.....	p. 28
7.6 Température de la maison sans chauffage auxiliaire dans les dalles.....	p. 29
8. Estimation des coûts de quelques variantes.....	p. 30
8.1 Maison de référence pour l'évaluation des variantes.....	p. 30
8.2 Estimation des surcoûts et durée de vie.....	p. 31
8.3 Indice énergétique et coût de l'énergie associé à chaque intervention.....	p. 33
8.4 Surcoût effectif des interventions.....	p. 35
Conclusion.....	p. 37
Références.....	p. 39

1. Introduction, objectifs

Le LEEE a été contacté par une personne privée qui désire construire une maison individuelle à Osogna (TI), dans le but d'intégrer des énergies renouvelables dans le concept énergétique de sa maison. Comme les plans de la maison étaient déjà établis, l'aspect solaire passif de la maison ne pouvait pas être modifié. Le choix s'est porté sur l'option « solaire actif », qui a l'avantage de ne pas imposer des contraintes architecturales importantes. En conséquence, cette option peut s'appliquer à une catégorie de bâtiment beaucoup plus large, ce qui rend le projet d'autant plus intéressant que le potentiel d'application est grand.

Nous avons proposé au propriétaire de réaliser un projet pilote avec un système qui utilise des produits éprouvés et disponibles sur le marché tout en étant innovateurs. Il s'agissait d'utiliser un système solaire actif pour le préchauffage de l'eau chaude, de sur-dimensionner la surface des capteurs solaires et d'injecter une partie des gains solaires directement dans les dalles actives de la maison, sans transiter par le stockage de l'eau chaude. Le côté innovateur du système réside dans le couplage des capteurs solaires au chauffage par dalles actives, qui offrent une capacité de stockage supérieure au chauffage par le sol. Ce projet implique également une isolation de l'enveloppe du bâtiment qui soit supérieure au niveau requis pour satisfaire à la recommandation 380/1, de manière à rendre le chauffage par dalles actives possible.

La réalisation de ce projet demande avant tout de pouvoir évaluer la faisabilité technique du concept proposé, de simuler et d'optimiser le fonctionnement des différents composants, d'établir les performances thermiques du système et d'évaluer le surcoût engendré par la mise en œuvre de ce concept énergétique. Le coût d'une telle installation est la première question posée par le propriétaire, et la plus décisive quant à la réalisation du projet. Dans notre cas, une estimation rapide et grossière a conduit au renoncement du projet pilote. L'estimation du surcoût de l'installation, malgré le soutien de la confédération, était trop important pour être supporté par le propriétaire. C'est la raison principale pour laquelle nous avons entrepris cette étude, afin de pouvoir quantifier au mieux l'influence de diverses mesures sur les performances thermiques de la maison et les coûts engendrés. En outre, le potentiel offert par de tels systèmes dans le canton du Tessin serait mieux connu, de même que des règles simples pour pré-dimensionner les principaux composants lors de l'avant-projet.

Une autre maison individuelle est projetée dans la commune de Tenero au Tessin. Elle est choisie pour évaluer le concept pilote décrit dans la section précédente. La demande de chaleur de la maison utilisée comme référence dans les calculs satisfait à la valeur cible de la recommandation SIA 380/1. Les objectifs de l'étude devraient permettre de répondre aux questions suivantes :

- relativement à la surface des dalles actives disponible, faut-il d'avantage isoler l'enveloppe ?
- quel est le potentiel offert par du chauffage solaire actif couplé à des dalles actives ?
- quelle est la réduction d'énergie auxiliaire et quelle fraction solaire peut-on obtenir ?
- quels sont les mesures les plus avantageuses pour abaisser l'énergie auxiliaire ?
- quelle est l'influence des gains solaires passifs sur les gains solaires actifs ?

2. Caractéristiques géométriques de la maison

La maison individuelle est définie conformément aux premières esquisses du propriétaire. La surface habitable de la maison n'est pas encore définie de manière précise (200 – 300 m² avec ou non un studio). Elle sera construite dans un terrain en pente (25° ou environ 50%), sur 2 ou 3 niveaux et sera de section rectangulaire. La façade principale sera favorablement orientée vers le sud-sud-est, en raison de la pente du terrain. La situation est dégagée du point de vue de l'ensoleillement.

La maison simulée dans cette étude est sur 2 niveaux et ses dimensions sont fixées et données dans le tableau 2.1. Par commodité, les 4 façades du bâtiment sont dénommées façade sud, est, nord et ouest, bien que les orientations soient un peu différentes. Le sol du rez-de-chaussée est directement en contact avec le terrain, de même que les façades est, nord et ouest. La cave (non chauffée) et le studio sont inclus dans le rez-de-chaussée.

Taille maison	Dimensions extérieures	
Largeur	6.7 m	
Longueur	19.7 m	
Hauteur sous toit	5.5 m	
Surface de référence énergétique et volume intérieur		
Rez-de-chaussée	112 m ²	235 m ³
1 ^{er} étage	132 m ²	279 m ³
Total	244 m²	514 m³

Table 2.1 Caractéristiques géométriques de la maison.

Le croquis de la figure 2.1, réalisé par le propriétaire, permet de visualiser la façade sud de la maison. La maison au second plan est déjà existante et n'est que marginalement occultée.

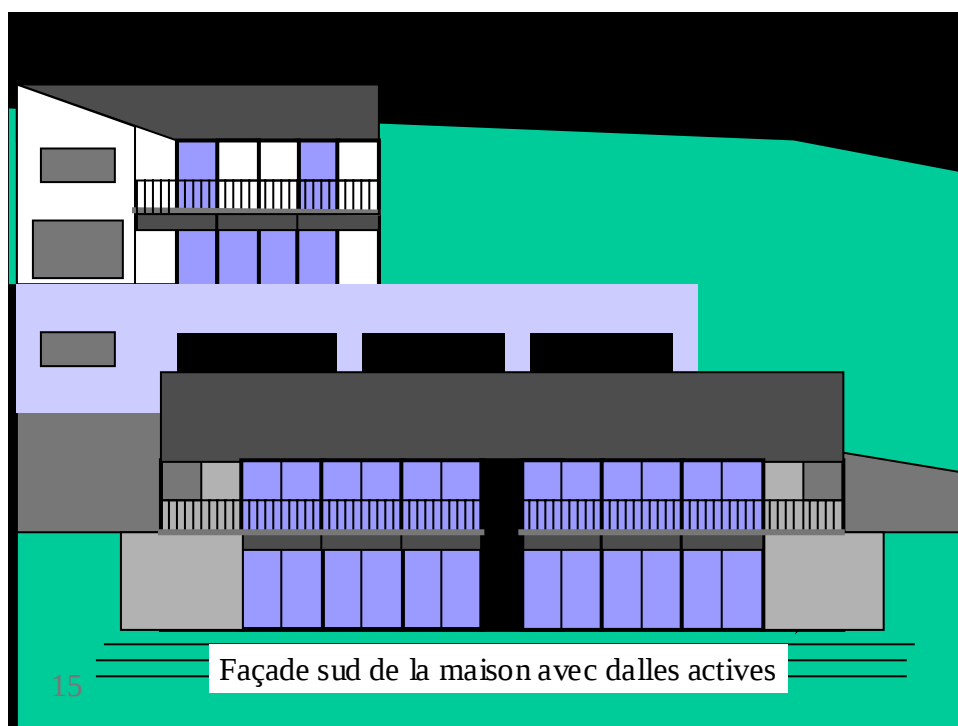


Figure 2.1 Vue de la façade sud de la maison.

La surfaces des fenêtres est exagérément grande sur le croquis de la figure 2.1. Elle devra se situer entre 14% (pas moins pour des raison de luminosité) et 40% de la surface de la façade, fixée à 100 m² (Langer, 1999). (Selon Langer, des simulations ont montré que pour une maison passive, 40% représente un optimum.) La maison de référence est définie avec 20 m² de fenêtre au sud. Le tableau 2.2 donne les surfaces des fenêtres façade par façade.

	Surface des fenêtres	Fraction de cadre (portes incluses)
Façade sud	20 m ²	0.15
Façade est	1.5 m ²	0.20
Façade nord	11 m ²	0.39
Façade ouest	1.2 m ²	0.22

Table 2.2 Surface des fenêtres façade par façade.

Des ombrages fixes sont créés sur les fenêtres de la façade sud par l'avant-toit et le balcon, qui s'étendent sur toute la longueur de la maison avec une largeur de 1 m.

3. Les dalles actives

Le chauffage par dalles actives se différencie du chauffage par le sol par le fait que les tubes qui transportent le fluide caloporteur sont directement placés dans les dalles en béton et non dans les chapes qui les recouvrent. L'émission de chaleur se fait par le plafond plutôt que par le sol. Le coefficient de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et la zone chauffée est dans la pratique de l'ordre de 4 W/m²K (l'espacement des tubes est de 20 cm). L'isolation du bâtiment et la surface des dalles actives doivent être conçus pour que le chauffage puisse être assuré avec une émission de chaleur de 20 – 30 W par mètre carré de dalle active. Dans ces conditions la température de départ du fluide caloporteur n'a pas besoin d'excéder 25 – 27 °C par grand froid. Avec des températures de fluide aussi basses, les dalles actives remplissent également un rôle d'autorégulation : dans les pièces qui reçoivent par exemple des gains solaires, l'émission de chaleur est rapidement interrompue par une légère élévation de la température ambiante. Il faut cependant veiller à ce que la surface des dalles actives dans chaque pièce soit correctement dimensionnée pour que la demande de chauffage puisse être satisfaite avec la même température de départ du fluide caloporteur.

Une étude précédente (Fromentin et Sujevs, 1996) a montré que pour le stockage de l'énergie solaire collectée par des capteurs thermiques, il est préférable de placer les tubes au milieu de la couche de béton. D'autre part la capacité thermique du béton est exploitée de façon optimale si l'épaisseur de la couche est de l'ordre de 20 cm. La maison simulée dans cette étude a deux dalles en béton de 20 cm d'épaisseur (dalle du rez-de-chaussée et dalle du premier). Les murs extérieurs contiennent également une couche de béton de 15 cm d'épaisseur.

En ce qui concerne la surface des dalles actives, si un bâtiment de 2 étages doit en être équipé, on tâche d'activer 3 niveaux de dalles, de sorte que les étages soient pris en sandwich entre les dalles activées. Dans la situation de la maison, cette condition ne peut pas être

remplie pour le 1^{er} étage, car il n'est pas prévu de faire une dalle sous le toit. Une possibilité est d'activer les murs est, nord, ouest, et même sud si la surface de fenêtre le permet. Les surfaces de dalles et de murs pouvant être activées (les fenêtres, les portes et le trou pour l'escalier ne sont pas comptés) sont données dans la table 3.1. La façade sud n'est pas prise en compte dans cet inventaire.

	Surface des dalles	Surface des murs	Total
Rez-de chaussée	166 m ²	42 m ²	208 m ²
1 ^{er} étage	14 m ²	46 m ²	60 m ²
Total	180 m ²	88 m ²	268 m ²

Table 3.1 Surface des dalles et des murs pouvant être utilisés comme « dalles actives ». La façade sud n'est pas prise en compte.

Il apparaît clairement un déséquilibre de surface disponible entre le 1^{er} étage et le rez-de-chaussée. Toutes les dalles du rez-de-chaussée n'auront pas besoin d'être activée, tandis qu'au 1^{er} étage, des murs internes le devront (ce qui implique de les faire en béton ; ils peuvent aussi avoir la fonction de murs porteurs).

Deux variantes sont simulées, la première avec environ 160 m² de dalles actives, et la deuxième avec 220 m². Le modèle thermique de la maison permet de simuler le rez-de-chaussée et le 1^{er} étage comme deux zones distinctes (cf. partie 5), ce qui permet de déterminer par des simulations numériques la répartition des dalles/murs actifs entre les deux zones, de manière à ce que leur températures en période de chauffage soit à peu près les mêmes. Les surfaces de dalles actives sont énumérées dans la table 3.2 pour les deux variantes.

Dalles actives	Surface dalles/murs	Emplacement mur/dalle
Variante 160 m²		
Rez-de-chaussée	83 m ²	dalle rez-1 ^{er} étage (plafond rez-de-chaussée)
	10 m ²	murs est et nord en contact avec le terrain
Total rez-de-chaussée	93 m²	
1 ^{er} étage	14 m ²	dalle cave-1 ^{er} étage (plancher 1 ^{er} étage)
	46 m ²	murs ouest, nord et est
	10 m ²	Mur interne supplémentaire
Total 1^{er} étage	70 m²	
Variante 220 m²		
Rez-de-chaussée	83 m ²	dalle rez-1 ^{er} étage (plafond rez-de-chaussée)
	37 m ²	murs est et nord en contact avec le terrain
Total rez-de-chaussée	120 m²	
1 ^{er} étage	14 m ²	dalle cave-1 ^{er} étage (plancher 1 ^{er} étage)
	46 m ²	murs ouest, nord et est
	40 m ²	Murs internes supplémentaires
Total 1^{er} étage	100 m²	

Table 4.1 Répartition des dalles/murs actifs entre le rez-de-chaussée et le 1^{er} étage pour les variantes avec 160 et 220 m² de surface totale.

Il est à noter que la dalle active du rez-de-chaussée (plafond), contribue également au chauffage du 1^{er} étage, même si, dans les simulations, la dalle est recouverte par 4 cm de béton léger (résistance thermique de $0.03 \text{ Km}^2/\text{W}$) et d'un parquet en bois ($0.10 \text{ Km}^2/\text{W}$).

4. Le système solaire actif

Le système solaire actif est composé de capteurs solaires thermiques plans, d'une cuve à eau pour l'eau chaude et de deux échangeurs de chaleur pour séparer le circuit de la boucle solaire de celui de l'eau chaude et des dalles actives.

Les gains solaires utilisés pour le chauffage sont directement injectés dans les dalles actives par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, sans transiter par la cuve de l'eau chaude sanitaire. Le couplage des capteurs solaires aux dalles actives permet d'utiliser la structure lourde du bâtiment comme un stockage de chaleur, ce qui permet d'obtenir une fraction solaire significative sans les coûts d'un stockage de chaleur conventionnel. Un schéma de principe simplifié de l'installation est montré dans la figure 4.1.

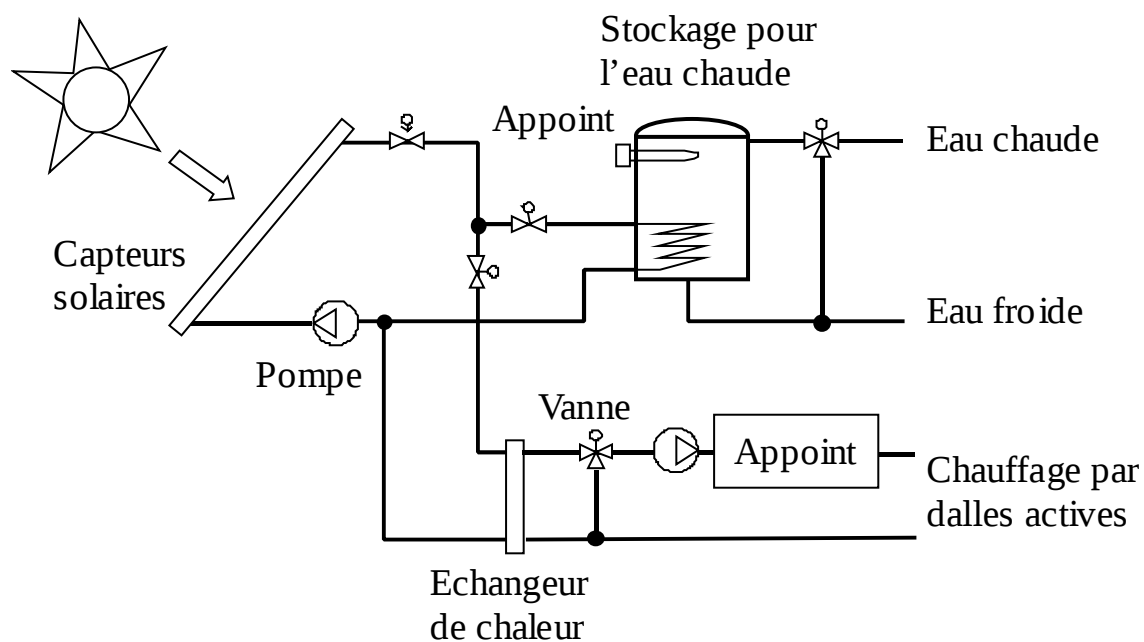


Figure 4.1 Schéma de principe simplifié de l'installation solaire active couplée aux dalles actives.

