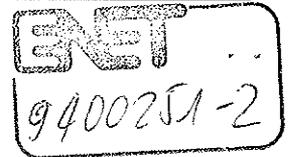




Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Recherche énergétique
Programme Solaire actif : Chaleur



Plancher Solaire Direct

du Centre d'Entretien des routes nationales de Boudry (NE)

Rapport final

MANDANT

Office fédéral de l'énergie

OFEN

Case postale

CH - 3003 Berne 3

MANDATAIRES

PLANAIR

Crêt 108A

CH - 2314 La Sagne

BSI

Primerose 27

CH - 1007 Lausanne

Rapporteurs : M. Kernen, R. Groux, C. Cornu, P. Renaud, O. Graf

Octobre 1998

ABREVIATIONS ET SYMBOLES UTILISES DANS CE RAPPORT

PSD :	Plancher solaire direct. Type d'installation solaire dans laquelle l'énergie solaire captée est distribuée sans accumulation thermique dans un système de chauffage au sol.
CEB :	Centre d'entretien des routes nationales de Boudry (NE). Bâtiment mesuré dans le cadre de ce projet.
Absorbeur :	Capteur solaire sans vitrage devant la surface absorbante (capteur solaire non-vitré). Ce type de capteur est utilisé au CEB.
Installation solaire :	Installation de captage de l'énergie solaire comprenant les capteurs (absorbeurs), les tuyaux de liaison entre capteurs et centrale de chauffage, les pompes et la régulation, les échangeurs de chaleur pour l'ECS et le chauffage.
Volume utile :	Volume ou contenance d'un silo ou d'un accumulateur réellement utilisable (tient compte du volume perdu, par exemple par la forme pyramidale du bois décheté lors du remplissage du silo)
ECS :	Eau chaude sanitaire.

Cette étude a été mandatée par l'Office fédéral de l'énergie. Sans se prononcer définitivement sur son contenu, l'Office fédéral de l'énergie en autorise la publication.

TABLE DES MATIERES

	Page
1. Situation	4
1.1 Concept énergétique	
1.2 Contexte et genèse du projet de recherche	
2. Objectifs du projet	5
3. Méthode	5
4. Description du bâtiment et de l'installation	6
4.1 Description générale	
4.2 Description du complexe de bâtiments du CEB	
4.3 Description de l'installation de chauffage, de ventilation et solaire	
4.4 Description de la régulation	
5. Concept de mesures, instrumentation et traitement des données	16
5.1 Concept	
5.2 Instrumentation	
5.3 Prise et traitement des mesures	
5.4 Vérification des mesures	
5.5 Calcul d'erreur sur le bilan énergétique	
5.6 Mesures ponctuelles de l'influence du vent sur l'installation solaire	
6. Résultats de mesure	24
6.1 Bilan énergétique des bâtiments	
6.2 Fonctionnement de l'installation solaire	
6.3 Influence du vent sur l'installation solaire	
7. Coût et rentabilité de l'installation solaire	39
8. Méthode et résultats de simulation sur le modèle du CEB	40
8.1 Méthode de simulation	
8.2 Principaux composants du modèle	
8.3 Résultats de simulation par rapport aux résultats de mesure	
9. Abaques de dimensionnement d'installations solaires de type « plancher solaire direct »	45
9.1 Méthode d'élaboration des abaques	
9.2 Paramètres pris en compte	
9.3 Résultats principaux	
9.4 Forme et utilisation des abaques	
10. Propositions d'amélioration	53
11. Conclusion	54
ANNEXES :	
A. Plan de raccordement des absorbeurs	
B. Photo des absorbeurs en façade	
C. Graphique de la course de soleil	
D. Liste des points de mesures	
E. Détail des coûts de l'installation solaire	
G. Abaques	

1. SITUATION

1.1 Contexte et concept énergétique

Tout d'abord prévu pour regrouper en un même endroit le centre d'entretien de la future autoroute N5, et, plus tard, le nouveau garage de l'Etat et la nouvelle halle cantonale d'expertise automobiles, le projet fut réduit sur décision du Grand Conseil au seul Centre d'entretien autoroutier.

En été 1994, les bâtiments du Centre d'entretien de la route nationale 5 de Boudry (CEB) ont été remis au maître de l'ouvrage, la République et canton de Neuchâtel

Selon la loi cantonale, les bâtiments propriétés de l'Etat se doivent d'utiliser l'énergie de manière rationnelle et de faire intervenir les énergies renouvelables. Il a été décidé d'installer un chauffage au bois utilisant les ressources forestières indigènes et de prendre en compte toute mesure d'économie d'énergie coûtant moins de 15 ct./kWh - prix correspondant à celui du chauffage au bois. Ainsi l'isolation thermique des bâtiments a été renforcée jusqu'à concurrence d'un coût maximum de 15 ct pour le dernier kWh économisé par une épaisseur supplémentaire ou une coupure de pont thermique. La réalisation de l'installation solaire a été décidée selon les mêmes critères.

Le chauffage par le sol du garage fut préféré aux traditionnels aérochauffeurs parce qu'un sol rayonnant est plus efficace pour sécher les châssis et assure mieux le confort des personnes que la pulsion d'air chaud.

1.2 Contexte et genèse du projet de recherche

Les installations solaires de type « plancher solaire direct » (PSD) sont connus et réalisés depuis un certain nombre d'années à l'étranger, notamment en France. En Franche-Comté (France voisine) on recense une vingtaine d'installations de type plancher solaire direct fournissant l'énergie thermique pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage de maisons individuelles. La simplicité du système par rapport à une installation de chauffage avec accumulation thermique permet des réductions de coût d'installation. Etant donné les bons résultats des systèmes installés en France ainsi que la réduction escomptée des coûts ont incité l'Office fédéral de l'énergie à soutenir un projet de recherche visant à réaliser une telle installation en Suisse et en tirer les règles de dimensionnement valables pour toute la Suisse.

Les bureaux Planair, BSI et Geilinger ont offert leurs services et ont été mandatés pour la réalisation de cette étude.

Planair s'est occupé de la mise en place du système de mesures, de l'acquisition des mesures, de leur traitement et de leur analyse.

BSI s'est occupé de l'élaboration de règles et d'abaques de dimensionnement à partir de simulations calibrées sur les mesures.

Geilinger s'est occupé du calcul des coûts ainsi que du prix du kWh solaire produit.

2. OBJECTIFS DU PROJET

Le présent projet a pour objectifs :

- la mesure, l'évaluation et l'analyse des performances du système,
- la construction, le calage et la validation, par comparaison aux mesures, d'un modèle de l'installation "plancher solaire direct" mise en oeuvre au CEB.
- l'établissement d'un modèle plus général d'installations "PSD" permettant, par étude paramétrique, l'établissement de règles et abaques de dimensionnement de telles installations en Suisse.
- le calcul des investissements et du prix de l'énergie produite,
- la proposition d'améliorations visant à une augmentation de la production d'énergie solaire et à un abaissement des coûts de l'installation.

Comme on le voit l'objectif du projet consiste à mieux connaître les performances ainsi que les coûts d'une installation de PSD et à établir une méthode de dimensionnement simple et fiable à l'usage des bureaux d'ingénieurs.

3. METHODE

La méthode retenue pour atteindre les objectifs est la suivante :

Toutes les grandeurs nécessaires à l'établissement du bilan énergétique ainsi que celles déterminantes pour l'établissement des tables et règles de dimensionnement sont mesurées sur une période de 2 ans.

Les mesures sont dépouillées et analysées pour en tirer un bilan énergétique mensuel. Les performances mensuelles et annuelles de l'installation sont alors comparées aux valeurs de projet.

Le modèle est développé en parallèle avec l'analyse des mesures et est validé avec ces dernières. Dans un premier temps, les différents composants du système sont modélisés et leur comportement simulés séparément. Dans la phase ultime, tous les éléments sont intégrés au modèle et le comportement du système entier est simulé.