5. Outils et modèles de simulation thermique

Le programme de simulation dynamique TRNSYS (Klein et al., 2000) est utilisé pour construire un modèle de la maison et du système solaire actif.

5.1 *Modèle thermique de la maison*

La maison est définie de manière à pouvoir être simulée avec le modèle multi-zones Type56 de TRNSYS. Deux zones chauffées sont définies :

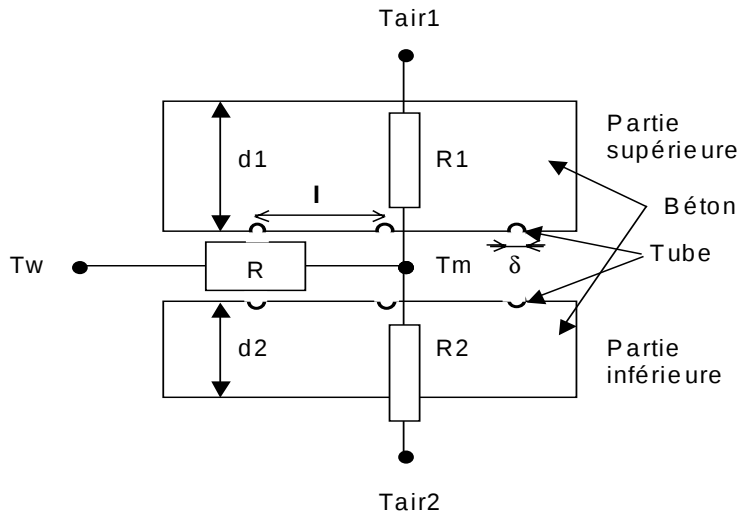
- zone rez-de-chaussée ;
- zone 1^{er} étage ;

Pas de couplage thermique par ventilation n'est simulé entre les deux zones. Ceci demande une répartition plus précise des dalles et des murs actifs entre les deux zones pour obtenir une température uniforme dans la maison en période de chauffage. Toutefois, des échanges de chaleur entre les deux zones ont lieu par transmission avec les surfaces en commun et par le fluide caloporteur qui circule dans les dalles des deux zones. La cave est prise en compte avec une zone non chauffée. Elle se trouve dans la partie ouest du rez-de-chaussée. Elle est en contact avec la zone « 1^{er} étage » par son plafond et la zone « rez-de-chaussée » par son mur est, qui a une porte pour l'accès depuis la maison.

Chaque zone est soumise à des pertes de chaleur par transmission et ventilation vers l'extérieur, des pertes par transmission vers le terrain et des pertes/gains avec les zones adjacentes. Les zones chauffées ont des gains de chaleur convectifs (les gains sont injectés dans l'air de la zone) et radiatifs (les gains sont injectés sur les surfaces intérieures de la zone), sous forme de gains solaires à travers les fenêtres, de gains internes par les occupants et par les appareils électriques, et des apports de chaleur des dalles et des murs actifs. La température de l'air dans les zones est flottante. Elle est influencée en hiver par la régulation du chauffage, qui veillera à la maintenir à sa température de consigne. En été, elle peut être réduite par la baisse de protections solaires extérieures et par l'ouverture des fenêtres qui a pour conséquence une réduction des gains solaires passifs et une augmentation du taux de renouvellement d'air. Les procédures de calcul sont décrites dans le manuel de TRNSYS (Klein et al., 2000).

5.2 *Simulation des dalles actives*

Avec la version de TRNSYS 15, il est possible de simuler une dalle active avec le modèle de bâtiment Type56. Toutefois l'implémentation manque encore de flexibilité. Par exemple il n'est pas possible de simuler un mur interne avec une dalle active. Elles sont donc simulées en utilisant explicitement le formalisme développé par Koschenz et Dorrer (1996). (C'est ce même formalisme qui a été implémenté dans le modèle de bâtiment Type56). Ce formalisme permet de ramener le problème bi-dimensionnel du transfert thermique entre les tubes et le béton à un problème à une dimension. Ainsi, le champ de température dans le plan des tubes est réduit à une température équivalente T_m . Dans la figure 5.1, une dalle en béton d'épaisseur d_1+d_2 est en contact avec de l'air sur ses faces supérieure et inférieure. Le plan dans lequel se trouvent les tubes est à la profondeur d_1 depuis la face supérieure et d_2 depuis la face inférieure. La résistance R permet de relier la température de la paroi externe des tubes T_w à la température équivalente T_m .



$d_1 + d_2$: épaisseur de la dalle en béton [m] ;
 d_1 : profondeur des tubes depuis la face supérieure de la dalle en béton [m] ;
 d_2 : profondeur des tubes depuis la face inférieure de la dalle en béton [m] ;
 l : espacement des tubes [m] ;
 δ : diamètre extérieur des tubes [m] ;
 T_m : température équivalente du béton dans le plan des tubes [°C] ;
 T_w : température de la paroi externe des tubes [°C] ;
 T_{air1} : température de l'air sur la face supérieure de la dalle en béton [°C] ;
 T_{air2} : température de l'air sur la face inférieure de la dalle en béton [°C] ;
 R : résistance thermique entre T_w et T_m [K/(W/m²)] ;
 R_1 : résistance thermique entre T_m et T_{air1} [K/(W/m²)] ;
 R_2 : résistance thermique entre T_m et T_{air2} [K/(W/m²)] ;

Figure 5.1 Coupe transversale d'une dalle active en béton. Le plan des tubes est représenté par la température équivalente T_m . Elle permet de ramener le calcul des transferts de chaleur entre les tubes et le béton à un problème à une dimension.

Koschenz et Dorrer (1996) donnent une expression pour R (cf. relation 5.1), si les conditions (5.2) et (5.3) sont remplies :

$$R = \frac{\ell}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{\ell}{\delta\pi}\right) \quad (5.1)$$

$$\text{si } d_i / \ell > 0.3, \quad i = 1 \text{ et } 2 \quad (5.2)$$

$$\text{si } \delta / \ell < 0.2 \quad (5.3)$$

Avec λ : conductibilité thermique de la dalle [W/mK] ;

Si l'on rajoute à R la résistance convective entre le fluide et la paroi des tubes et la résistance de la paroi, on peut donner une relation entre la température du fluide T_f et la température équivalente du béton T_m (cf. relation 5.4).

$$R' = \ell \left(\frac{1}{\pi \lambda_f \text{Nu}} + \frac{1}{2 \pi \lambda_p} \ln \left(\frac{\delta}{\delta_{pi}} \right) + \frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{\ell}{\delta \pi} \right) \right) \quad (5.4)$$

Avec λ_f : conductibilité thermique du fluide [W/mK] ;
 Nu : nombre de Nusselt, dépend du régime d'écoulement (laminaire, $\text{Nu} = 4.36$) [-];
 λ_p : conductibilité thermique de la paroi du tube [W/mK] ;
 δ_{pi} : diamètre intérieur du tube [m] ;
 T_f : température du fluide dans les tubes [°C] ;
 R' : résistance thermique entre T_f et T_m [K/(W/m²)] ;

La relation (5.4) permet d'avoir une relation entre la température locale du fluide $T_f(x)$ et la température équivalente du béton T_m . En supposant que T_m est constant dans tout le plan des tubes, on peut écrire une relation pour la puissance transférée du fluide au béton (cf. relation 5.5) :

$$q(x) = \frac{1}{R'} (T_f(x) - T_m) \quad (5.5)$$

$q(x)$: puissance thermique transférée du fluide au béton [W/m²] ;

La puissance thermique transférée par les tubes provient de la capacité thermique du fluide. Ceci permet d'écrire une équation différentielle pour la puissance transférée par le fluide en fonction du chemin parcouru (cf. relation 5.6) :

$$q(x) N \ell dx = -m_f A C_f dT_f(x) \quad (5.6)$$

ℓ : espacement des tubes dans la dalle active (rappel) [m] ;
 L : longueur d'un tube dans la dalle active [m] ;
 N : nombre de tubes connectés en parallèle dans la dalle active [-] ;
 A : surface de la dalle active ; $A = N \cdot L \cdot \ell$ [m²] ;
 m_f : débit massique spécifique du fluide caloporteur dans les dalles [kg/sm²] ;
 $m_f = M_f / A$ (M_f : débit massique total dans la dalle [kg/s]) ;
 C_f : chaleur spécifique du fluide caloporteur [J/kgK] ;

En combinant (5.5) dans (5.6) et en intégrant le long du chemin parcouru, de $x=0$ à $x=L$, on obtient une expression pour la température de sortie du fluide T_{fout} (cf. Relation 5.7).

$$T_{fout} = T_m + (T_{fin} - T_m) \exp \left(- \frac{1}{R' m_f C_f} \right) \quad (5.7)$$

$T_{fin} = T_f(x=0)$ température d'entrée du fluide dans la dalle [°C] ;
 $T_{fout} = T_f(x=L)$ température de sortie du fluide de la dalle [°C] ;

La puissance thermique Q échangée par le fluide dans la dalle active est calculée par la relation (5.8).

$$Q = m_f A C_f (T_{fin} - T_{fout}) \quad (5.8)$$

Q : puissance thermique échangée par le fluide circulant dans la dalle active [W] ;

Avec le modèle de bâtiment Type56, on définit une zone supplémentaire pour chaque dalle active simulée. La frontière de la zone est définie par deux murs de même surface, correspondant aux parties supérieure et inférieure de la dalle (cf. figure 5.1). (La capacité thermique de la dalle est donc prise en compte par le modèle du bâtiment). La température de la zone correspond à T_m . Cette température est définie comme variable de sortie du Type56, ce qui permet, avec les relations (5.7) et (5.8), de calculer la puissance thermique transférée par le fluide (le type 294 a été créé pour faire ce calcul). Cette puissance est ensuite retournée comme variable d'entrée au Type56, qui la traite comme des gains convectifs dans la zone concernée. (Un coefficient de transfert convectif arbitrairement grand est défini dans la zone, de sorte que la température de l'air de la zone soit égale à la température de surface des murs). A chaque pas de temps, le programme TRNSYS réitère les calculs jusqu'à ce qu'une solution soit obtenue.

Dans les simulations, le débit spécifique est fixé à 6 litre/hm² (valeur utilisée dans la pratique) et la résistance R' à une valeur relativement pessimiste de 0.075 K/(W/m²). Cela correspond, suivant que l'on considère un coefficient α_i d'échange superficiel de 6 ou de 8 W/m²K, à un coefficient d'échange global entre le fluide et l'air intérieur compris entre 3.5 et 4.1 W/m²K pour les tubes enfoncés à 7 cm dans les murs, ou 3.3 – 3.8 W/m²K pour les tubes enfoncés à 10 cm dans les dalles.

On peut remarquer que la longueur d'un tube L et le nombre de tubes connectés en parallèle N n'interviennent pas dans le calcul des transferts thermiques. (Tout au plus ils influencent la valeur du nombre de Nusselt). Ces paramètres doivent être fixés en fonction des pertes de charges tolérables dans le circuit des dalles actives, de manière à correspondre au point de fonctionnement optimum d'une pompe de circulation.

5.3 Ombrages fixes de la façade sud

Des ombrages fixes sont créés par le balcon et l'avant-toit de la maison de la façade sud (cf. figure 5.2). Les ombrages sont calculés par le modèle « d'overhang and wingwall shading » de TRNSYS, implémentés dans le Type34. (Voir le manuel de TRNSYS pour la méthode de calcul utilisée (Klein et al., 2000)). Dans la table 5.1, les fractions calculées des ensoleillements direct et global tombant sur les fenêtres de la façade sud sont données en valeurs mensuelles.

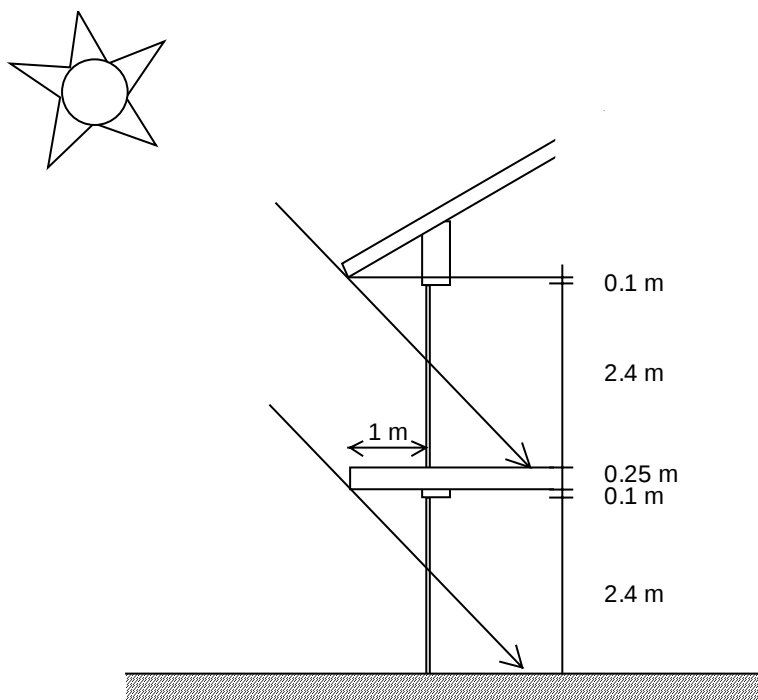


Figure 5.2 Ombrages fixes de la façade sud.

Mois	Ensoleillement global incident kWh/m ²	Fraction restante après ombrage -	Ensoleillement direct incident kWh/m ²	Fraction restante après ombrage -
Janvier	75	0.83	47	0.87
Février	73	0.78	40	0.80
Mars	92	0.73	46	0.68
Avril	75	0.69	26	0.53
Mai	76	0.66	21	0.34
Juin	81	0.61	25	0.21
Juillet	95	0.58	41	0.29
Août	100	0.64	41	0.43
Septembre	95	0.69	48	0.61
Octobre	75	0.77	36	0.78
Novembre	65	0.81	40	0.85
Décembre	60	0.83	36	0.89
Total	961	0.71	447	0.63

Table 5.1 Ensoleillements incidents sur le plan de la façade sud et fraction restante après ombrage fixe.

5.4 Température du terrain

La température du terrain est calculée en se basant sur une variation saisonnière de la température de l'air extérieur. La solution de l'équation de la chaleur pour un milieu semi-infini, de température initiale constante et délimité par un plan horizontal soumis à une variation sinusoïdale de la température est donnée par la relation (5.9) :

$$T(z,t) = T_o + dT_o \cdot \exp\left(-\sqrt{\omega / (2a)} \cdot z\right) \cdot \cos(\omega (t-t_o) - \sqrt{\omega / (2a)} \cdot z) \quad (5.9)$$

$T(z,t)$: température [°C] du milieu à la profondeur z [m] et au temps t [s] ;

T_o : température moyenne annuelle du terrain [°C] ;

dT_o : amplitude annuelle de la variation de température en surface [K] ;

$\omega = 2\pi / T$: pulsation de l'oscillation, déterminée par la période T fixée à 1 année [rad/s] ;

a : diffusivité thermique du milieu ; valeur typique pour le terrain : 10^{-6} [m²/s] ;

t_o : temps pour lequel la température est maximum en surface [s] ;

La température du terrain est influencée par les pertes thermiques de la maison dans le terrain. Il en résultera une température moyenne annuelle du terrain T_o un peu plus élevée que la température moyenne annuelle de l'air extérieur (11.3 °C pour Tenero), et une amplitude de variation dT_o légèrement réduite. La température du terrain est calculée à deux endroits différents, supposés être représentatifs pour les murs et le sol du rez-de-chaussée (cf. figure 5.3). Les paramètres restants sont donnés ci-dessous :

T_o : 13 °C ;

dT_o : 8 K ;

t_o : 201^e jour de l'année ;

z : 2 m pour les murs du rez-de-chaussée ;

z : 3 m pour le sol du rez-de-chaussée ;

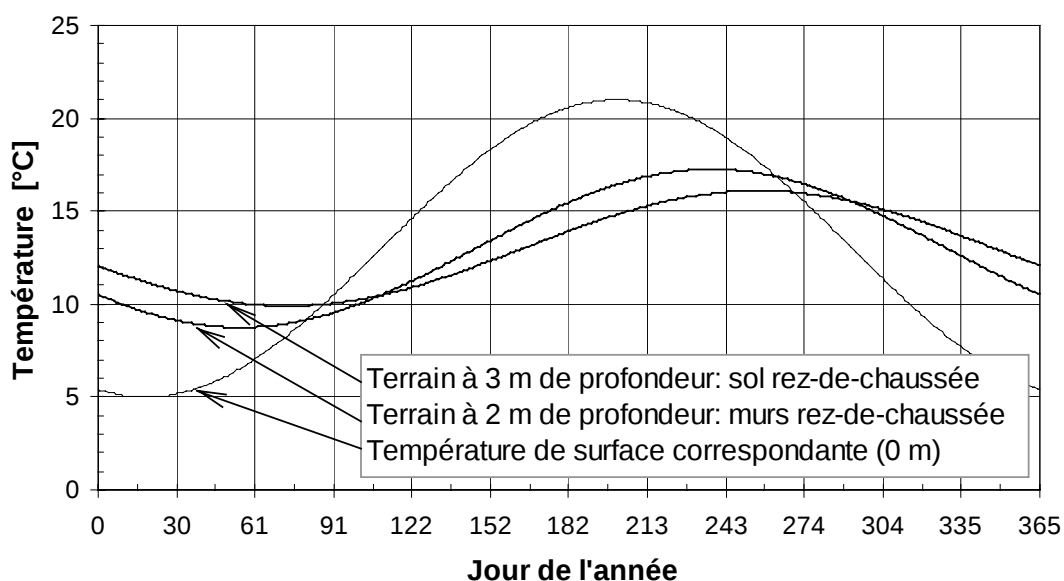


Figure 5.3 Températures du terrain calculées pour les murs et le sol du rez-de-chaussée.

5.5 Système solaire actif

La simulation du système solaire actif est faite avec deux composants non-standard de TRNSYS. Il s'agit de :

- modèle de capteur solaire thermique MFC (Matched Flow Collector), développé par Isaksson (1995) au Royal Institute of Technology de Stockholm, Suède. La raison principale de son utilisation est la possibilité de tenir compte d'un facteur de perte thermique quadratique en température et de la capacité thermique des collecteurs solaires.

- modèle de cuve à eau développé à l'ITW de l'université de Stuttgart en Allemagne (Druck et Pauschinger, 1994). Ce modèle a la possibilité de simuler jusqu'à 5 circuits hydrauliques connectés à la cuve, 3 échangeurs de chaleurs internes et un chauffage auxiliaire.

Les simulations ont été faites pour des capteurs plans vitrés et pour des absorbeurs solaires. Les paramètres thermiques utilisés ont été mesurés à Rapperswil (LTS-Katalog, 1998) et sont donnés dans la table 5.2.

Paramètre	Capteur plans vitré	Absorbeur solaire
Marque	Agema Azur	Energie Solaire SA
Efficacité optique	0.859	0.91
Facteur de pertes thermique (capteur + plomberie)	$4.01 + 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$	$12 + 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$
Dépendance quadratique	$0.0108 \text{ W/m}^2\text{K}^2$	-
Capacité thermique* (capteur + plomberie)	$10 + 9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$	$10 + 9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$
Débit	40 litre/m ² h	40 litre/m ² h
Facteur d'IAM bo	0.17	0.075

* la capacité thermique est légèrement inférieure avec des absorbeurs solaires. Toutefois la différence n'est pas prise en compte car elle ne dépasse pas 10% de la capacité totale.

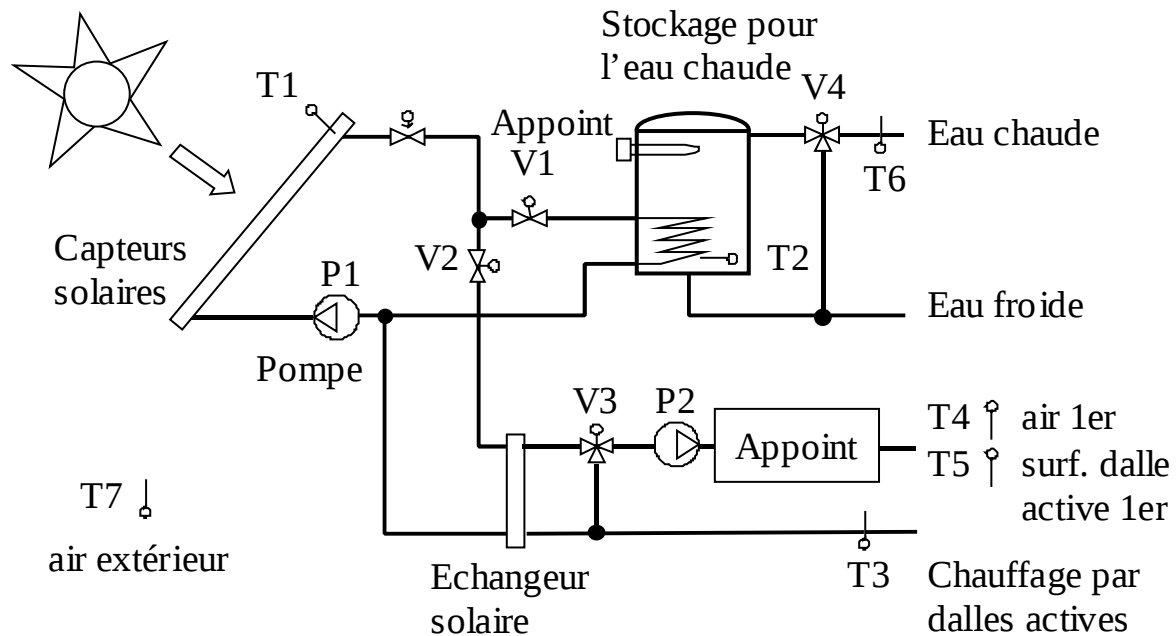
Table 5.2 Paramètres utilisés pour la simulation de capteurs plans vitrés et d'absorbeurs solaires.

Les paramètres de simulation pour la production d'eau chaude (niveaux de température, mode de chargement de la cuve à eau, isolation, taille, profil de soutirage d'eau chaude journalier, etc.) sont fixés dans la situation où des capteurs plans vitrés sont utilisés pour la production d'eau chaude uniquement à raison de 1 m² par personne. Les besoins annuels d'eau chaude sont définis pour 5 personnes. Selon la recommandation 380/1 (1988), ils correspondent à 5 x 3'000 MJ/an, soit 4'170 kWh/an, ou, normalisé par la surface de référence énergétique, à 17 kWh/m²an. Dans cette situation, les paramètres sont ajustés de manière à ce que l'énergie annuelle auxiliaire délivrée dans la cuve soit réduite de 60%.

5.6 Régulation du système et de la maison

La régulation du système concerne le contrôle des installations techniques pour satisfaire la demande d'eau chaude et de chauffage. Une « régulation de la maison » a été introduite dans les simulations pour limiter la surchauffe du climat intérieur en été (contrôle des protections solaires extérieures et de l'ouverture des fenêtres, sensé refléter le comportement idéal d'un habitant désirant limiter au maximum les surchauffes).

La régulation, telle que utilisée pour simuler le système, est définie de manière à ce que chaque composant du système puisse être contrôlé de façon indépendante. Elle est délibérément choisie aussi simple que possible, afin que de simples modules de contrôle, comparant deux valeurs de température, soient suffisant. Un potentiel d'amélioration du système de contrôle existe, mais il devrait faire appel aux techniques de «régulation prévisionnelle», si des améliorations sensibles sont désirées. Le schéma de principe est montré à nouveau dans la figure 5.4, avec les points de température utilisés pour la simulation du système de contrôle.



P1 : pompe du circuit des capteurs solaires

P2 : pompe du circuit des dalles actives

V1 : vanne ON/OFF deux-voies pour charger le stockage d'eau chaude

V2 : vanne ON/OFF deux-voies pour charger les dalles actives via l'échangeurs de chaleur

V3 : vanne ON/OFF trois-voies pour connecter les capteurs solaires aux dalles actives

V4 : vanne mélangeuse trois-voies pour limiter la température de l'eau chaude à sa valeur de consigne.

T1 : température du fluide caloporteur à la sortie des capteurs solaires

T2 : température de l'eau en bas du stockage d'eau chaude

T3 : température de retour du fluide caloporteur circulant dans les dalles actives

T4 : température de l'air dans la maison (1^{er} étage)

T5 : température de surface d'une dalle active dans une pièce représentative et chauffée en permanence (l'évolution de cette température devrait être comparable à la moyenne glissante sur 24h de la température de retour du fluide circulant dans les dalles (T3). Cette dernière pourrait être en pratique utilisée à la place)

T6 : température de départ de l'eau chaude

T7 : température de l'air extérieur, prise comme moyenne glissante sur 24h

Figure 5.4 Schéma de principe simplifié de l'installation solaire active et points de mesures pour le contrôle du système.

La régulation décrite dans cette section est la régulation utilisée dans les simulations pour faire fonctionner le système. En pratique, des modes de contrôle supplémentaires peuvent être définis pour gérer par exemple des surchauffes dans les capteurs ou des pannes détectées. Le circuit hydraulique serait probablement un peu différent de manière à utiliser les composants standards disponibles. (Groupe avec vanne 3-voies pour 2 consommateurs de chaleur). Toutefois, les performances thermiques annuelles résultantes ne devraient pas sensiblement différer de celles qui ont été simulées.

Chaque comparaison de température est effectuée avec un effet d'hystérésis individualisé, de manière à limiter au maximum les situations où le système de contrôle est instable. Par exemple la comparaison des températures $T1$ et $T2$ détermine si des gains solaires peuvent être transférés dans le stockage d'eau chaude, et conditionne ainsi l'état de la vanne $V1$ et de la pompe $P1$. Avec des capteurs plans vitrés, le test $T1 > T2$ ne devient « vrai » que si $T1 > T2 + 14$ K, et le restera jusqu'à ce que $T1$ soit plus petit que $T2 + 2$ K. Passé sous cette limite, le test deviendra « faux » et ne pourra être à nouveau « vrai » que lorsque $T1$ sera plus grand que $T2 + 14$ K. Avec des absorbeurs solaires, les différences de température peuvent être réduites puisque la température des capteurs varie moins fortement en raison de pertes thermiques plus grandes. Les absorbeurs solaires sont simulés avec des différences de températures réduites à 5 K et 0 K. Toutefois, un choix différent de ces valeurs dans les simulations (par exemple 10 K au lieu de 5 K), ne change pas de manière sensible les performances thermiques globales du système.

Vanne V1 (vanne pour connecter les capteurs au stockage d'eau chaude)

Si $T1 > T2$

est vrai	alors	EAU_CHAUDE_SOLAIRE = VRAI
		V1 est ON (ouverte)
faux	alors	EAU_CHAUDE_SOLAIRE = FAUX
		V1 est OFF (fermée)

Vannes V2 et V3 (vannes pour connecter les capteurs aux dalles)

Si $T1 > T3$ et $T5 < 24$ °C

est vrai	alors	CHAUFFAGE_SOLAIRE = VRAI
		V2 est ON (ouverte)
		V3 est ON (l'échangeur solaire est connecté au circuit des dalles)
faux	alors	CHAUFFAGE_SOLAIRE = FAUX
		V2 est OFF (fermée)
		V3 est OFF (l'échangeur solaire est déconnecté du circuit des dalles)

Pompe P1 (pompe de circulation des capteurs)

Si *EAU_CHAUDE_SOLAIRE* ou *CHAUFFAGE_SOLAIRE*

est *vrai* alors P1 est ON (enclenchée)
est *faux* alors P1 est OFF (déclenchée)

Pompe P2 (pompe de circulation des dalles)

Si *CHAUFFAGE_SOLAIRE* ou $T7 < 12\text{ }^{\circ}\text{C}$

est *vrai* alors P2 est ON (enclenchée)
est *faux* alors P2 est OFF (déclenchée)

Appoint (énergie d'appoint pour le chauffage, délivrée à puissance constante)

Si *CHAUFFAGE_SOLAIRE* = FAUX et $\begin{cases} T4 < 20.5\text{ }^{\circ}\text{C de } 12\text{ h à } 22\text{ h} \\ T4 < 19.5\text{ }^{\circ}\text{C le reste du temps} \end{cases}$

est *vrai* alors « appoint » est ON (enclenché)
est *faux* alors « appoint » est OFF (déclenché)

Le chauffage d'appoint est arrêté lorsque des gains solaires peuvent être collectés. Ceci permet de limiter la température du fluide caloporteur dans les dalles et de faire travailler les collecteurs à plus basse température.

Par simplification, la puissance du chauffage d'appoint est choisie constante, fixée à la valeur de dimensionnement du chauffage de la maison. Elle pourrait être modulée en fonction de la température extérieure de l'air, mais des simulations ont montré que l'énergie de chauffage annuelle n'était pas sensiblement plus faible dans ce cas.

Il est important que le contrôle du chauffage d'appoint soit découplé du chauffage solaire, et que la température de l'air de la maison puisse varier tout en assurant un confort thermique acceptable. La tâche du chauffage d'appoint doit veiller à maintenir la température de la maison dans les plus basses températures permises. En revanche, le chauffage solaire doit veiller à ne pas faire monter la température de la maison au delà des plus hautes températures admissibles.

Le contrôle du chauffage d'appoint pour l'eau chaude et de la vanne des distribution V4 est évident et n'est pas décrit ici. Les paramètres de contrôle ont été ajustés, avec les autres paramètres de simulation de la partie eau chaude du système, de manière à ce que l'énergie auxiliaire annuelle pour l'eau chaude, dans les conditions données dans la section 5.5, soit réduite de 60%.