Le programme de simulation HB@Multichamps, exploité ici, consiste en une description des composants de l'installation sous forme d'éléments finis plus ou moins complexes, allant de la simple conduite à l'échangeur de chaleur ou au capteur solaire. L'ensemble est animé par un fichier météo horaire d'une année et par un régulateur, gérant les enclenchements ou les réglages des composants.

Après validation et calibration du modèle complet par rapport aux mesures, des tables de dimensionnement pour des installations de même type ont été élaborées.

4. DESCRIPTION DU BATIMENT ET DE L'INSTALLATION

4.1 Description générale

Le complexe du Centre d'entretien de Boudry se compose de deux halles - l'atelier et le garage - et d'installations techniques telles que silos à sel, décrotoir et station service.

L'entretien, la réparation et le lavage des véhicules de la voirie ainsi que le stockage de matériel ont lieu dans l'atelier. Le garage quant à lui abrite les véhicules de la voirie, les bureaux, les locaux destinés au personnel et des surfaces de stockage. Les bâtiments ont été remis au maître de l'ouvrage en été 1994.

Les bâtiments du Centre d'entretien de Boudry se caractérisent par des conditions d'exploitation particulières :

Le garage destiné à l'entreposage des véhicules est maintenu à une température de 5°C. L'atelier de réparation des véhicules est quant à lui tempéré à 15°C. Le reste des locaux destiné à l'administration, est chauffé à 20°C.

Une chaudière à bois de 230 kW couvre la majeure partie des besoins de chauffage et l'appoint pour la production d'eau chaude. Elle est alimentée par du bois déchiqueté stocké dans un silo assurant une autonomie de 30 jours de chauffage. Un brûleur de secours au gaz garantit la fourniture de chaleur à tout moment.

Une installation solaire fournit de l'énergie pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage. Cette installation se compose de 100 m² de capteurs non vitrés (absorbeurs) intégrés comme éléments de la façade sud-ouest. Les absorbeurs complétés par une isolation thermique et une étanchéité, remplacent des éléments de façade.

L'énergie captée par l'installation solaire est délivrée par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur au réseau de chauffage au sol sans accumulation thermique hydraulique. Ce système est appelé « plancher solaire direct ».

4.2 Description du complexe de bâtiments du CEB

La partie chauffée du complexe se compose de 2 bâtiments distincts; le garage et l'atelier. Ces deux bâtiments ont une structure métallique de type poteaux - traverses sur laquelle des éléments de façade métallique sont fixés. Ces panneaux sont composés d'un revêtement intérieur, d'une isolation et d'une tôle d'aluminium ondulée.

Les deux bâtiments, de forme parallélépipède rectangle sont orientés parallèlement à la route nationale Neuchâtel - Yverdon, à savoir nord-est sud-ouest (dans leur plus grande longueur).

Le garage présente les caractéristiques suivantes :

- Volume total = 25'000 m³ SIA
- Surface totale de planchers = 3'500 m²
- Fonction :
 - stockage des véhicules et du matériel
 - locaux administratifs de la direction du Centre,
 - vestiaires, douches, WC, cafétéria, chambres à coucher pour le personnel du Centre.

Volume chauffé à 20°C : 2'490 m³
SRE chauffé à 20°C : 780,6 m²
Volume tempéré à 10°C : 16'176 m³
SRE locaux tempéré à 10°C : 2'441 m²

Surfaces vitrées façade NO : 62,5 m²
Surfaces vitrées zénithales : 660 m²

L'atelier présente les caractéristiques suivantes :

- Volume total = 11'000 m³ SIA
- Surface totale de planchers = 1'500 m²
- Fonction :
 - atelier de réparation et de peinture des véhicules
 - locaux de lavage des véhicules
 - locaux d'entreposage de matériel

Volume chauffé à 20°C : 124 m³
SRE chauffé à 20°C : 39,6 m²
Volume chauffé à 15°C : 7'139 m³
SRE chauffé à 15°C : 1'177 m²

Surfaces vitrées façade NE : 108,5 m² (sans protection solaire)
Surfaces vitrées façade SE : 75 m² (avec protection solaire)
Surfaces vitrées façade SO : 0 m² (façade avec capteurs solaires)
Surfaces vitrées façade NO : 54 m² (avec protection solaire)
Surfaces vitrées zénithales : 58 m²

Valeur k moyenne de l'enveloppe: 0,5 W/m² K

Des locaux souterrains abritant la chaufferie, le silo à bois, les locaux sanitaires et électriques, le canal de liaison entre les deux bâtiments principaux, ne sont pas chauffés.

4.3 Description de l'installation

L'installation de chauffage et de ventilation se compose de :

- une chaudière à bois déchiqueté,
- une installation solaire,
- un réseau de chauffage au sol,
- une accumulation d'eau chaude sanitaire,
- une installation de ventilation.

Les différentes parties de l'installation sont décrites ci-dessous (voir schéma de principe de l'installation à la page suivante).

a) Chaudière à bois déchiqueté

La chaudière à bois déchiqueté présente les caractéristiques suivantes :

- puissance nominale : 230 kW
- puissance minimale / en veilleuse : 90 / 15 kW
- combustibles : bois déchiqueté / gaz
- volume du silo : 75 m³
- volume utile du silo : environ 40 m³
- bois déchiqueté : plaquettes de bois mélangé
- gaz : gaz naturel uniquement consommé lors de panne du système d'alimentation en bois déchiqueté ou lorsque la puissance thermique soutirée est trop faible.