Le contrôle des surchauffes de la maison en été est simulé de la manière suivante :

Protection solaires extérieures

Si $T4 > 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

est *vrai* alors l'ensoleillement incident sur les fenêtres est réduit de 90%
(protections solaires descendues)

faux alors l'ensoleillement incident sur les fenêtres n'est pas réduit
(protections solaires montées)

Ouverture des fenêtres

Si $T4 > 24\text{ }^{\circ}\text{C}$

est *vrai* alors le taux de renouvellement d'air est doublé (passe de 0.4 à 0.8 h⁻¹),
mais seulement si la température de l'air extérieur est inférieure à celle
de l'air intérieur

faux alors le taux de renouvellement d'air n'est pas augmenté

6. Quel niveau d'isolation choisir ?

Les besoins thermiques de la maison sont calculés une fois l'enveloppe de la maison définie, le taux de renouvellement d'air fixé, les gains internes établis et les grandeurs météorologiques connues. Le programme de simulation TRNSYS, utilisé uniquement avec le modèle de bâtiment et configuré pour simuler la maison, permet de calculer la demande de chaleur annuelle. Les gains internes sont générés par les habitants et l'énergie électrique dissipée dans la maison. Ils sont fixés conformément à la recommandation SIA 380/1 (1988), ce qui donne une valeur moyenne de 2.6 W/m^2 . La valeur cible de la demande de chaleur fixée par la recommandation SIA 380/1 pour une villa est de $260 \text{ MJ/m}^2\text{an}$, soit $72 \text{ kWh/m}^2\text{an}$. La puissance de chauffage est calculée en fixant la valeur de dimensionnement pour la température de l'air extérieur ($-2 \text{ }^\circ\text{C}$ à Locarno), et en supprimant les gains internes et les gains solaires. Les résultats obtenus sont donnés dans la table 6.1. Les pertes par transmission ont été calculées sur les dimensions extérieures de l'enveloppe. Il en résulte une légère majoration des pertes qui devrait compenser la non prise en compte des ponts thermiques. Ces derniers sont supposés être réduits au maximum et de faible importance.

Paramètre	Variante 380/1	Variante dalles actives
Isolation du toit	10 cm	20 cm
Isolation des murs extérieurs	10 cm	15 cm
Isolation des murs et du sol en contact avec le terrain et la cave	5 cm	10 cm
Performance des fenêtres double vitrage	$2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$	$1.3 \text{ W/m}^2\text{K}^*$
Ventilation contrôlée avec récupération	Non (0.4 h^{-1})	Oui ($0.2 \text{ h}^{-1} **$)
Demande de chaleur annuelle	$72 \text{ kWh/m}^2\text{an}$	$28 \text{ kWh/m}^2\text{an}$
Puissance de chauffage	8 kW	5 kW
par m^2 de surface de référence	33 W/m^2	20 W/m^2
par m^2 de dalle si 160 m^2 de dalles	50 W/m^2	31 W/m^2
par m^2 de dalle si 220 m^2 de dalles	36 W/m^2	23 W/m^2

* double vitrage sélectif avec remplissage à l'argon

** le taux de renouvellement d'air effectif du point de vue des pertes thermiques est diminué de moitié relativement au cas sans ventilation contrôlée. On suppose une récupération d'énergie de $2/3$ avec la ventilation mécanique, et un taux de renouvellement d'air de 0.1 h^{-1} causé par les infiltrations ($0.1 \text{ h}^{-1} + (1 - 2/3) \times 0.3 \text{ h}^{-1} = 0.2 \text{ h}^{-1}$)

Table 6.1 Demande de chaleur et puissance thermique à installer en fonction du degré d'isolation de la maison.

Le degré d'isolation qui satisfait à la valeur cible de la recommandation 380/1 ne permet pas de chauffer la maison avec des dalles actives uniquement. La surface disponible des dalles n'est pas suffisante. Il faudrait pouvoir équiper trois niveaux de dalles, ce qui n'est possible que si la maison a un toit plat en béton (la surface des dalles actives doit être environ 1.5 fois celle de la surface de référence énergétique). Dans notre cas, il est nécessaire d'atteindre un degré d'isolation plus grand, donné par la variante « dalles actives » dans la table 6.1. A noter que la ventilation contrôlée (appelée aussi ventilation douce) est aussi un avantage pour maîtriser les problèmes d'humidité et de concentration de polluants consécutifs à l'étanchéité poussée d'une maison à faible consommation d'énergie.

La maison est de construction lourde. La capacité thermique de la maison, évaluée en se basant sur la méthode donnée dans la dernière version de la Norme SIA 180 (1999), est estimée à 110 MJ/K. Rapportée à la surface de référence énergétique, elle correspond à 450 kJ/m²K. La constante de temps correspondante, pour la variante dalles actives, est d'environ 130 h ; (les pertes spécifiques totales de la maison sont estimées avec la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir une différence de température intérieur–extérieur de 22 K : 5000 W / 22 K = 230 W/K).

7. Performances thermiques de la maison avec la variante dalles actives

Dans un premier temps, les performances thermiques et les températures simulées de la maison sont montrées pour le cas suivant :

- 160 m² de dalles actives
- 20 m² de fenêtre vers le sud
- ventilation contrôlée avec récupération de chaleur (cf. variante « dalles actives » de la table 6.1)
- isolation de l'enveloppe de la maison et fenêtres correspondant à la variante « dalles actives » (cf. table 6.1)
- 15 m² de capteurs solaires vitrés pour l'eau chaude et le chauffage

Ce cas devrait permettre de comprendre le comportement thermique d'une telle maison et de vérifier si le confort thermique est satisfaisant.

Dans un deuxième temps, des analyses par simulations permettent de paramétrer et de comparer l'énergie auxiliaire utilisée en fonction de diverses solutions choisies (surface de capteurs vitrés, surface d'absorbeurs solaires, surface des fenêtres vers le sud et surface des dalles actives utilisée).

7.1 Températures intérieures simulées et confort thermique

Les figures 7.1 à 7.4 montrent l'évolution des puissances thermiques générées dans la maison et quelques températures sélectionnées pour deux périodes distinctes de l'année.

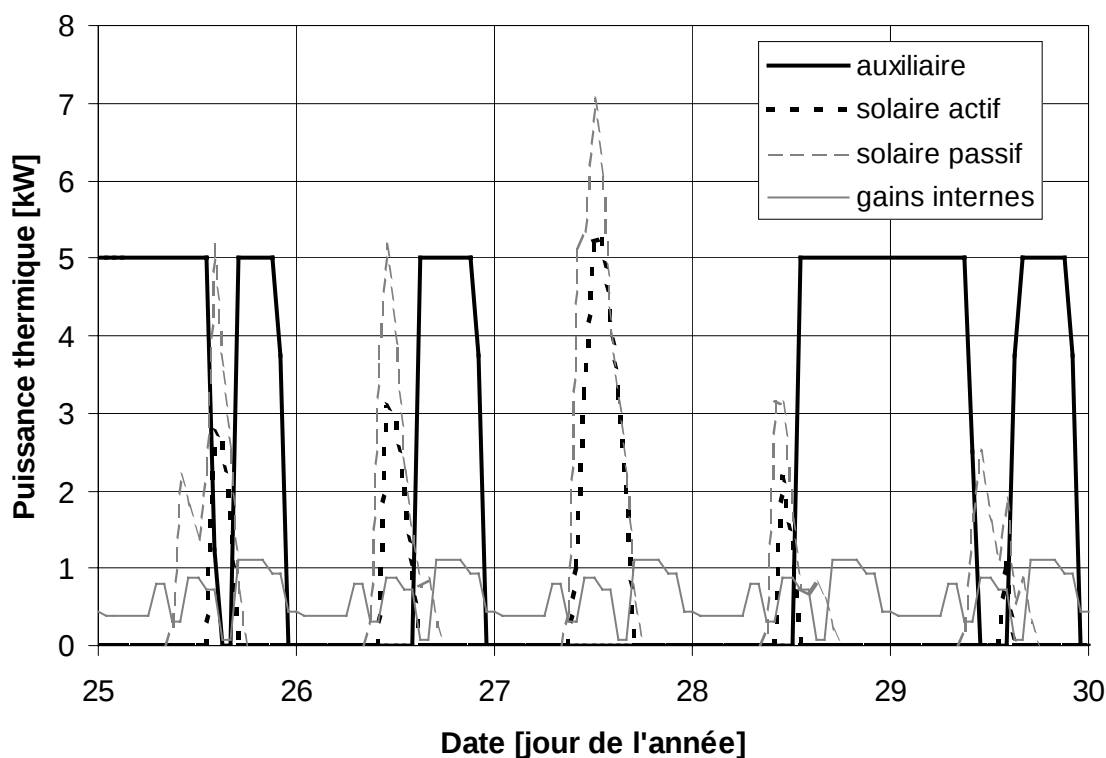


Figure 7.1 Evolution des puissances thermiques générées dans la maison en période de chauffage (fin janvier), pour 20 m² de fenêtres vers le sud et 15 m² de capteurs plans vitrés.

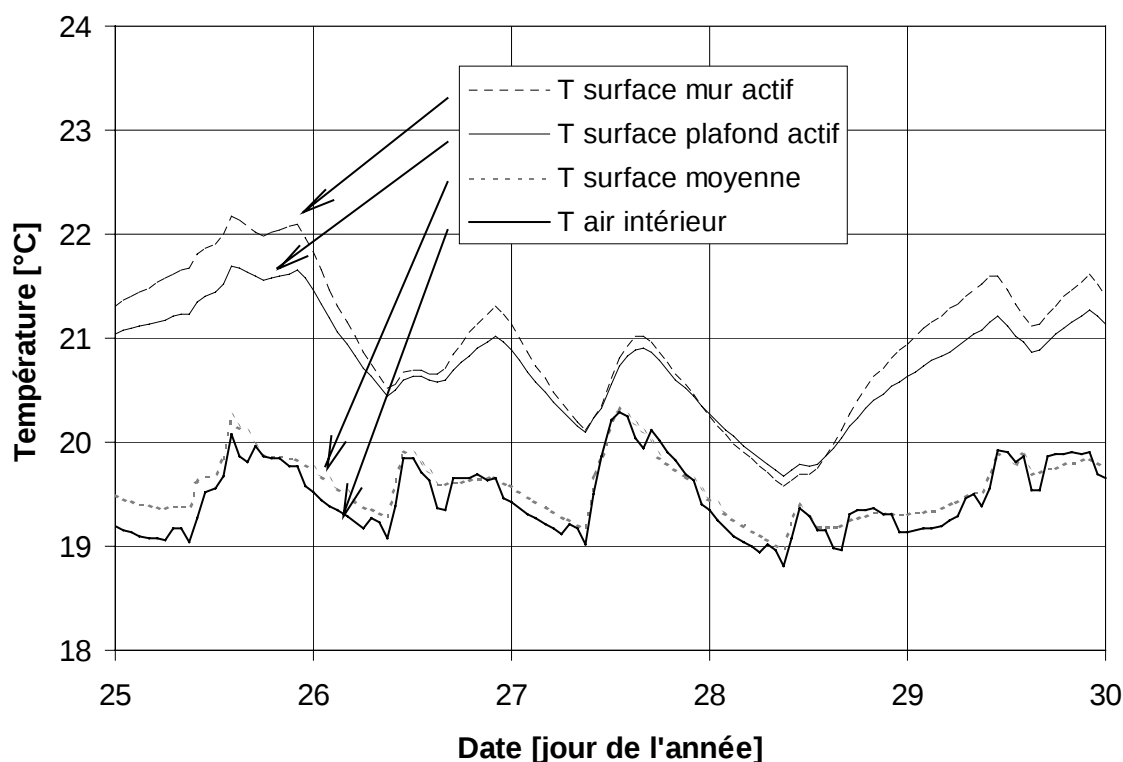


Figure 7.2 Evolution correspondante des températures à différents endroits de la maison.

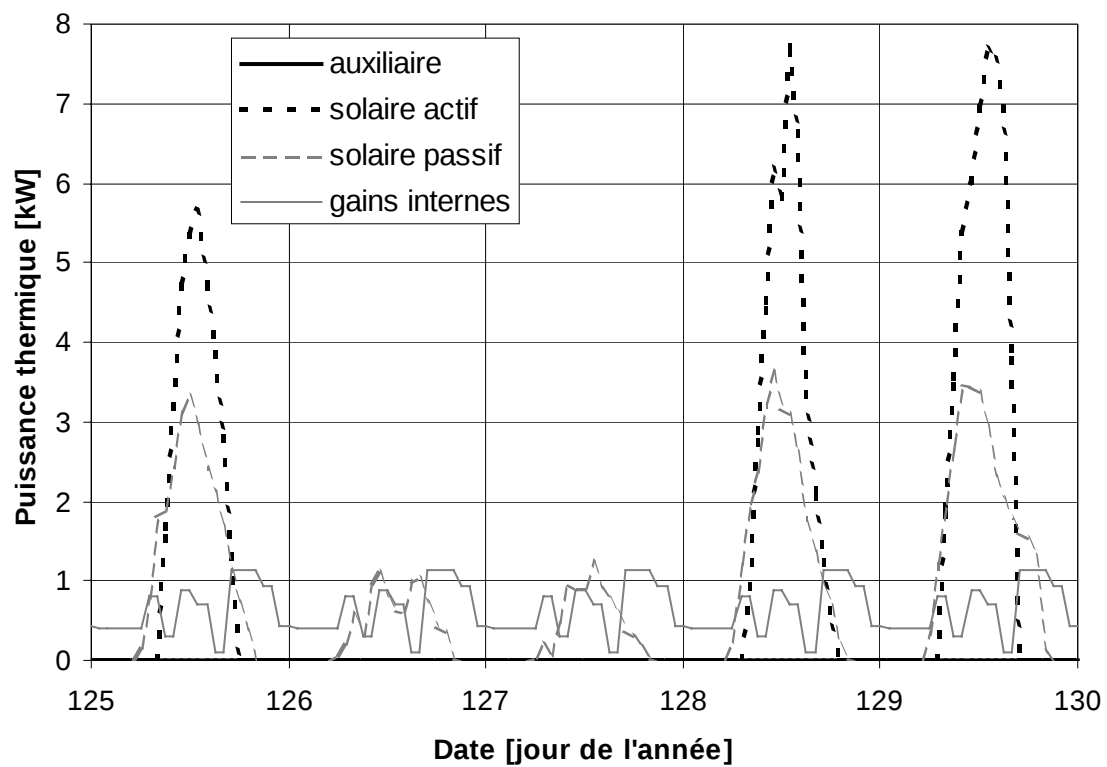


Figure 7.3 Evolution des puissances thermiques générées dans la maison en fin de période de chauffage (début mai), pour 20 m² de fenêtres vers le sud et 15 m² de capteurs plans vitrés.

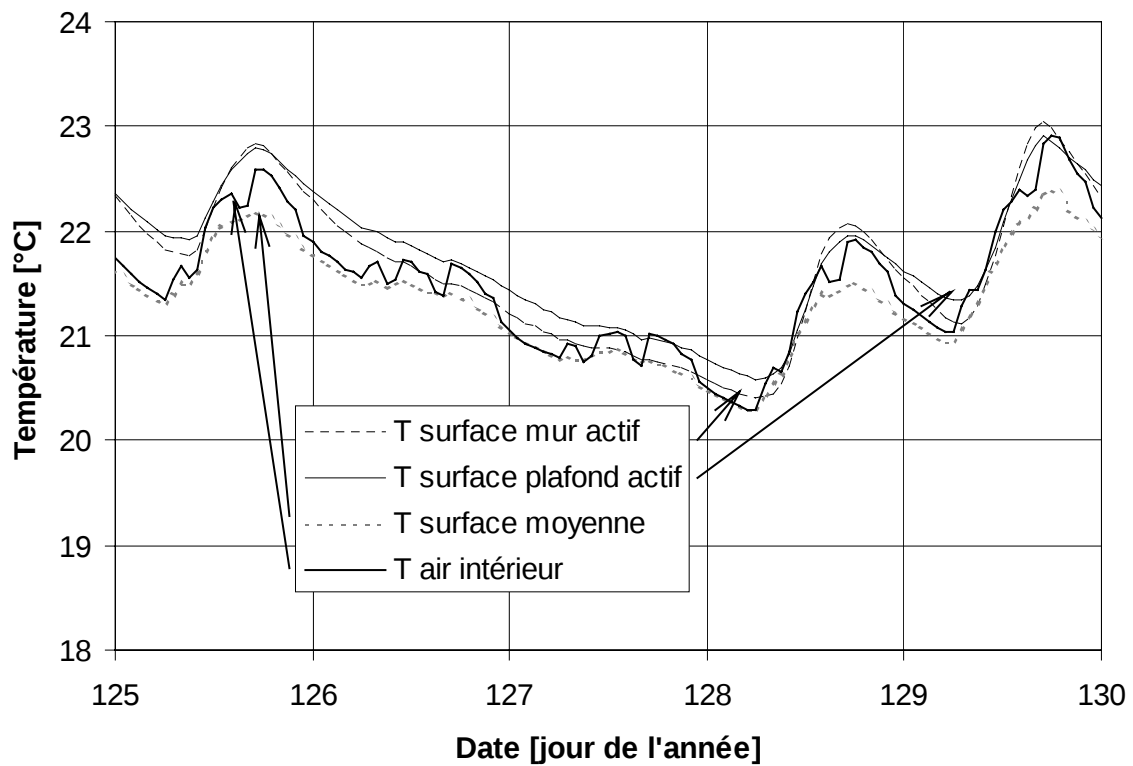


Figure 7.4 Evolution correspondante des températures à différents endroits de la maison.