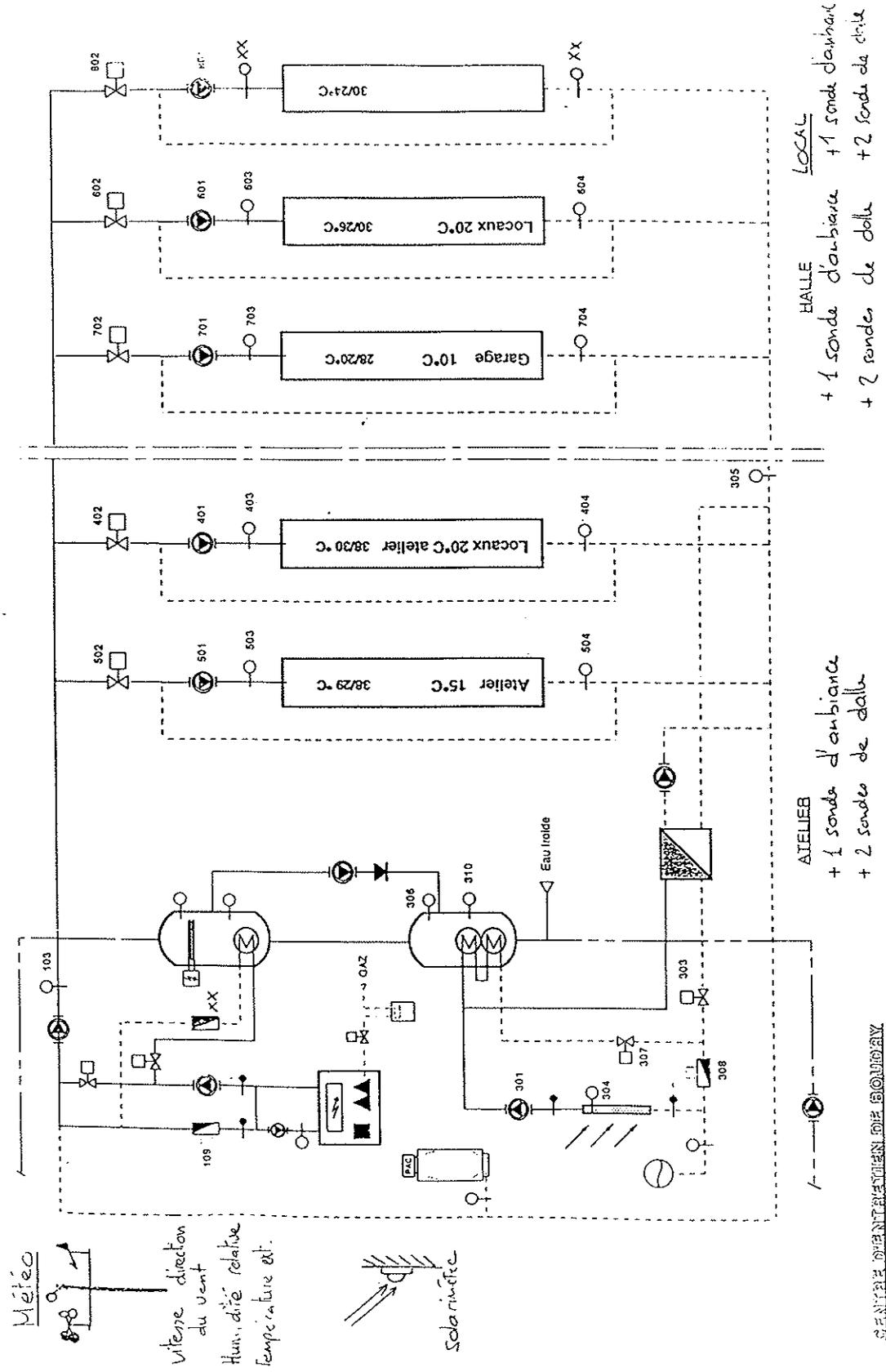


Figure 1 : schéma de l'installation de chauffage du CEB

b) Installation solaire

Les absorbeurs solaires sont intégrés dans la façade Sud-Ouest du garage du sol à l'acrotère. L'ossature est une structure de poteaux traverses couramment utilisée pour les verrières des façades vitrées ou à panneaux. Les éléments de remplissage des rectangles délimités par cette structure porteuse sont inspirés des panneaux isolants usuels (fig. 2).

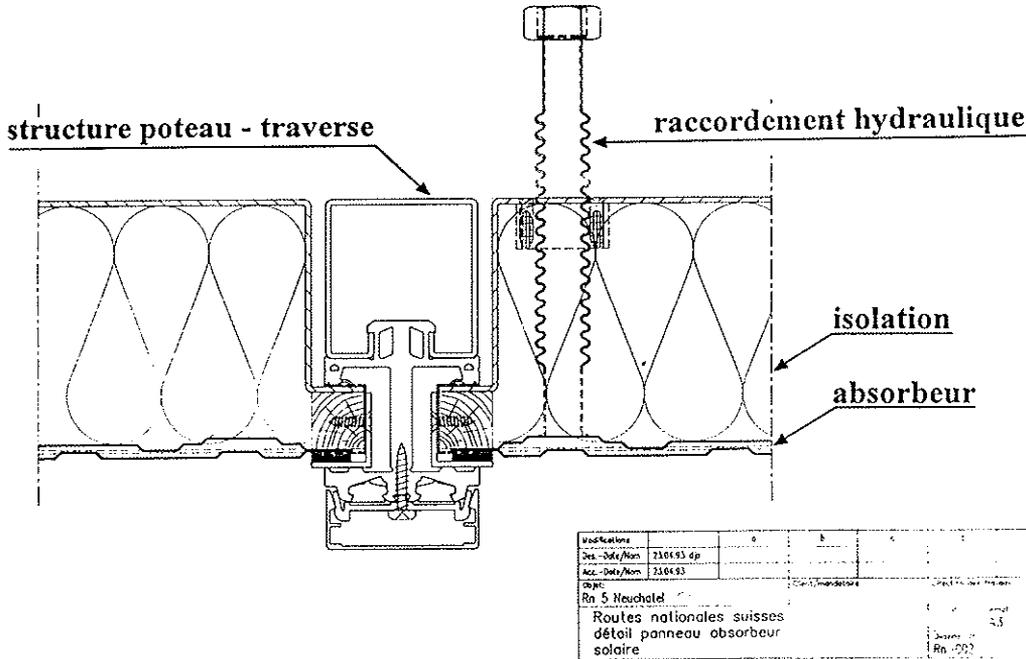


Figure 2 : détail d'un panneau absorbeur solaire intégré en façade

Le parement extérieur est simplement remplacé par le coussin absorbeur fabriqué par « Energie solaire SA ». Ce dernier est constitué de deux tôles d'acier inoxydable alvéolées et soudées formant un circuit d'eau glycolée. Sur la face externe un dépôt galvanique noir assure un effet sélectif pour un maximum d'absorption de la lumière visible avec une réémission infrarouge minimale.

Les coussins sont hydrauliquement raccordés depuis l'arrière par des tuyaux flexibles en acier inoxydables ondulés.

L'isolation du panneau (9 cm) sert autant au capteur solaire qu'à l'enveloppe du bâtiment. La bordure du panneau est pincée par un profil en caoutchouc synthétique assurant sans pont thermique les étanchéités au vent et à la pluie.

L'installation solaire présente les caractéristiques suivantes :

- type de capteurs : absorbeurs de marque Energie solaire S.A.
- nombre de capteurs : 53
- surface nette de capteurs : 102,5 m²
- raccordement : 5 colonnes en parallèle, chaque colonne comprenant 3 groupes de capteurs en série, chaque groupe comprenant 3 ou 4 capteurs en parallèle (cf. annexe A)
- emplacement : intégrés en façade SO de l'atelier (cf. annexe B)
- azimut : 40° Ouest (SO)
- élévation : 90° (verticale)

- horizon : dégagé
- ombres : les ombres, dues aux silos à sel sont peu importantes. La chaîne du Jura, par contre diminue l'ensoleillement le soir (cf. annexe C).
- liquide caloporteur : eau glycolée diluée à 40%
- débit total dans les capteurs : 3'050 l/h

c) Installation de distribution de chaleur

La distribution de chaleur se fait uniquement par chauffage au sol. La température de départ et de retour de chaque groupe est adaptée à la température des locaux chauffés.

Le chauffage au sol pour l'atelier et le garage présente de nombreux avantages :

- aucun accumulateur hydraulique de chaleur n'est nécessaire, la masse de béton des dalles faisant office de stockage. Ainsi la chaleur stockée la journée dans les dalles est restituée en partie après le coucher du soleil.
- le faible niveau de température de l'eau de chauffage possible grâce au chauffage au sol augmente le rendement de l'installation solaire.
- comparé à un chauffage conventionnel par aérochauffeurs, créant des courants d'air forcés, le chauffage au sol permet de réduire la température ambiante de 5°C. De plus, la chaleur étant distribuée par le sol, les châssis des véhicules entreposés sont rapidement déneigés et séchés et il ne se forme pas de lac d'air chaud - responsable de pertes thermiques - sous la toiture.

Le tableau ci-dessous donne des informations sur le dimensionnement des groupes.

Caractéristique	Groupe				
	Atelier	Locaux atelier	Garage	Locaux garage	Ventilation
Température de consigne du local [°C]	15°C	20°C	10°C	20°C	20°C
Température départ/ retour [°C]	38/29°C	38/30°C	28/20°C	30/26°C	30°/24° C
Puissance requise à -7°C T _{ext} [kW]	72,2	3,1	144	34,9	5,8
Débit de dimensionnement [m ³ /h]	6,9	0,295	15,5	5,0	1,5
Débit réel après équilibrage* [m ³ /h]	6,4	0,7	12,6	3,9	1,25
Longueur des serpentins de chauffage [m]	3'288	200	6'785	2'232	900**

* Une mesure du débit réel s'est faite après équilibrage des groupes

**Débit de ventilation [m³/h]

Tableau 1 : Dimensionnement des groupes de chauffage

d) Accumulation et production d'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire (ECS) est produite :

- par l'installation solaire, au moyen d'un échangeur de chaleur placé dans le bas du premier accumulateur,
- par la chaudière à bois au moyen d'un échangeur de chaleur placé dans le bas du second accumulateur,
- par un corps de chauffe électrique de 20 kW placé dans le haut du second accumulateur. Ce dernier fonctionne uniquement hors période de chauffe, lorsque la chaudière est arrêtée.