La température de l'air intérieur montre de petites variations pendant la journée qui sont liées au profil journalier des gains internes prédéfini. La température de surface moyenne est obtenue avec toutes les températures des surfaces intérieures de l'enveloppe de la zone chauffée de la maison et des murs internes. Elle correspond à une évaluation en première approximation de la température radiante moyenne. Elle est toujours proche de la température de l'air intérieur.

La température ambiante pour le confort, appelée aussi température opérative, est la moyenne pondérée de la température de l'air intérieur et de la température radiante moyenne (cf. Norme SIA 180, 1999). Elle correspond à la moyenne arithmétique si la vitesse relative de l'air est nulle.

Selon la norme SIA 180, le confort est considéré comme satisfaisant lorsque, dans des conditions usuelles d'habillement et d'activité, 80% des usagers sont satisfaits. En hiver, la température ambiante permet de satisfaire 90% des usagers si elle varie entre 19 et 24 °C ; (habillement : 1 clo ; activité : 1.2 met, humidité relative comprise entre 30% et 70% et vitesse relative de l'air intérieur : <0.1 m/s). La marge entre cette valeur de 90% et la limite de 80% tient compte de sources d'inconfort supplémentaires non prises en compte (gradients de température, courants d'air, etc.). La norme SIA 180 fixe encore d'autres contraintes, dont une pour les plafonds chauds : l'asymétrie de température radiante entre le haut et le bas doit rester inférieure à 4 K. Pour le cas simulé ci-dessus, cette contrainte est satisfaite. En été, la température ambiante doit être comprise entre 23.5 et 26.5 °C ; (habillement : 0.5 clo ; activité : 1.2 met, humidité relative comprise entre 30% et 70% et vitesse relative de l'air intérieur : <0.1 m/s). Le diagramme des températures classées de la température ambiante, calculée comme la moyenne arithmétique de l'air intérieur et de la température moyenne radiante, permet de vérifier que les variations de la température ambiante satisfont aux exigences du confort thermique (cf. figure 7.5).

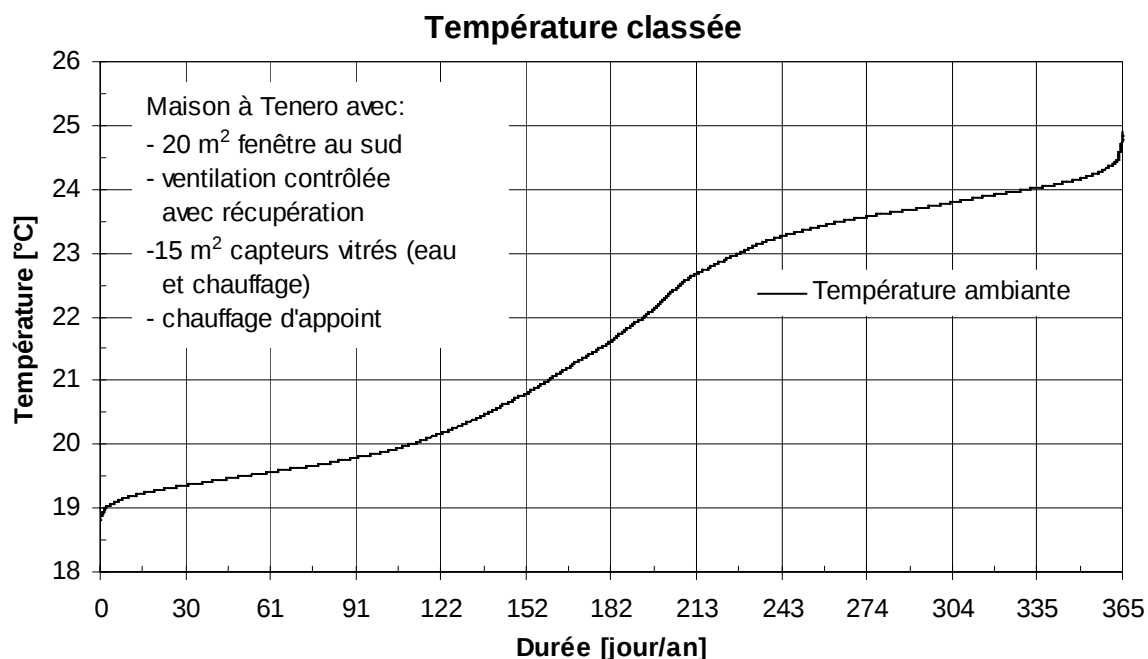


Figure 7.5 Classement de la température ambiante, calculée comme la moyenne arithmétique de la température de l'air intérieur et de la température moyenne radiante.

7.2 Bilan thermique de la maison

Le bilan énergétique du bâtiment est montré dans la figure 7.6. La totalité des pertes thermiques (cf. figure 7.6a) est obtenue en simulant le bâtiment sans gains internes, sans gains solaires passifs et actifs, et sans récupération de chaleur sur l'air vicié. La figure 7.6b montre les apports de chaleur. La récupération de chaleur sur l'air vicié permet de gagner la moitié des pertes thermiques par ventilation. L'énergie de chauffage d'appoint et les gains solaires actifs sont obtenus en simulant le bâtiment avec tous les apports de chaleur. Les gains internes et les gains solaires passifs constituent le reste, au prorata de leur utilisation. Le bilan énergétique relatif à l'eau chaude n'est pas montré. La part des gains solaires actifs utilisés pour l'eau chaude représentent plus de la moitié de ceux qui sont utilisés pour le chauffage.

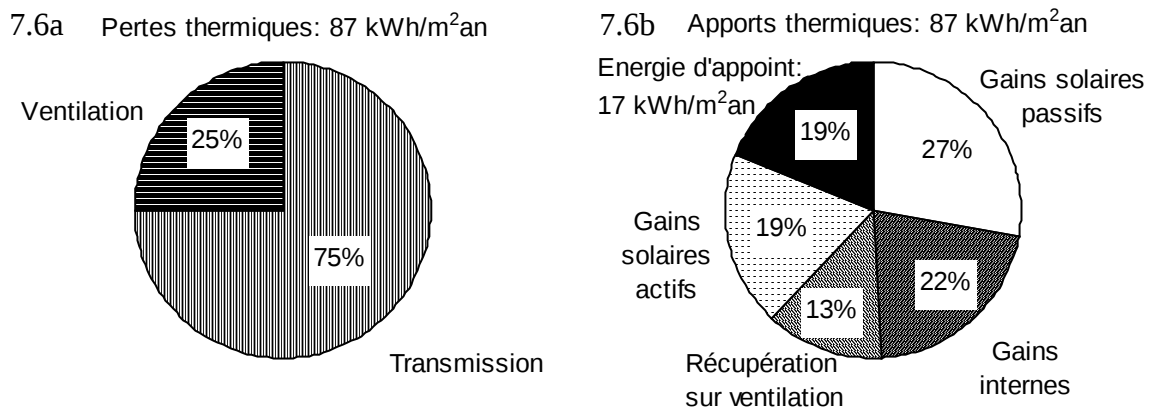


Figure 7.6 Bilan énergétique simulé de la maison (20 m² de fenêtres vers le sud, 15 m² de capteurs solaire vitrés pour le chauffage et l'eau chaude) montrant les pertes thermiques (6a) et les apports de chaleur (6b).

Les gains solaires passifs représentent la plus grande part dans le bilan de chauffage de la maison. Toutefois, les gains solaires actifs sont du même ordre de grandeur, si les gains pour l'eau chaude sont comptabilisés. (Ils correspondent en tout à 30 % de l'énergie contenue dans le « gâteau » de la figure 7.6). Les besoins d'eau chaude sont de 17 kWh/m². Les gains solaires actifs permettent de réduire la contribution de l'énergie auxiliaire pour l'eau chaude à 7 kWh/m²an. La figure 7.7 permet de comparer le bilan thermique de la maison avec respectivement 20 et 40 m² de fenêtres vers le sud.

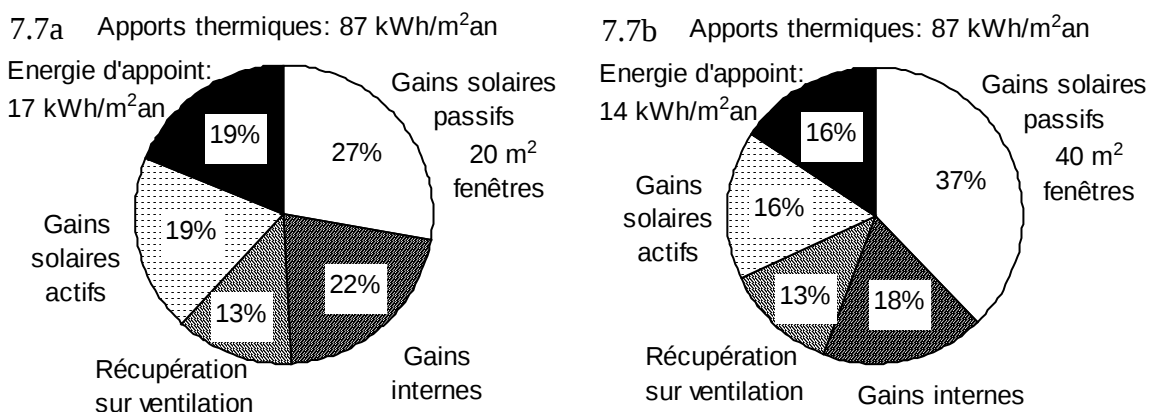


Figure 7.7 Comparaison du bilan énergétique simulé de la maison avec 20 m² de fenêtres vers le sud (7.7a) et 40 m² de fenêtres vers le sud (7.7b).

Doubler la surface des fenêtres permet de sensiblement augmenter la part des gains solaires passifs dans le bilan énergétique de la maison. La fraction solaire des gains passifs passe de 27% à 37%. Toutefois, la réduction de l'énergie d'appoint reste modeste. L'augmentation des gains solaires passifs se fait au détriment de l'utilisation des gains internes et des gains solaires actifs, dont la fraction solaire pour le chauffage diminue de 19% à 16%. (L'influence sur l'énergie récupérée par la ventilation contrôlée n'est pas prise en compte. Le bilan énergétique est établi sur l'hypothèse que 50% des pertes totales par ventilation (cf. figure 7.6a) sont récupérées.)

Comme attendu il apparaît clairement que les gains solaires passifs sont couplés aux gains solaires actifs. La figure 7.7 permet de montrer que la fraction solaire des gains solaires passifs ou actifs ne permet pas de quantifier l'influence d'un paramètre de manière satisfaisante. L'évaluation d'une combinaison de mesures ne devrait pas être basée sur la (ou les) fraction(s) solaire(s) mais sur la réduction résultante de l'énergie auxiliaire. Dans les sections suivantes, les influences de diverses solutions envisagées sont évaluées sur l'énergie auxiliaire.

7.3 Capteurs solaires vitrés versus absorbeurs solaires

La combinaison des mesures données au début du chapitre 7 est le point de départ des analyses. La surface des capteurs solaires est variées de 5 à 40 m², et pour deux types de capteurs :

- capteurs plans vitrés
- absorbeurs sans vitrage.

Les caractéristiques thermiques des capteurs sont données dans la table 5.2. Lorsque la surface des capteurs est fixée à 5 m², les gains solaires actifs ne sont utilisés que pour l'eau chaude (dans ce cas, les dalles actives ne sont pas connectées aux capteurs solaires). La figure 7.8 permet de montrer l'influence de la surface des capteurs solaires sur l'énergie auxiliaire pour le chauffage et l'eau chaude.

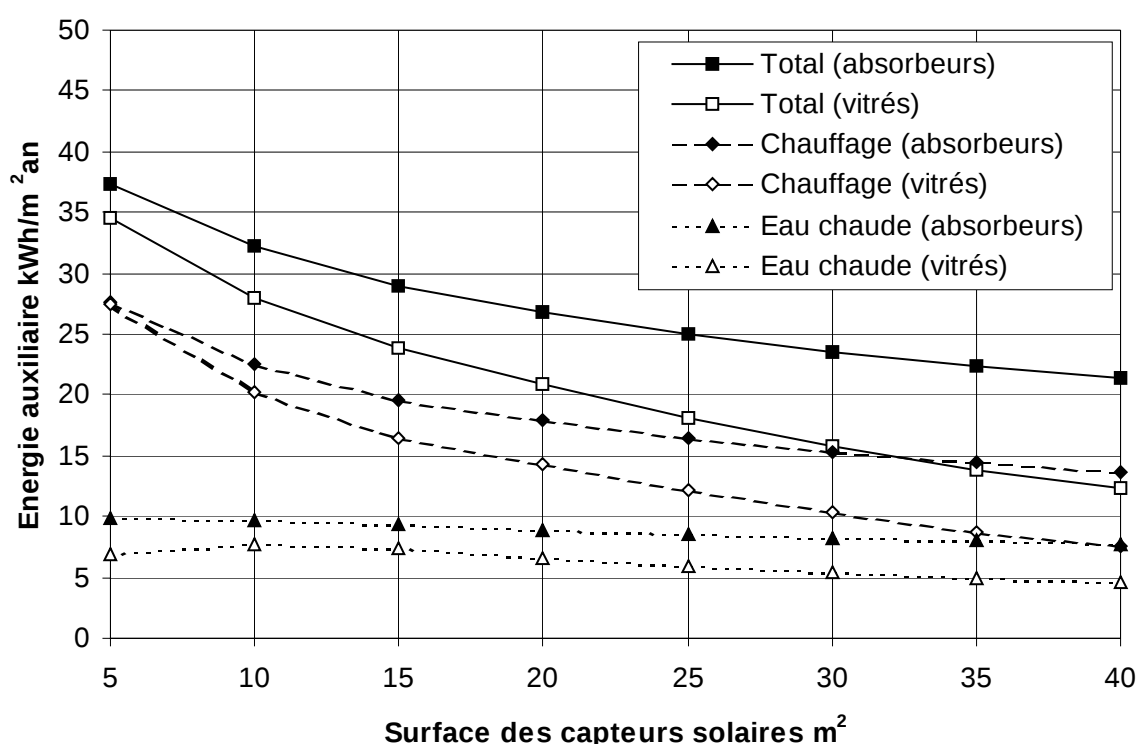


Figure 7.8 Influence de la surface des capteurs vitrés et d'absorbeurs (sans vitrage) sur l'énergie auxiliaire annuelle nécessaire au chauffage et à l'eau chaude. La surface des fenêtres orientées vers le sud est de 20 m².