Chaque accumulateur a un volume de 2'000 litres. Lorsque la température dans le premier accumulateur est supérieure à la température dans le deuxième, une pompe permet de transférer l'eau chaude du premier dans le deuxième accumulateur. De cette manière, on assure un maximum de production solaire d'ECS.

Vu l'éloignement de certains utilisateurs d'eau chaude, une circulation est installée. La pompe de circulation se met en marche lorsque le retour de l'ECS descend en dessous de 35°C. Le retour de la circulation se fait au bas du premier accumulateur.

e) Installations de ventilation

L'atelier compte 5 installations d'extraction d'air, fonctionnant très rarement et seulement au besoin (lavage de véhicules, séchage de peinture).

Le garage compte une installation de pulsion/extraction dans la halle des véhicules et qui s'enclenche lorsque le taux de CO atteint une valeur critique. D'autre part, une installation de ventilation assure le renouvellement d'air dans toute la zone d'administration chauffée à 20°C.

Seule la dernière installation intervient dans le bilan énergétique du bâtiment. Les autres ne fonctionnent que rarement et pendant de courts laps de temps.

4.4 Description de la régulation

Le système de commande régulation des installations de chauffage et ventilation est composé de :

- 1 tableau d'électrorégulation de la chaudière à bois
- 2 tableaux d'électrorégulation (TER) autonomes pour le reste de l'installation de chauffage et ventilation
- 1 poste opérateur central équipé d'un ordinateur.

Le poste opérateur sert d'interface entre l'opérateur et les automates. Depuis ce poste, il est possible de :

- changer des valeurs de consigne,
- stocker des valeurs (mesures continues, etc.),
- transmettre des alarmes
- afficher l'état du système
- intervenir sur la marche du système.

Les fonctions de régulation importantes dans le projet de mesures sont explicitées ci-après.

a) Généralités

La température extérieure est mesurée en haut de la façade SO du bâtiment garage. La valeur mesurée par cette sonde est lissée mathématiquement (pondération avec les valeurs précédentes) pour éviter une instabilité du système par suite de trop fortes variations de valeurs de consignes des groupes de chauffage. Ces consignes sont en effet fonction de la température extérieure.

Une sonde de rayonnement solaire permet de modifier la valeur de consigne du chauffage de l'atelier. En effet, l'atelier étant fortement vitré sur sa façade NE, les gains solaires passifs permettent de réduire le chauffage lors de matinées ensoleillées.

b) Chaudière à bois

A puissance nominale, la chaudière fonctionne à 70°C/90°C. A puissance inférieure à la puissance minimale (environ 40% de la puissance nominale), la chaudière fonctionne en intermittence, passant de l'état de veille à la puissance minimale. Le maintien de la flamme en veilleuse engendre une puissance de l'ordre de 5 à 10% de la puissance nominale à évacuer. L'évacuation de la chaleur doit se faire de manière constante pour éviter un refroidissement excessif engendrant une recharge de combustible et par conséquent une surchauffe de la chaudière.

Une fonction « antisurchauffe » a été programmée pour éviter le problème et permet d'évacuer la chaleur dans la dalle active de l'atelier et, si cela ne suffit pas, également dans la dalle active du garage.

c) Distribution de chaleur

La chaudière alimente le circuit primaire à une température juste supérieure à la température du groupe de chauffage le plus exigeant. Une vanne contrôle cette température.

Pour les groupes de chauffage « atelier » et « garage » la régulation s'effectue dans le règles suivantes :

- la température de retour de la dalle active est commandée selon une température de référence.
- la première boucle de réglage ajuste la consigne de la température de départ pour obtenir la température de retour voulue (régulateur proportionnel - intégral).
- la seconde boucle de réglage agit sur la vanne d'injection pour obtenir la température de départ déterminée par la première boucle (régulateur proportionnel uniquement).

Pour les groupes de chauffage « locaux ateliers » et « locaux garage », la régulation s'effectue sur la température de départ du groupe en fonction de la température extérieure et de la courbe de chauffe.

Si la température de départ venait à être dépassée, un signal « alarme surchauffe dalle atelier » est transmis, le circulateur correspondant est arrêté et la vanne correspondante est fermée.

Une fonction « ECO » déclenche le groupe dès que la température extérieure dépasse la température de consigne du local chauffé.

Le tableau suivant présente les valeurs pour les différents groupes.

Groupe	Atelier	Locaux atelier	Garage	Locaux garage
Température de consigne	15°C	20°C	10°C	20°C
Température ECO	12°C	16°C	3°C	16°C
Température de consigne de départ par $T_{ext} = - 10^{\circ}C$ $T_{ext} = + 20^{\circ}C$		40°C 20°C		32°C 20°C
Température de consigne de retour par $T_{ext} = - 10^{\circ}C$ $T_{ext} = + 15^{\circ}C$ $T_{ext} = + 5^{\circ}C$	31 15		18 5	

Tableau 2 : Températures de consigne et d'aller/retour des groupes de chauffage

d) Installation solaire

L'installation solaire produit de l'énergie thermique qui est délivrée à l'utilisateur - chauffage ou eau chaude sanitaire - dont la température est la plus basse. Le passage d'un utilisateur à l'autre s'effectue après 2 minutes pendant lesquelles la température du nouvel utilisateur est plus basse que celle de l'utilisateur actuel.

L'utilisateur - chauffage ou ECS - est déterminé par l'ouverture des vannes 303 ou 307. Lorsqu'une vanne est ouverte, l'autre est automatiquement fermée. Les deux vannes sont fermées lorsque l'installation solaire est déclenchée.

La pompe de l'installation solaire s'enclenche dès que la différence de température entre l'eau dans les capteurs et l'utilisateur le plus bas dépasse 5°K. Elle se déclenche dès que cette valeur est inférieure à 1°K.

En cas de fort ensoleillement, les capteurs solaires peuvent fournir plus d'énergie que nécessaire. Le surplus est stocké dans la dalle atelier selon les critères suivants :

- Si la température de départ du circuit primaire est supérieure de 2 K à la température de consigne pendant 10 minutes, le groupe atelier est enclenché.
- Si cette différence descend en dessous de 2 K pendant 10 minutes, le mode accumulation est déclenché.

5. CONCEPT DE MESURES, INSTRUMENTATION ET TRAITEMENT DES DONNEES

Le concept de mesure découle directement des objectifs fixés à savoir :

- la détermination de la performance de l'installation solaire en fonction des conditions météorologiques et du bâtiment (utilisateur, régulation, etc.),
- l'établissement de règles de dimensionnement du système PSD valables pour la Suisse.

5.1 Concept pour la détermination de la performance de l'installation solaire

Le schéma de principe de l'installation de la page présente tous les points de mesures.

Les grandeurs à déterminer sont :

- l'énergie délivrée par l'installation solaire au chauffage et à l'eau chaude sanitaire,
- l'énergie délivrée par la chaudière au chauffage et à l'ECS,
- l'énergie délivrée par le corps de chauffe électrique à l'ECS,
- les relevés météorologiques.

Les grandeurs utiles à la vérification des grandeurs ci-dessus et à la compréhension du comportement du bâtiment sont :

- L'énergie consommée par chacun des groupes de chauffage,
- la quantité de bois et de gaz consommée par la chaudière,
- le fonctionnement dans la réalité de la régulation en relation avec la production et la consommation d'énergie solaire.