Dans les simulations, le volume du stockage pour l'eau chaude est fixé à 500 litres quel que soit la surface des capteurs. L'énergie auxiliaire pour l'eau chaude est délivrée dans le stockage d'eau chaude, conformément au schéma de principe montré dans la figure 5.4. La figure permet de montrer que 1 m² de capteur vitré est équivalent à environ 2 m² d'absorbeur sans vitrage, lorsque la surface des capteurs vitrés est comprise entre 10 et 20 m². Le prix d'achat au mètre carré d'un absorbeur solaire est aussi environ deux fois plus faible qu'un capteur vitré. Toutefois les performances thermiques des absorbeurs sont plus sensibles au vent que celles des capteurs vitrés. Les effets du vent n'ont pas été pris en compte dans les

simulations. En revanche les absorbeurs solaires ont l'avantage de ne pas créer de problème de surchauffe dans les capteurs en été.

Dans la table 7.1, les performances thermiques des collecteurs solaires sont montrées en terme de kWh thermique par mètre carré de collecteur que le système auxiliaire n'a pas eu besoin de produire par rapport à la situation sans collecteur solaire.

Surface des collecteurs	Capteurs vitrés Réduction d'énergie auxiliaire kWh/m ²			Absorbeurs sans vitrage Réduction d'énergie auxiliaire kWh/m ²		
	Chauffage	Eau chaude	Total	Chauffage	Eau chaude	Total
5 m ²	-	541	541	-	402	402
10 m ²	178	250	428	124	202	326
15 m ²	180	174	354	129	142	271
20 m ²	161	140	301	118	111	230
25 m ²	150	118	268	109	93	201
30 m ²	139	103	242	100	80	180
35 m ²	131	91	222	92	70	162
40 m ²	122	81	203	85	63	148

Table 7.1 Energie auxiliaire annuelle pour le chauffage et l'eau chaude. Influence de la surface des fenêtres sur les gains solaires actifs avec des capteurs vitrés ou des absorbeurs sans vitrage.

7.4 Gains solaires actifs versus gains solaires passifs

La figure 7.9 permet de montrer l'influence de la surface des fenêtres (et donc de l'importance des gains solaires passifs) sur les gains solaires actifs, collectés soit par des capteurs vitrés ou soit par des absorbeurs solaires.

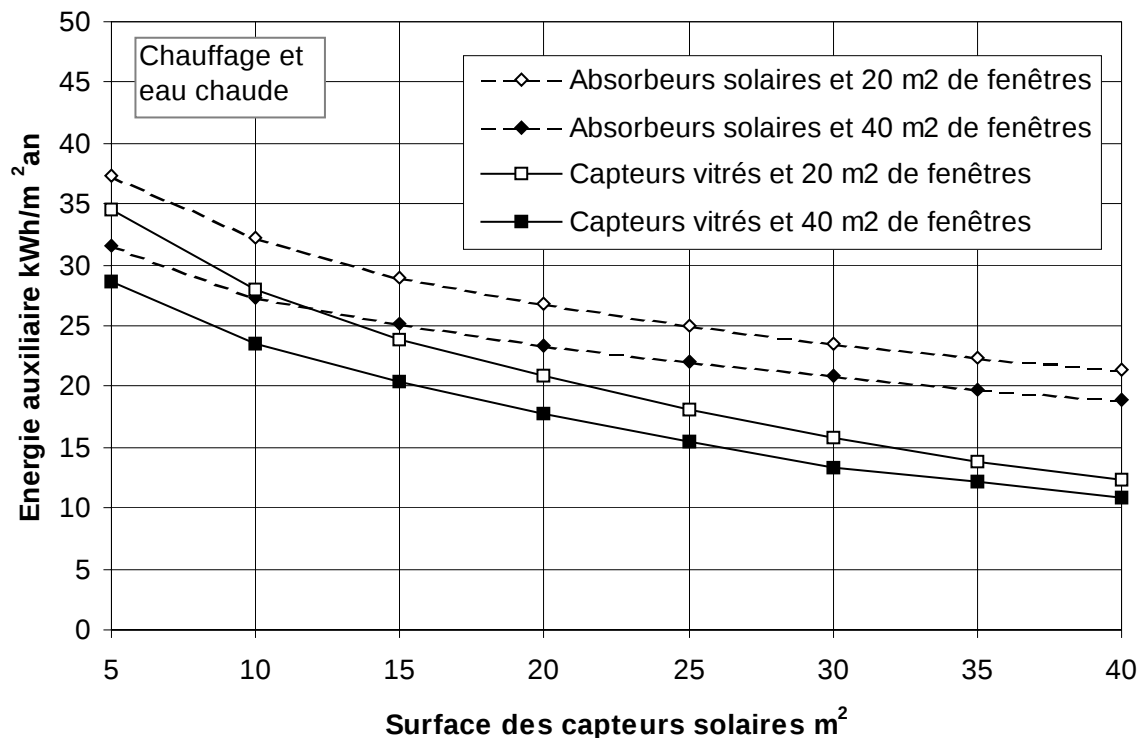


Figure 7.9 Energie auxiliaire annuelle pour le chauffage et l'eau chaude. Influence de la surface des fenêtres sur les gains solaires actifs avec des capteurs vitrés ou des absorbeurs sans vitrage.

Le graphe de la figure 7.9 montre que la réduction d'énergie auxiliaire, suite à l'augmentation de la surface des fenêtres de 20 à 40 m², devient plus petite à mesure que la surface des capteurs solaires augmente. Inversement, les gains solaires actifs deviennent plus faibles si la surface des fenêtres de la maison est augmentée. L'interaction entre les gains solaires passifs et actifs a déjà été montrée dans la section 7.2. La figure 7.10 permet de quantifier la réduction d'énergie auxiliaire engendrée par l'augmentation de la surface des fenêtres, lorsque aucun gain solaire actif n'est utilisé pour le chauffage. La comparaison avec la réduction d'énergie auxiliaire engendrée par les gains solaires actifs seuls permet d'estimer un rapport d'équivalence entre la surface des capteurs et la surface des fenêtres.

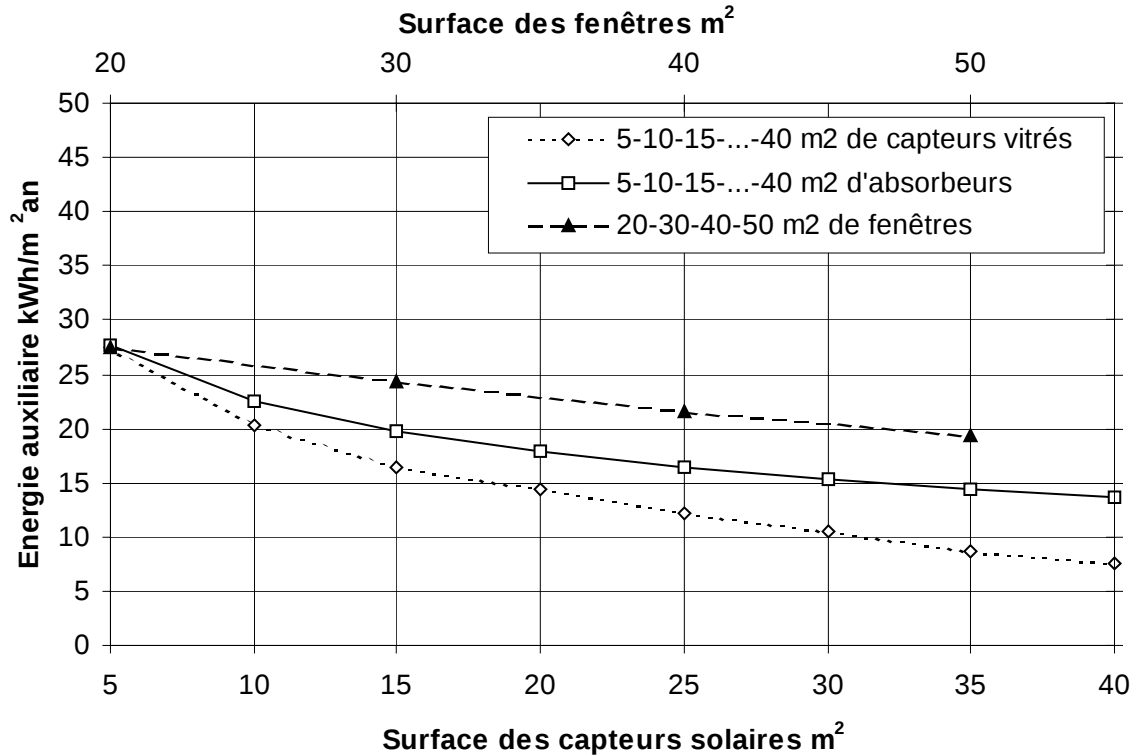


Figure 7.10 Réduction de l'énergie auxiliaire annuelle de chauffage en fonction de l'augmentation de la surface des fenêtres orientées vers le sud, de la surface des absorbeurs solaires sans vitrage et de la surface des capteurs vitrés.

La situation de départ est calculée pour 20 m² de fenêtres orientées vers le sud et 5 m² de capteurs solaires pour l'eau chaude uniquement (pas de gains solaires actifs pour le chauffage). L'énergie auxiliaire consommée est alors de 28 kWh/m²an. Le graphique de la figure 7.10 permet de montrer que si la surface des capteurs est augmentée pour satisfaire également des besoins de chauffage, alors :

- 10 m² d'absorbeurs solaires supplémentaires sont équivalents à 25–30 m² de fenêtres supplémentaires.
- 5 m² de capteurs vitrés supplémentaires sont équivalents à 25–30 m² de fenêtres supplémentaires.

Ces rapports d'équivalence permettent d'évaluer l'option la plus avantageuse en fonction de son coût respectif. Outre le critère économique, d'autres critères doivent également être pris en compte, comme l'intégration dans le concept architectural de la maison, la durabilité, etc.

Contrairement au système solaire actif, les fenêtres ne demandent pas d'entretien particulier. En revanche les gains solaires passifs sont beaucoup plus sensibles aux habitudes des occupants. Des protections solaires efficaces sont aussi indispensables en été. Relativement à la taille de la maison simulée, la surface des fenêtres n'excéderait guère 50 m². Le potentiel de réduction de l'énergie auxiliaire est donc plus important avec un système solaire actif.

7.5 Surface des dalles actives plus grande

Les performances thermiques de la maison sont recalculées avec 220 m² de dalles (et murs) actifs plutôt que 160 m². L'effet est montré sur l'énergie auxiliaire de chauffage en la comparant avec les valeurs obtenues avec 160 m² de dalles. La figure 7.11 permet de montrer l'effet avec des absorbeurs solaires et des capteurs vitrés.

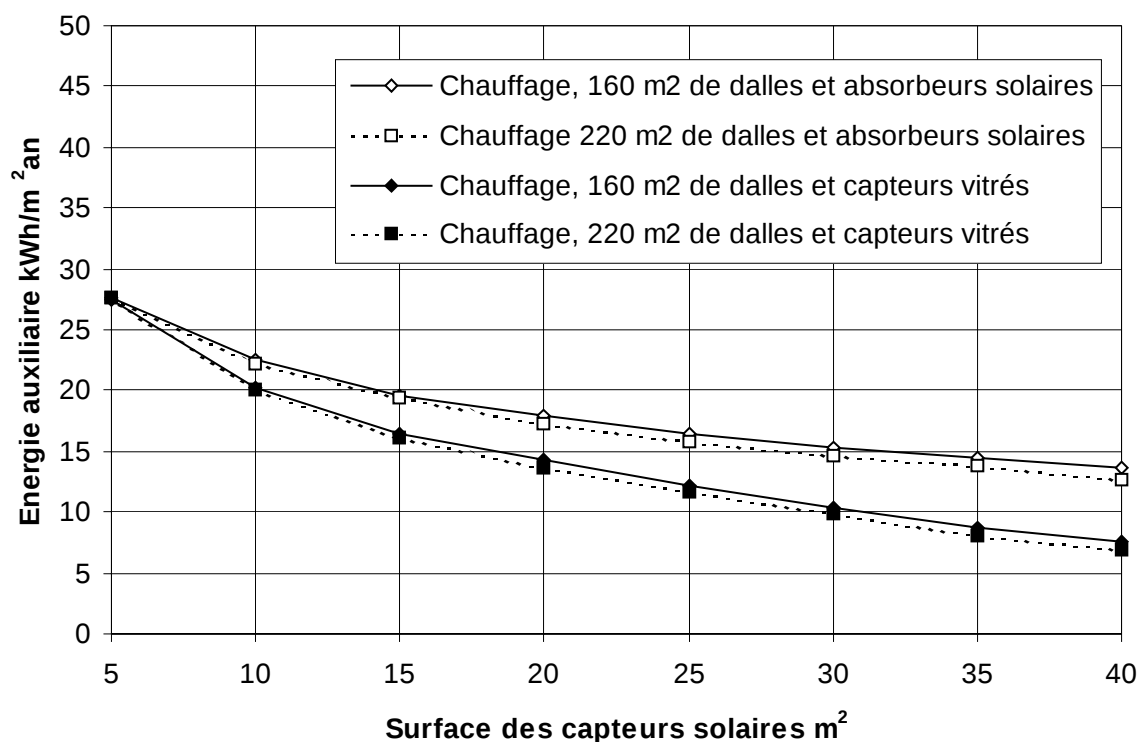


Figure 7.11 Energie auxiliaire annuelle de chauffage en fonction de la surface des capteurs, pour 160 et 220 m² de dalles et murs actifs.

La réduction d'énergie auxiliaire, suite à l'amélioration de l'efficacité annuelle des capteurs solaires induite par une surface des dalles actives plus grande, est marginale. La surface des dalles actives n'est donc pas conditionnée par l'utilisation ou non de capteurs solaires, mais bien par les besoins thermiques de la maison (et plus précisément de chaque pièce), afin de pouvoir assurer le chauffage tout en garantissant un confort acceptable.

7.6 Température de la maison sans chauffage auxiliaire dans les dalles

La figure 7.12 permet de visualiser l'effet de la surface des capteurs solaires sur la température intérieure de l'air dans la maison, avec ou sans chauffage d'appoint. (On rappelle que lorsque la surface des capteurs solaires est fixée à 5 m², les gains solaires actifs ne sont pas utilisés pour le chauffage).

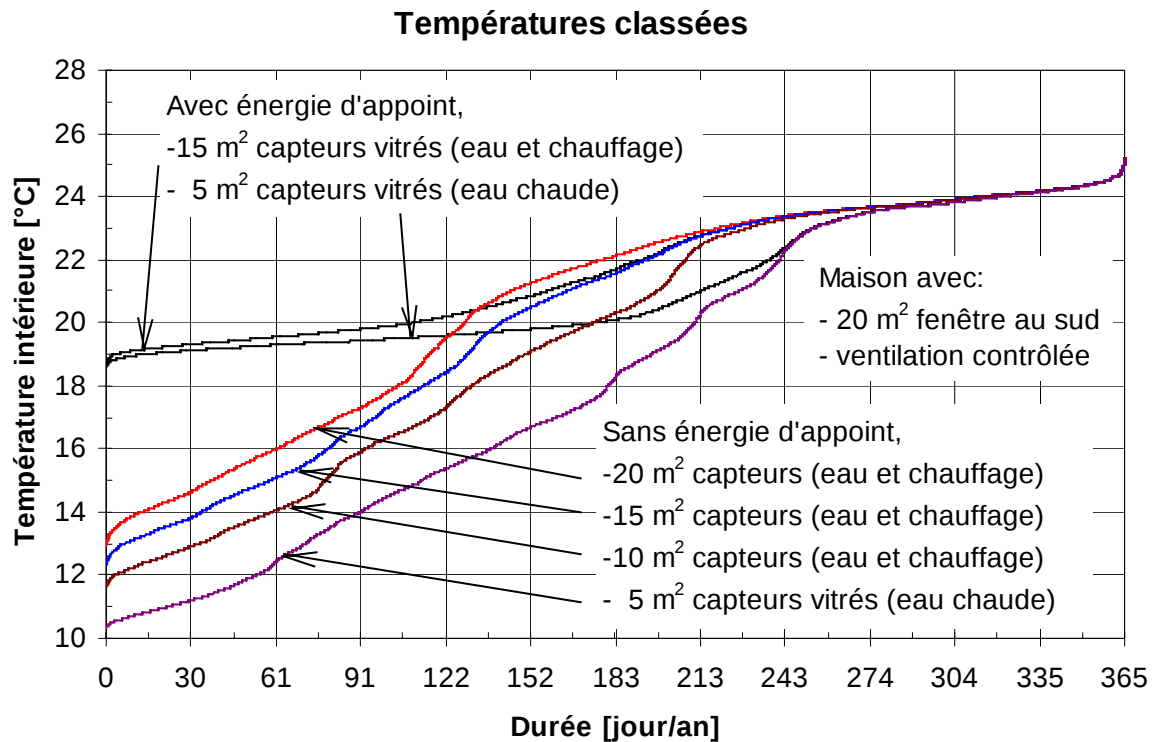


Figure 7.12 Températures intérieures classées de la maison avec ou sans chauffage auxiliaire pour diverses surfaces de capteurs solaires vitrés.