5.2 Instrumentation

La liste complète des points de mesure se trouve en annexe D.

a) Energie solaire

L'énergie solaire captée est mesurée au moyen d'un compteur de chaleur. La position des vannes « chauffage » et « ECS » permet de déterminer à quel utilisateur l'énergie solaire captée est délivrée.

b) Energie produite par la chaudière

Un compteur de chaleur mesure l'énergie totale produite par la chaudière. Un deuxième compteur de chaleur mesure l'énergie délivrée par la chaudière à l'eau chaude sanitaire. La différence entre ces deux compteurs de chaleur correspond à l'énergie thermique délivrée par la chaudière au chauffage.

c) Energie délivrée par le corps de chauffe électrique à l'ECS

Un compteur d'heures de fonctionnement des corps de chauffe, multiplié par la puissance électrique du corps de chauffe donne l'énergie délivrée par le corps de chauffe électrique à l'ECS.

d) Relevés météorologiques

La production solaire, ainsi que les besoins thermiques du bâtiment sont fortement dépendant des conditions météo. Les points de mesures sont :

- un pyranomètre au silicium Haenni 130 placé sur la même façade et dans le même plan que les absorbeurs solaires,
- un central météo situé sur un mat sur le décrotoir à 10,2 m au dessus du sol et 3 m au dessus du décrotoir. Les grandeurs mesurées par ce central météo sont :
 - la température extérieure,
 - l'humidité relative de l'air,
 - la vitesse du vent,
 - la direction du vent.

e) Energie consommée par chaque groupe

Les 4 groupes de chauffage au sol et le groupe pour la ventilation des locaux garage fonctionnent à débit constant et à température variable. Il s'agit donc de mesurer la température entrée/sortie du chauffage au sol en continu et le débit ponctuellement.

L'énergie consommée par chaque groupe est obtenue la multiplication du débit (constant) par la différence de température entrée/sortie.

f) Comportement de l'installation solaire

La production d'énergie solaire dépend non seulement des conditions météorologiques et des caractéristiques de captage (absorbeurs, orientation, etc.) mais également des utilisateurs de la chaleur produite (niveaux de température, évolution des besoins thermiques, etc.).

Pour mieux comprendre le comportement de systèmes les points suivants sont mesurés :

- température des capteurs,
- température d'entrée et de sortie de capteurs
- température de retour du circuit de chauffage
- température de l'ECS en bas et en haut de l'accumulateur solaire.
- Indication de l'accumulation du surplus de chaleur produite par l'installation solaire dans la dalle de l'atelier.

g) Influence du vent sur la production d'énergie solaire

Les absorbeurs étant exposés directement au vent, une mesure de l'influence du vent sur le rendement de captage s'est révélée nécessaire. Les résultats de cette étude spécifique, réalisée dans le cadre d'un travail de diplôme par un étudiant de l'Ecole d'ingénieurs de l'Etat de Vaud à Yverdon, sont présentés au chapitre 5.6 et 6.3.

5.3 Prise et traitement des mesures

Toutes les mesures, exceptés les relevés météo, sont prises par des sondes servant à la régulation et sont relevées et stockées dans l'ordinateur central du poste opérateur de la régulation des installations de chauffage et ventilation.

Toutes les valeurs sont mesurées 1 fois par minute et moyennées sur 15 minutes. La valeur moyenne est stockée pour un traitement ultérieur.

Les mesures relatives à la météo sont relevées sur l'ordinateur de surveillance météo destiné à prévenir des risques de gel sur la route. Les valeurs sont mesurées 1 fois toutes les 2 minutes et sont moyennées sur 10 minutes. Les valeurs moyennes sont stockées et sont disponibles pour un traitement ultérieur.

L'unité de temps de un quart d'heure a été estimée suffisante pour tous les phénomènes liés à la thermique du bâtiment. Une unité de temps plus courte aurait par trop alourdi le traitement des mesures (fichiers de mesure trop gros).

Les mesures stockées dans le central opérateur et dans le central météo sont transférées sur disquettes 1 fois par semaine. Les valeurs de mesures sont ensuite intégrées dans un fichier EXCEL.

Cette intégration s'est révélée beaucoup plus difficile et longue que prévue. En effet, les fichiers brutes provenant du central opérateur présentent souvent des anomalies rendant le transfert sur fichier EXCEL difficile; notamment :

- impossibilité de prendre des valeurs sur une semaine chevauchant d'un mois au mois suivant,
- pertes de valeurs mesurées
- décalages ponctuels dans le temps de prise de mesure
- prise de mesure double
- interruption temporaire de la transmission de valeurs entre les armoires de commandes et le central.

La grande majorité des valeurs est néanmoins disponible pour analyse.

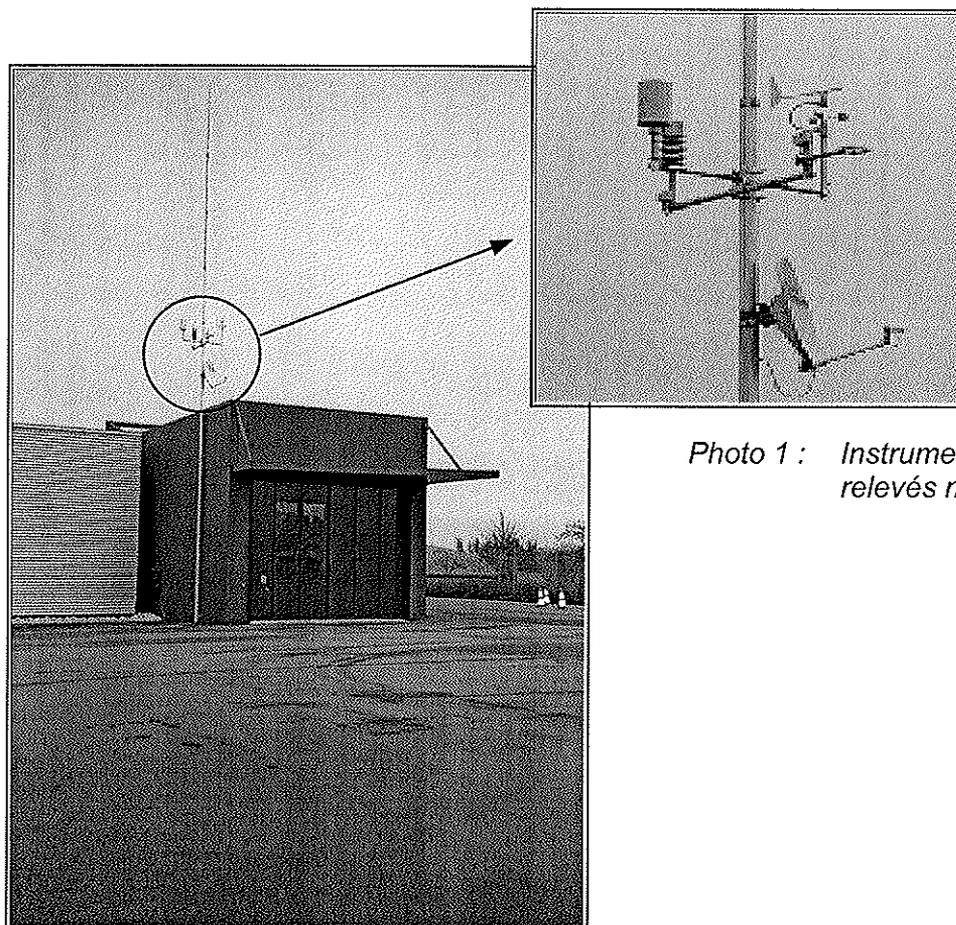


Photo 1 : Instrumentation pour les relevés météo

5.4 Vérification des mesures

La vérification des mesures suivantes ont été effectuées :

a) Bilan énergétique :

Le bilan énergétique établi grâce aux compteurs de chaleur est validé par comparaison à la somme de la consommation des groupes de chauffage et de l'ECS. Cette comparaison montre une différence se situant dans une fourchette allant de 4% à 15% suivant les semaines.

b) Débits des groupes :

Le débit de chaque groupe a été mesuré après la mise en service (mai 1995) et après l'équilibrage des groupes (février 1996).

Dans le calcul du bilan de chaque groupe, le débit est admis comme constant, quelque soit l'ouverture de la vanne à 2 voies, le débit de la pompe primaire ou l'ouverture des autres vannes. Cette hypothèse - tout à fait logique et correcte en théorie - a fait l'objet d'une série de vérifications. Le débit mesuré dans chaque groupe au moyen d'un débitmètre à ultrasons n'a pas été influencé par l'ouverture des vannes du groupe et des autres groupes ou par le débit de la pompe primaire.

L'hypothèse est donc correcte et peut être retenue pour le calcul du bilan de chaque groupe.

c) Température extérieure :

La température extérieure mesurée à 10 m de hauteur sur le mat météo a été comparée à la température moyenne mesurée à Boudry par le Service cantonal de l'énergie, et ponctuellement par des instruments calibrés. L'erreur (+ 1,5°C) a été compensée sur chaque fichier de mesure.

d) Température des locaux et des dalles

Des mesures ponctuelles ont été réalisées et n'ont pas indiqué une erreur de plus de 0,5°C. Ce résultat est suffisant pour juger du comportement de l'installation.

e) Température départ/retour des groupes de chauffage

Contrairement aux autres températures ou une précision de l'ordre de 1°C est suffisante, la différence de température départ/retour des groupes de chauffage a une influence prépondérante sur le bilan de groupe. La différence de température étant beaucoup plus importante que le niveau de température lui-même, nous avons procédé au calibrage suivant :

Après avoir vérifié le niveau de température au moyen d'un thermocouple à applique, la vanne d'injection ainsi que les vannes d'arrêt manuelles ont été fermées.

Les deux sondes de température mesurent alors la température du même flux d'eau circulant dans les dalles.

Comme le débit d'injection est nul et que les sondes se trouvent alors « avant » et « après » le circulateur, la température mesurée par les deux sondes doit être identique.

Ceci est vrai après un temps de mise à température identique des tuyaux - et si l'on néglige l'échauffement de l'eau par le circulateur. L'échauffement de l'eau par les pertes du circulateur est d'environ 0,02 K, en tenant compte d'un rendement de 0,4 et que les pertes sont intégralement transmises dans l'eau. Cette valeur étant d'un ordre de grandeur inférieur à la précision souhaitée, nous la négligeons dans ce calcul.

Le « calibrage » des sondes départ/retour de chaque groupe a été effectuée de la manière décrite ci-dessus tous les trimestres en période de chauffe.

Les constatations suivantes ont été faites à ces occasions :

- la dérive dans le temps des sondes les unes par rapport aux autres est minime,
- la différence de mesure se situe entre 0,2 K et 0,5 K.

Pour le calcul d'erreur, nous prendrons la deuxième valeur.

f) Mesure de l'ensoleillement

La mesure de l'ensoleillement dans le plan des absorbeurs a fait l'objet d'une vérification au moyen d'un solarimètre d'une précision de $\pm 3\%$ préalablement calibré à l'institut suisse de météorologie de Payerne. La mesure comparative sur une journée montre un écart de 5% entre les 2 appareils; l'appareil de référence ayant la valeur la plus basse. De plus, les valeurs mensuelles ont été comparées aux valeurs données par le logiciel Meteonorm 95 dans la même situation que la solarimètre.

5.5 Calcul d'erreur sur le bilan énergétique

a) Bilan énergétique avec compteurs de chaleur

Bilan: $Q_{\text{chauffage}} = Q_{\text{compteur chaudière}} - Q_{\text{compteur ECS}} + Q_{\text{compteur solaire}}$

Erreur totale : Erreur chauffage = \sum erreurs absolues sur les compteurs.

L'erreur relative (en % de la valeur mesurée) étant la même pour chaque compteur (= $\pm 2\%$ sur la mesure du débit par le débitmètre et $\pm 0,3\%$ sur la lecture selon le fabricant), l'erreur relative totale est égale à $\pm 2,3\%$ de la valeur totale. Cette valeur nous semble faible compte tenu des diverses sources d'imprécision possible dans la réalité dont :

- la valeur exacte de la chaleur massique c [J.kg/K] du mélange d'eau glycolée,
- l'emplacement du débitmètre et des sondes de température,
- le débit de l'eau de chauffage chargée en particules.

La mesure ponctuelle avec un débitmètre à ultrasons a montré une différence de 8% par rapport à la mesure du débit du compteur de chaleur. Etant donné l'imprécision du débitmètre à ultrasons, il est difficile de déterminer l'erreur des compteurs de chaleur eux-mêmes. Néanmoins, une erreur relative de $\pm 5\%$ nous semble raisonnable.

Pour la période du 1^{er} juin 1995 au 31 mai 1996, la consommation totale d'énergie thermique est de : $177'779 \pm 5\% = 178'000 \pm 9'000$ kWh.

5.6 Mesures ponctuelles de l'influence du vent sur l'installation solaire

Des mesures ponctuelles de vent ont été effectuées par M. Renoult dans le cadre de son travail de diplôme de l'Ecole d'ingénieurs de l'Etat de Vaud, section génie thermique. Ces mesures, effectuées en juin et en novembre 1996 sur plusieurs semaines, avaient pour objectif de déterminer l'influence du vent sur le rendement de l'installation solaire.

L'instrumentation utilisée dans le cadre de ces mesures est :

- trois anémomètres, un dans chaque direction (vent vertical, vent latéral, vent face à la paroi). Ils sont placés à trois centimètres de l'absorbeur situé au centre de la paroi - en dehors de la couche limite thermique et aérodynamique mais assez proche de la paroi pour mesurer les flux d'air. La plage de mesure de ces appareils va de 0,4 m/s à 40 m/s avec une précision annoncée de $\pm 1\%$ de la valeur finale.
- Un thermocouple à applique placé sur la surface extérieure de l'absorbeur situé au centre de la paroi.
- Une sonde thermo-hygrométrique pour la mesure de la température et du taux d'humidité ambiante.
- Un pyranomètre calibré par l'institut suisse de météorologie de Payerne.
- Un acquisateur de données permettant de stocker environ 10'000 valeurs.

Les mesures sont acquises toutes les 3 secondes puis moyennées sur 2 minutes.