La figure 7.12 montre que sans chauffage auxiliaire, la surface des capteurs peut être augmentée pour réduire le nombre d'heures où la température est inconfortable (trop basse). Toutefois la réduction devient marginale à mesure que la surface des capteurs augmente, en raison de la capacité de stockage de la maison, qui elle est constante. Une couverture 100% solaire ne peut pas être réalisée sans un stockage à plus long terme de l'énergie, i.e. saisonnier. Une énergie d'appoint sera toujours nécessaire pour garantir une température confortable en tout temps. Dans la situation où elle n'est pas délivrée dans les dalles actives, on peut imaginer du chauffage au bois avec un poêle.

8. Estimation des coûts de quelques variantes

L'estimation des coûts, ou plutôt des surcoûts, est nécessaire pour évaluer les différentes options calculées. Compte tenu de la difficulté à déterminer avec précision les surcoûts, les estimations effectuées dans ce chapitre sont à considérer à titre indicatif. Trois variantes sont évaluées :

- 1.- Variante dalles actives avec capteurs solaires vitrés pour le chauffage
- 2.- Variante dalles actives avec absorbeurs solaires sans vitrage pour le chauffage
- 3.- Variante dalles actives avec surface des fenêtres augmentées vers le sud

8.1 Maison de référence pour l'évaluation des variantes

Le point de départ pour l'évaluation de chaque variante est la maison dont le niveau d'isolation permet de satisfaire à la valeur cible de la recommandation 380/1 (1988), soit une demande de chaleur annuelle de $260 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ pour le chauffage ($72 \text{ kWh/m}^2\text{an}$). Les besoins de chauffage sont couverts par une chaudière à mazout dont l'efficacité annuelle moyenne est fixée à 0.85. Les besoins d'eau chaude sont quant à eux couverts par un chauffe-eau électrique. L'énergie électrique consommée par le chauffe-eau, rapportée à la surface de référence énergétique de la maison, correspond à $18 \text{ kWh/m}^2\text{an}$. L'indice énergétique de chauffage et d'eau chaude est alors de $85+18=103 \text{ kWh/m}^2\text{an}$. L'indice Minergie correspondant est de $121 \text{ kWh/m}^2\text{an}$. Il est obtenu en pondérant l'énergie électrique avec un facteur 2. Les caractéristiques thermiques de la maison sont données dans la table 6.1 du chapitre 6 (variante 380/1).

Chaque variante implique les interventions suivantes :

A. Amélioration de l'enveloppe de la maison et ventilation mécanique. La ventilation mécanique est introduite à ce stade pour contrôler le taux de renouvellement d'air. En effet, une « enveloppe améliorée » implique une maison très étanche à l'air. Le taux de renouvellement d'air de la maison doit être suffisant pour maintenir une bonne qualité de l'air intérieur. Il est également important pour évacuer la production interne d'humidité et donc d'éviter les problèmes de moisissures et de dégradation des matériaux.. Dans la mesure du possible, il est important de pas devoir utiliser des ventilateurs dont la puissance électrique consommée excède 40 W (régulation incluse) (Langer, 1999).

B. Récupération sur la ventilation. Le concept de ventilation contrôlée doit permettre de préchauffer l'air neuf extérieur avec l'air expulsé via un échangeur de chaleur.

Selon l'expérience pratique, la mise en œuvre de dalles actives pour le chauffage ne crée pas du surcoût relativement à un chauffage conventionnel au sol (Cornu, 2000). Le « surcoût » engendré aurait même tendance à être négatif. Pour cette raison, le chauffage par dalles actives n'est pas comptabilisé dans l'estimation du surcoût.

Variante 1 : capteurs solaires vitrés

- C. **Chauffage de l'eau chaude avec un « kit » solaire.** Un chauffe-eau solaire avec appoint électrique remplace le chauffe-eau 100% électrique. Les capteurs solaires utilisés sont des capteurs plans vitrés.
- D. **Capteurs solaires vitrés couplés aux dalles actives.** La surface des capteurs solaires est augmentée à 15 m² pour satisfaire des besoins de chauffage également.

Variante 2 : absorbeurs solaires sans vitrage

- C. **Chauffage de l'eau chaude avec un « kit » solaire.** Un chauffe-eau solaire avec appoint électrique remplace le chauffe-eau 100% électrique. Les capteurs solaires utilisés sont des absorbeurs sans vitrage.
- D. **Absorbeurs solaires sans vitrage couplés aux dalles actives.** La surface des absorbeurs solaires est augmentée à 20 m² pour satisfaire des besoins de chauffage également.

Variante 3 : augmentation de la surface des fenêtres

- C. **Chauffage de l'eau chaude avec un « kit » solaire.** Un chauffe-eau solaire avec appoint électrique remplace le chauffe-eau 100% électrique. Les capteurs solaires utilisés sont des capteurs plans vitrés.
- D. **Fenêtres supplémentaires.** La surface des fenêtres orientées vers le sud est augmentée à 40 m² (20 m² de fenêtres supplémentaires sont insérés dans la façade).

8.2 Estimation des surcoûts et durée de vie

Comme déjà mentionné, les surcoûts indiqués dans cette section sont donnés à titre indicatif. La manière dont ils sont obtenus est brièvement décrite, de manière à pouvoir facilement les ré-estimer si des informations plus précises ou plus actuelles sont disponibles. La durée de vie associée à une intervention est également donnée, basée sur les indications données dans le programme d'impulsion Ravel (Impuls Compact, 1997).

A. Amélioration de l'enveloppe de la maison et ventilation mécanique

Surcoût estimé : 15'000 à 20'000 CHF.

Durée de vie : 30 ans.

Le surcoût est composé par l'isolation supplémentaire à poser (5 à 8 kCHF), par des fenêtres plus performantes (150 à 200 CHF/m² pour 34 m² de fenêtres sur toutes les façades, soit 5 à 7 kCHF), et par la ventilation contrôlée (environ 5 kCHF). La durée de vie pour la ventilation mécanique est plus courte. Elle est prise en compte dans la mesure suivante (récupération sur la ventilation).

B. Récupération sur la ventilation

Surcoût estimé : 4'000 à 5'000 CHF.

Durée de vie : 15 ans.

Le surcoût est composé par l'installation d'un échangeur de chaleur dans le système de ventilation.

C. Chauffage de l'eau chaude avec un « kit » solaire

Capteurs solaires plans vitrés :

Surcoût estimé : 9'000 à 10'000 CHF.

Durée de vie : 20 ans.

Absorbeurs solaires sans vitrage :

Surcoût estimé : 7'000 à 8'000 CHF.

Durée de vie : 20 ans.

Les prix sont basés sur des offres de fabricants de capteurs solaires, montage compris. Comme le kit solaire comprend également le stockage d'eau chaude, il faut déduire le coût du chauffe-eau de la variante 100% électrique pour obtenir le surcoût. Ce dernier est estimé à 1 – 1.5 kCHF.

D1. Capteurs solaires vitrés couplés aux dalles actives

Surcoût estimé : 10'000 à 11'000 CHF.

Durée de vie : 20 ans.

Les prix sont basés sur des offres de fabricants de capteurs solaires. Le surcoût est calculé par rapport à l'option C. C'est la différence de prix entre le kit solaire et le système solaire avec 15 m² de capteurs pour l'eau chaude et le chauffage. Il s'agit de deux systèmes différents. A noter que pour cette variante, il est recommandé dans l'offre de prévoir un système d'évacuation de la chaleur (piscine ou refroidissement air/eau), afin de limiter les problèmes de surchauffe en été. Ces options ne sont pas comprises dans l'offre.

D2. Capteurs solaires vitrés couplés aux dalles actives

Surcoût estimé : 11'000 à 12'000 CHF.

Durée de vie : 20 ans.

Les prix sont basés sur des offres de fabricants de capteurs solaires. Le surcoût est calculé par rapport à l'option C. C'est la différence de prix entre le kit solaire et le système solaire avec 20 m² d'absorbeurs pour l'eau chaude et le chauffage. Il s'agit de deux systèmes différents.

D3. Fenêtres supplémentaires

Surcoût estimé : 10'000 à 12'000 CHF.

Durée de vie : 25 ans.

Le surcoût engendré par l'augmentation de la surface des fenêtres est composé par la différence de coût au mètre carré entre la fenêtre et le mur isolé, et les coûts supplémentaires pour les stores/volets et les protections solaires extérieures. Ils sont estimés à respectivement 300 – 400 CHF/m² pour la différence de coût et à environ 200 CHF/m² pour les coûts supplémentaires. Les 20 m² de fenêtres ajoutées dans la façade sud engendrent ainsi un surcoût de 10 à 12 kCHF. La durée de vie est fixée à 25 ans, correspondant à la moyenne des durées de vie données pour les fenêtres et pour les stores.

8.3 Indice énergétique et coût de l'énergie associé à chaque intervention

Dans la table 8.1, les indices énergétiques correspondant à chaque intervention sont présentés. L'indice énergétique comptabilise l'énergie finale à l'entrée de la maison et tient compte de l'efficacité énergétique des installations techniques. Toutefois l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement n'est pas prise en compte dans le tableau, et en particulier l'énergie électrique consommée par la ventilation contrôlée. Pour une installation correctement dimensionnée, elle ne devrait pas dépasser 1 à 3 kWh/m²an. La limite donnée par Minergie pour une habitation neuve est de 45 kWh/m²an, électricité consommée par les installations techniques comprises et comptabilisées avec un facteur 2.

Intervention	Indice énergétique			
	chauffage kWh/m ² an	eau chaude kWh/m ² an	total kWh/m ² an	Minergie* kWh/m ² an
- (réf. 380/1)	85	18	103	121
A : enveloppe	45	18	63	81
B : récupération ventilation	32	18	50	68
C1 : kit solaire vitré	32	7	39	46 (36 bois)
C2 : kit solaire non vitré	32	10	42	52 (41 bois)
D1 : solaire actif vitré	19	7	26	33
D2 : solaire actif non vitré	18	8	26	34
D3 : fenêtres supplémentaires	26	7	33	40

* l'énergie électrique pour le fonctionnement des installations techniques n'est pas comptabilisée dans les indices Minergie calculés

Table 8.1 Indice énergétique de chauffage et d'eau chaude pour chacune des interventions. Pour les interventions C1 et C2, l'indice Minergie indiqué entre parenthèse est l'indice que l'on obtiendrait avec du bois plutôt que du mazout pour le chauffage.

La maison ne peut satisfaire au standard Minergie que si les interventions sont exécutées jusqu'au niveau D, c'est à dire avec un système solaire actif pour le chauffage également ou avec une surface de fenêtre vers le sud sensiblement plus grande. Toutefois, le standard Minergie favorise l'utilisation du bois en lui attribuant une fraction utile de 1.25. En d'autres

termes, une unité de chaleur produite avec du bois ne compte dans l'indice Minergie que pour 0.8 unité d'énergie sous forme de bois. Cette valeur tient compte d'un facteur écologique de correction de 0.6 qui s'applique au rendement moyen de 75%. Si l'énergie auxiliaire pour le chauffage est du bois plutôt que du mazout, la maison satisfait le standard Minergie avec le niveau d'intervention C (kit solaire vitré ou non vitré). L'indice Minergie est alors de 36 kWh/m²an avec un kit solaire vitré, respectivement de 41 kWh/m²an avec un kit solaire non vitré. La quantité de bois nécessaire au chauffage est alors de 5 ster/an, ce qui correspond à environ 2'000 kilos de bois sec par an (ou, par mètre carré de surface chauffée, 8 kg/m²an). Avec un système solaire actif, la quantité de bois peut être réduite à 3 ster/an, soit environ 1'200 kilos de bois sec par an (5 kg/m²an).

Dans la table 8.2, les surcoûts (exprimés par mètre carré de surface énergétique) de chaque intervention sont indiqués. Un coût de l'énergie peut être associé à chaque intervention en divisant le coût annuel du surcoût investi par l'économie annuelle d'énergie finale. Le coût annuel (ou annuité) de chaque intervention est calculé avec un intérêt de 6% et une durée d'amortissement qui correspond à la durée de vie de l'intervention. (Annuités de respectivement 0.103, 0.087, 0.078 et 0.073 pour amortir un investissement en 15, 20, 25 et 30 ans avec un intérêt de 6%).

Intervention	Surcoût CHF/m ²	Gain d'énergie (chauffage) kWh/m ² an	Gain d'énergie (eau chaude) kWh/m ² an	Coût associé de l'énergie CHF/kWh
A : enveloppe	60 – 80	40	-	0.11 – 0.15
B : récupération ventilation	15 – 20	12	-	0.13 – 0.17
C1 : kit solaire vitré	35 – 40	-	11	0.27 – 0.31
C2 : kit solaire non vitré	30 – 35	-	8	0.30 – 0.35
D1 : solaire actif vitré	40 – 45	13	-0.5	0.28 – 0.31
D2 : solaire actif non vitré	45 – 50	10	1	0.32 – 0.35
D3 : fenêtres supplémentaires	40 – 50	7	-	0.45 – 0.57

NB : à titre de comparaison, le coût d'un kWh de chaleur produit avec un chauffage au mazout revient entre 10 et 15 centimes (investissement pris en compte).

Table 8.2 Surcoût d'investissement de chaque intervention (rapporté à la surface de référence énergétique) et coût de l'énergie associé.

Le surcoût associé à la récupération sur la ventilation est relativement bas, puisqu'il suppose l'existence d'une ventilation contrôlée (non comptabilisée dans le surcoût). Dans le cas contraire, ce coût est environ deux fois plus grand, du même ordre de grandeur que celui qui est associé au solaire actif.

Le coût associé au solaire actif pour le chauffage est comparable à celui de l'eau chaude avec un kit solaire. Dans notre cas, la différence principale est la forme d'énergie substituée (chauffage : énergie fossile ; eau chaude : énergie électrique). Le coût associé aux fenêtres supplémentaires (solaire passif) apparaît beaucoup plus élevé que celui du solaire actif. Toutefois, si l'on prend en compte le renchérissement de l'énergie substituée, la durée de vie plus grande des fenêtres fait que les interventions « solaires actifs » (D1 et D2) et « solaire passif » (D3) deviennent comparables (cf. section 8.4) du point de vue économique. En

revanche, les interventions « solaires actifs » permettent une plus grande réduction de l'énergie auxiliaire. La figure 8.1 permet de montrer l'investissement supplémentaire des trois variantes pour chaque intervention en fonction de l'indice énergétique de la maison.