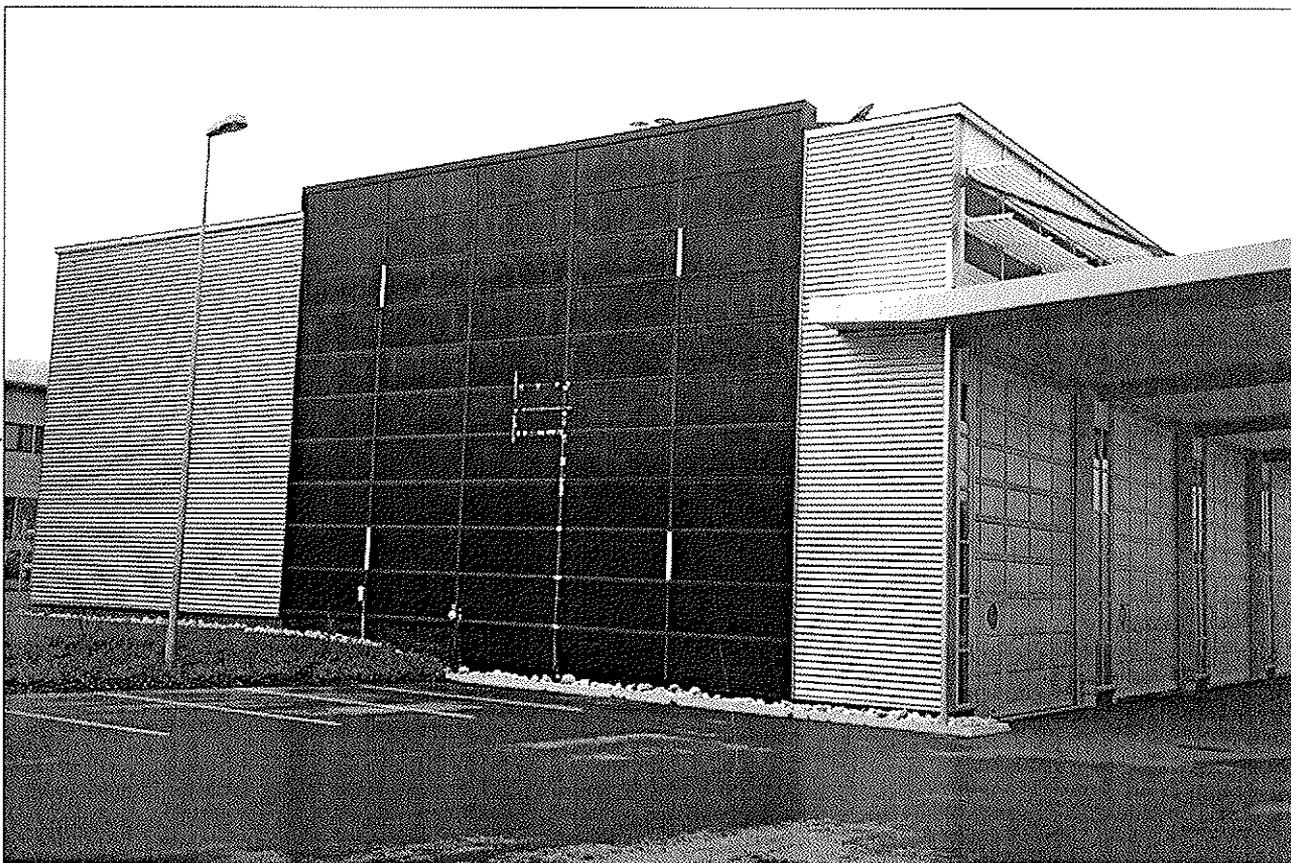


Photo 2 : Façade d'absorbeurs et emplacements des sondes (anémomètres et thermocouple sur l'absorbeur central, pyranomètre et thermo-hygromètre sur le troisième absorbeur de la première rangée).

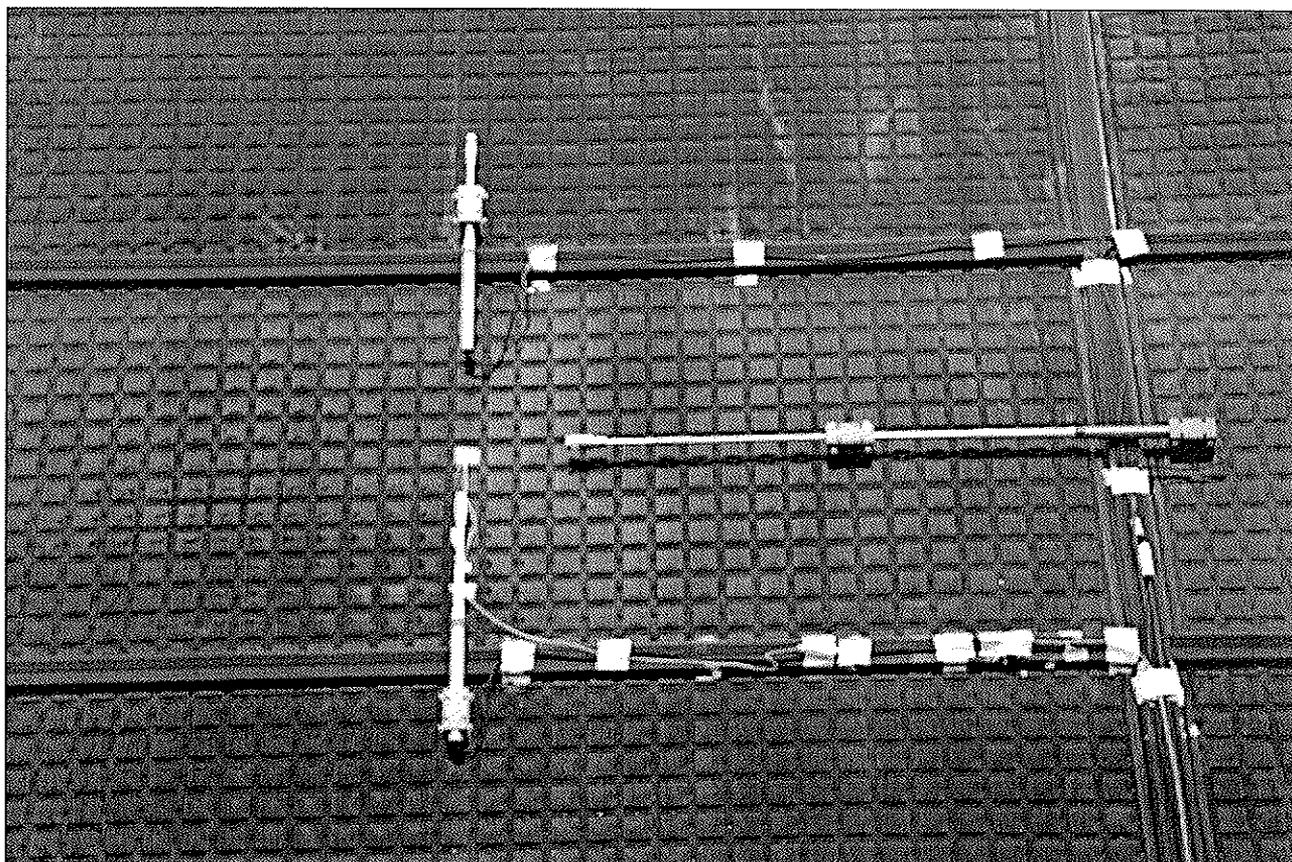


Photo 3 : Détail du placement des anémomètres sur l'absorbeur central

6. RESULTATS DE MESURE

Les résultats de mesure de deux années complètes allant du 1^{er} juin 1995 au 31 mai 1996 et du 1^{er} juin 1996 au 31 mai 1997 sont présentés ci-dessous.

6.1 Bilan énergétique des bâtiments

a) Période de chauffe

	Période du 1 ^{er} juin 95 au 31 mai 96	Période du 1 ^{er} juin 96 au 31 mai 97
Enclenchement de la chaudière à bois :	27 octobre 95	25 septembre 96
Déclenchement de la chaudière à bois :	22 avril 96	12 mai 97
Nombre de jours de chauffage :	179 jours	230 jours
Nombre de jours de chauffage 12/20 du 1 octobre au 30 avril (Neuchâtel) selon la norme SIA 381/2 :	196 jours	196 jours
Nombre de degrés-jours 12/20 mesurés :	2'809 DJ	/
Nombre de degrés-jours 12/20 mesurés par le Service cantonal de l'énergie du 1 octobre au 30 avril (Neuchâtel) :	2'769 DJ	2'927 DJ
Nombre de degrés-jours 12/20 du 1 octobre au 30 avril (Neuchâtel) selon la norme SIA 381/2 :	3'204 DJ	3'204 DJ

Les deux périodes de chauffe 1995-1996 et 1996-1997 ont donc été relativement clémentes (à Neuchâtel 2'769 DJ resp. 2'927 DJ, en comparaison des 3'204 DJ de la norme SIA 381/2); la température extérieure restant la plupart du temps légèrement au-dessus de 0°C à cause des stratus persistants, notamment pendant les mois de décembre, janvier et février 1996 ainsi que les mois de décembre 1996 et janvier 1997.