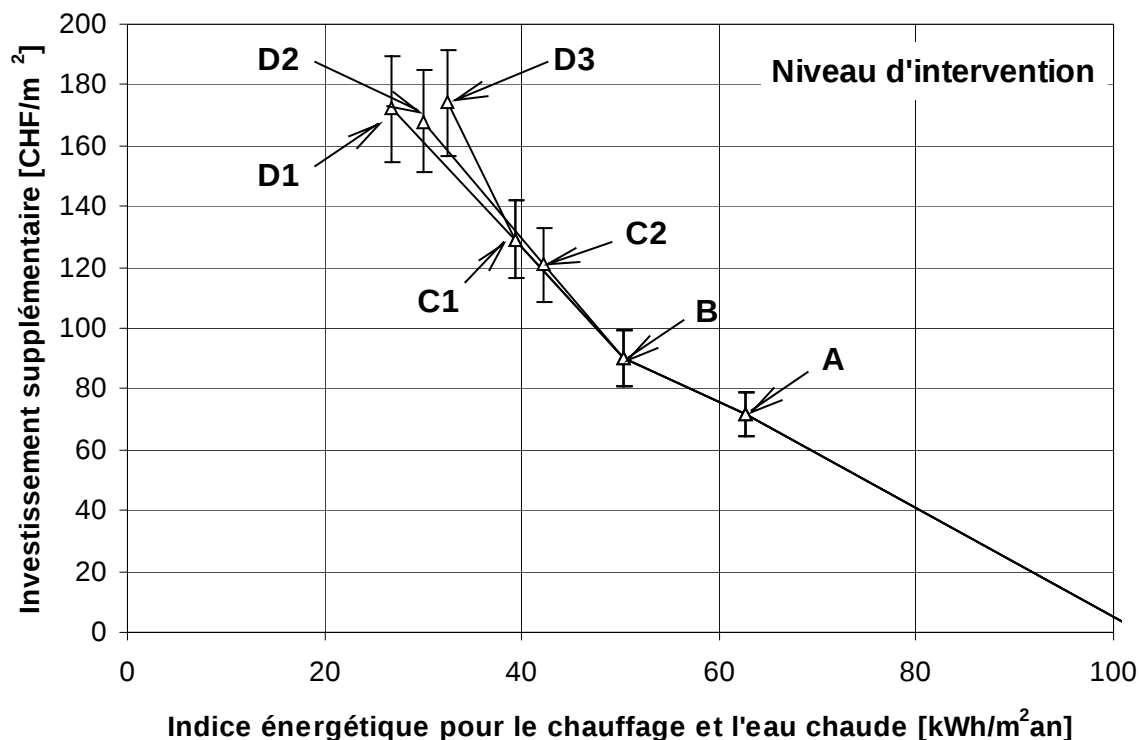


Figure 8.1 Investissement supplémentaire des trois variantes pour chaque intervention en fonction de l'indice énergétique de chauffage et d'eau chaude.

Si l'on estime le prix d'une construction à 1'500 – 2'000 CHF/m², l'investissement supplémentaire des trois variantes, poussées à leur niveau maximum (niveau D), est de l'ordre de 10% de l'investissement total. Le surcoût lié au système solaire actif (eau chaude et chauffage) est moins de la moitié, de l'ordre de 5%.

8.4 Surcoût effectif des interventions

Chaque intervention permet de réduire la consommation d'énergie auxiliaire, et donc de diminuer la quantité d'énergie à acheter chaque année. Le surcoût effectif de chaque intervention est donc formé par le coût du capital supplémentaire investi (annuité), auquel on soustrait le coût de l'énergie auxiliaire économisée. (Il contient également le coût d'entretien, mais ce dernier n'est pas pris en compte ici). Comme l'énergie auxiliaire est sujette au renchérissement, l'économie annuelle d'énergie auxiliaire augmente d'année en année, et l'effet devient d'autant plus important que la durée de vie de l'intervention est longue. Ce calcul peut être effectué en se basant sur les valeurs données dans le programme d'impulsion Ravel (Impuls Compact, 1997). Elles sont énumérées dans la table 8.3.

Taux d'inflation prévu : 4%	Taux d'intérêt correspondant : 6%		
Augmentation du coût de l'énergie	Scénario minimum	Scénario moyen	Scénario maximum
Electrique	5%	6.25%	7.5%
Mazout	4%	6%	8%

Table 8.3 Paramètres de calcul pour l'évaluation du surcoût effectif, conformément aux valeurs données dans le programme d'impulsion Ravel.

Les surcoûts moyens sont calculés pour les trois scénarios et pour chaque intervention. Ils sont présentés dans la table 8.4. Le coût de l'énergie finale au moment des interventions est fixé à 0.05 CHF/kWh pour le mazout et à 0.18 CHF/kWh pour l'électricité. A noter qu'aucune subvention ou réduction d'impôt n'a été prise en compte dans les calculs.

Surcoût effectifs des interventions / variantes en CHF/an	Scénario minimum	Scénario moyen	Scénario maximum
A : enveloppe	470	200	-170
B : récupération ventilation	260	230	190
C1 : kit solaire vitré	60	-50	-160
C2 : kit solaire non vitré	170	100	10
D1 : solaire actif vitré	720	680	620
D2 : solaire actif non vitré	830	780	710
D3 : fenêtres supplémentaires	730	690	650
Total variante 1 (A+B+C1+D1)	1'500	1'100	500
Total variante 2 (A+B+C2+D2)	1'700	1'300	700
Total variante 3 (A+B+C1+D3)	1'500	1'100	500

NB : ces chiffres sont à interpréter avec prudence. Ils sont obtenus avec des taux d'inflation, d'intérêt et de renchérissement constants, et donc avec des fonctions exponentielles évaluées sur des périodes pouvant aller jusqu'à 30 ans (interventions sur l'enveloppe du bâtiment).

Table 8.4 Surcoût de chaque intervention en tenant compte du renchérissement de l'énergie auxiliaire selon trois scénarios donnés dans le programme d'impulsion Ravel.

Ces chiffres sont à interpréter avec prudence. En outre ils ne prennent pas en considération les avantages que chaque intervention peut amener, comme l'amélioration du confort thermique avec une meilleure isolation de la maison, la qualité de l'air intérieur et la réduction des problèmes liés à l'humidité avec une ventilation contrôlée, la température moyenne de l'air intérieur plus élevée avec un système solaire actif, etc. Par ailleurs, le potentiel de réduction de l'énergie auxiliaire est certainement important avec une régulation prévisionnelle. Cette possibilité reste encore à être étudiée pour une maison chauffée avec des dalles actives.

Un « kit » solaire vitré apparaît déjà comme une solution économique pour remplacer un chauffe-eau 100% électrique. L'intervention liée à l'augmentation des fenêtres, bien que la

réduction d'énergie auxiliaire soit moindre, est comparable au niveau des coûts à celle qui fait intervenir un système solaire actif pour le chauffage. Ces interventions (solaire actif pour le chauffage et fenêtres supplémentaires) sont les plus coûteuses car ce sont aussi les dernières qui sont effectuées. Plus la consommation d'énergie d'une maison est basse, plus le coût d'une intervention visant à la réduire devient élevé relativement à l'économie d'énergie réalisable. Un système solaire actif avec dalles actives devrait pouvoir être mis en œuvre plus tôt dans la hiérarchie des interventions possibles. Des maisons avec un toit plat ont l'avantage d'offrir une surface de dalle beaucoup plus importante relativement à la surface de plancher à chauffer.

Les surcoûts calculés dans cette étude sont relativement importants, car les solutions étudiées ne permettent pas de remplacer le système de chauffage conventionnel, et donc de faire une économie sur les coûts d'investissement. Une solution alternative serait de remplacer la chaudière à mazout par un chauffage au bois. Une telle solution demande toutefois une analyse plus détaillée qui devrait permettre de pouvoir comparer un chauffage au mazout avec un chauffage au bois, aussi bien sur le plan technique, économique que de l'utilisation pratique.

Conclusion

Les réponses aux questions posées dans l'introduction de cette étude peuvent être formulées de la manière suivante :

- cette étude a montré que l'on pouvait chauffer une maison avec des dalles actives dont la surface est dimensionnée pour une émission de chaleur de 30 W/m^2 . En raison de la surface des dalles disponibles, la puissance de chauffage a dû être réduite de 8 à 5 kW, (ou, rapporté à la surface de référence énergétique, de 33 à 20 W/m^2). Ceci a impliqué une isolation plus importante de l'enveloppe du bâtiment, une réduction efficace des ponts thermiques, des fenêtres à bas coefficient de perte thermique et une ventilation contrôlée avec récupération de chaleur (voir table 6.1, chapitre 6). La surface des dalles actives représente, dans le cas étudié, les deux tiers de la surface de référence énergétique. Une question qui reste encore ouverte est :
si l'on peut disposer d'une surface de dalle active plus grande que la surface de référence énergétique, est-il encore possible de chauffer la maison sans améliorer son enveloppe et sans ventilation contrôlée ? Un tel rapport de surface est réalisable si la maison a un toit plat, de manière à avoir trois niveaux de dalles pour les deux niveaux habités. On pourrait penser que la puissance nominale de chauffage n'a pas besoin d'être réduite si, rapportée à la surface des dalles actives, elle ne dépasse pas 30 W/m^2 . Toutefois, une analyse plus poussée devrait déterminer si le confort thermique est toujours acceptable dans ces conditions (températures de surface plus basses, asymétrie des températures radiantes plus grande, etc.). Les performances du système solaire actif devraient également être ré-évaluée dans cette situation (constante de temps de la maison près de deux fois plus petite). Mais partant d'une demande de chaleur plus élevée, le potentiel de réduction de l'énergie auxiliaire de chauffage devrait être plus grand.

- le potentiel de chauffage par des capteurs solaires couplés à des dalles actives est significatif pour une maison massive comme celle qui a été simulée. Il est plus important que l'augmentation de la surface des fenêtres pour réduire l'énergie auxiliaire de chauffage.
- pour une maison à basse consommation d'énergie (demande d'énergie de chauffage de 30 kWh/m²an), les gains solaires actifs peuvent réduire la demande de chaleur de plus de deux tiers (avec 30 - 35 m² de capteurs vitrés, voir figure 7.8). Avec 15 m² de capteurs vitrés, la demande de chaleur est réduite de 40 %. La fraction solaire, dans cette situation, est pourtant de 50%. Calculée comme la fraction d'énergie solaire dans l'énergie de chauffage distribuée, elle n'est pas un paramètre approprié pour évaluer les performances du système solaire. En effet, l'énergie de chauffage distribuée est plus importante avec des capteurs solaires que sans, car la maison elle-même est utilisée comme stockage de chaleur. La température de l'air intérieur est en moyenne plus élevée, ce qui a pour conséquence d'augmenter les pertes thermiques de la maison et donc sa demande d'énergie de chauffage. Les performances du système solaire actif doivent être évaluées en fonction de la réduction de l'énergie auxiliaire, ce qui demande deux calculs différents, un avec et un sans système solaire actif.
- une liste de mesures visant à abaisser l'énergie auxiliaire a été analysée. Elle va de l'amélioration de l'enveloppe de la maison (isolation supplémentaire et meilleures fenêtres), ventilation contrôlée avec récupération de chaleur sur l'air vicié, augmentation de la surface des fenêtres ou système solaire actif couplé aux dalles actives. L'analyse de leur impact thermique et de leur coûts sont résumés dans les tables 8.2, 8.4 et le graphique 8.1. Il ne faut pas oublier que l'ordre dans lequel les mesures (ou les interventions) sont effectuées est également important sur leur performance.
- l'interaction entre les gains solaires actifs et les gains solaires passifs n'est pas négligeable, notamment par le fait qu'ils partagent le même « stockage de chaleur », la maison. Le potentiel de réduction de l'énergie auxiliaire est plus grand pour un système solaire actif si les gains solaires passifs sont plus faibles (voir figure 7.9). Il en va de même pour les gains solaires passifs relativement aux gains solaires actifs. Toutefois, leur potentiel de réduction d'énergie auxiliaire est beaucoup plus limité relativement à un système solaire actif (voir figure 7.10).

Les dernières interventions analysées, système solaire actif pour le chauffage ou augmentation des gains solaires passifs par l'augmentation de la surface des fenêtres, apparaissent comme les plus coûteuses, notamment par le fait qu'elles interviennent en dernier dans les séries des interventions envisagées. Il est cependant intéressant de noter que du point de vue économique, une intervention du type « solaire actif » est équivalente à une intervention du type « solaire passif ». Le « solaire actif » donne plus de flexibilité à l'architecture dans la mesure où la contrainte sur la surface des fenêtres à insérer dans la façade sud est levée. Avec la maison étudiée, 5 m² de capteurs vitrés, soit environ 10 m² d'absorbeurs sans vitrage, sont équivalents à 25 – 30 m² de fenêtres (cf. figure 7.10).

Pour atteindre l'indice d'énergie requis par le standard Minergie (45 kWh/m²an), il est nécessaire de pousser les interventions jusqu'au dernier niveau envisagé (système solaire actif pour le chauffage ou augmentation des gains solaires passifs). Une alternative est de

remplacer le chauffage au mazout par du chauffage au bois (voir table 8.1). (A noter que le standard Minergie exige une ventilation contrôlée dans le concept de la maison).

La mesure la plus avantageuse reste le « kit » solaire vitré pour l'eau chaude. Elle a également l'avantage de ne pas devoir venir après une autre intervention, comme l'amélioration de l'enveloppe de la maison. Ce n'est malheureusement pas le cas d'un système solaire actif couplé à des dalles actives. Dans cette étude, cette possibilité a été considérée que pour une maison satisfaisant à un niveau d'exigence élevé sur le plan de ses performances thermiques (en raison d'une surface de dalles actives limitée). Une question intéressante serait de savoir si une maison satisfaisant à la recommandation 380/1 au Tessin, disposant de suffisamment de surface de dalle, pourrait être directement équipée d'un système solaire actif couplé aux dalles actives.

Le choix entre des capteurs vitrés ou des absorbeurs solaire reste ouvert pour le chauffage. L'investissement est à peu près le même pour 15 m² de capteurs vitrés ou 20 m² d'absorbeurs solaires. Avec ces surfaces, les performances des absorbeurs sont un peu moins bonnes. Toutefois, ils peuvent être directement intégrés dans la toiture, ce qui permet d'économiser une partie de l'investissement dans le toit. Leurs performances sont plus sensibles au vent que les capteurs vitrés, mais, en revanche, ils ne posent pas de problèmes de surchauffe en été.

Références

CORNU C. (2000) Communications privées.

DRUCK H. and PAUSCHINGER T. (1994) Multiport Storage-Model for TRNSYS. Version 1.5, November 1994. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Germany.

FRAEFEL R. (1998) La maison Minergie, guide de conception. Conférence romande des délégués à l'énergie

FROMENTIN A., SUJEVS D. (1996) Comportement thermique dynamique d'une maison solaire à stockage intégré. Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, Switzerland.

Impuls Compact (1997) Ravel è conveniente. Guida pratica per i calcoli della redditività. Pubblicazioni Ravel, n° 724.397.42.01i, Ufficio federale dei problemi congiunturali, Svizzera.

- ISAKSON P. (1995) Solar Collector Model for Testing and Simulation. Final Report for BFR Project N° 900280-1; Building Services Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- KLEIN S. A. et al. (2000) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- KOSCHENZ M. and DORER V. (1996) Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling. Roomvent'96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan.
- LANGER H. (1999) Passivhausstandard im Geschosswohnungsbau, Haustechnik, Schweizer Ingenieur und Architekt n° 47, 26 November 1999, pp. 1032 – 1037.
- Norme SIA 180 (1999) Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, Suisse.
- Recommandation SIA 380/1 (1988) L'énergie dans le bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, Suisse.