b) Consommation énergétique de chauffage globale des bâtiments

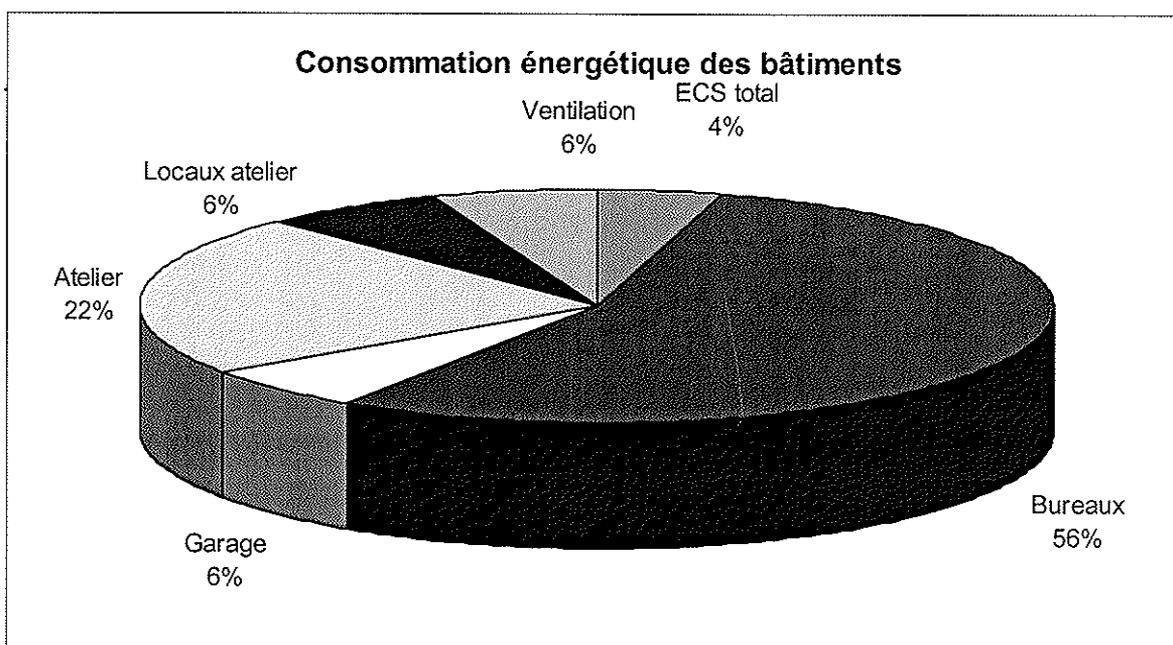


Figure 3 : Consommation d'énergie de chauffage et pour l'eau chaude sanitaire

Cette figure appelle les commentaires suivants :

- Garage : les bureaux du garage, chauffés à 20°C, consomment plus de la moitié de l'énergie du complexe de bâtiments (en comptant la ventilation des bureaux). Le garage lui même, malgré son volume très important, ne consomme que 6% de l'énergie totale.

Cette anomalie est expliquée au paragraphe c de ce chapitre.

- Atelier : l'atelier consomme un peu plus du quart de l'énergie totale consommée. Cette valeur est faible en raison principalement de la température ambiante du bâtiment (15 à 16°C dans la majeure partie du volume).
- Eau chaude sanitaire : l'eau chaude sanitaire compte pour 4% du total, ce qui correspond en moyenne à une consommation de 900 kWh/mois.

L'indice de dépense d'énergie de chauffage pour l'ensemble des bâtiments est présenté ci-dessous :

	Période du 1 ^{er} juin 95 au 31 mai 96	Période du 1 ^{er} juin 96 au 31 mai 97
Consommation totale pour le chauffage :		
- chauffage au bois :	171'917 kWh	171'250 kWh
- solaire :	<u>5'862 kWh</u>	<u>5'113 kWh</u>
Total :	177'779 kWh	176'363 kWh
	= 178'000 ± 9'000 kWh	= 176'000 ± 9'000 kWh
	= 640'000 ± 32'000 MJ	= 634'000 ± 32'000 MJ
Indice de dépense énergétique brut :	= 640'000 / 4'438 = 144 ± 7 MJ/m ² an	= 634'000 / 4'438 = 143 ± 7 MJ/m ² an
Indice de dépense énergétique pondéré :	= 144 * 3'204 / 2'769 = 167 ± 7 MJ/m ² an	= 143 * 3'204 / 2'927 = 156 ± 7 MJ/m ² an

Ces valeurs basses sont dues en partie à l'isolation soignée du bâtiment (façades et fenêtres) et à la température ambiante basse dans le garage et l'atelier (10°C resp. 15°C). A noter que, malgré une période de chauffe plus longue et un nombre de degrés-jour plus élevé, l'indice de dépense énergétique pondéré de la seconde période est environ 7% plus bas que durant la première période. Cet écart est dû en grande partie à un ensoleillement plus élevé en février et mars 1997 contrairement à 1996.

La figure ci-dessous montre la signature énergétique globale des bâtiments. Les semaines de démarrage et d'arrêt de la chaudière n'ont pas été considérées ici. La période du 21 au 31.1.1996 a été éliminée car un rééquilibrage de tous les groupes de chauffage suivi d'essais de modification des débits ont été effectués durant cette période. La signature énergétique de cette semaine n'est pas représentative.

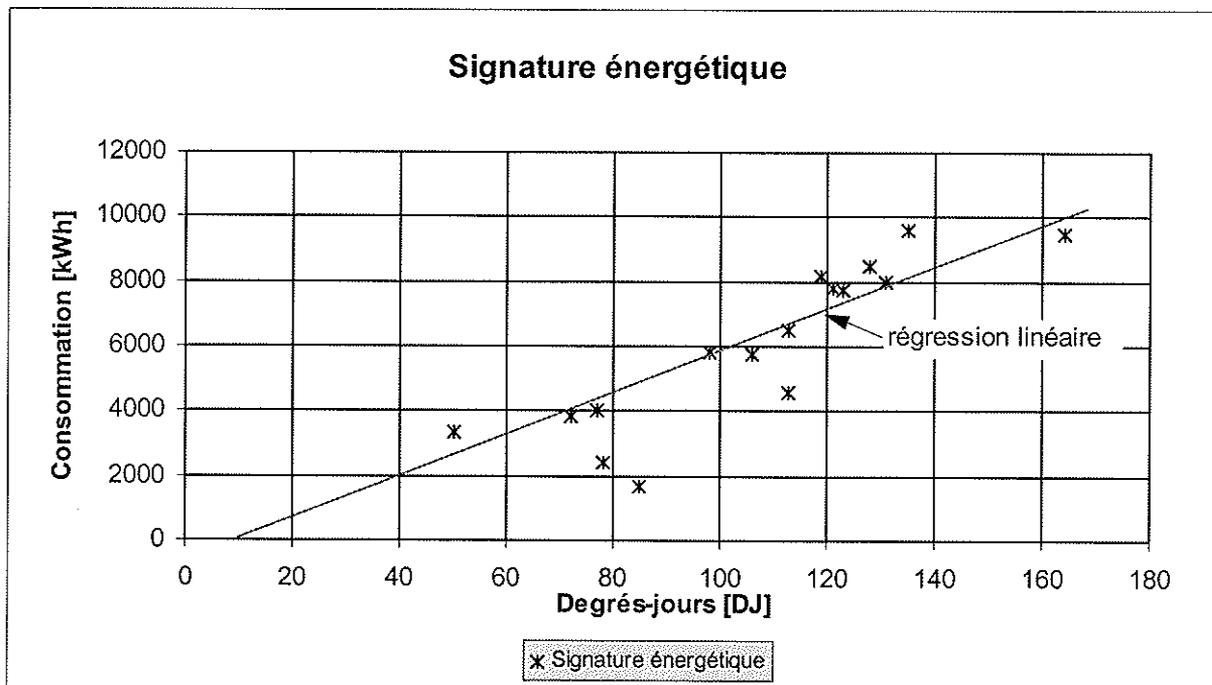


Figure 4 : signature énergétique des bâtiments du CEB

Cette figure appelle les commentaires suivants :

- Les 3 points sensiblement en dessous de la droite de régression linéaire sont des semaines fortement ensoleillées; ce qui n'est pas le cas des autres semaines.
- Les autres points sont relativement bien alignés autour de la droite de régression linéaire. Le facteur de corrélation des points est de 0,90 en tenant compte de 3 points des semaines fortement ensoleillées et 0,95 sans ces points.

Il ressort que les bâtiments sont relativement sensibles à l'ensoleillement et peu sensibles au vent. L'analyse de la prochaine année de mesure permettra une analyse plus poussée du comportement des bâtiments.

c) Bilan énergétique du garage et des bureaux du garage

Dans le décompte global des consommations de chaleur, le garage, tempéré à environ 10°C, n'a consommé que 6% environ de l'énergie de chauffage totale des bâtiments du CEB, alors que sa surface de référence énergétique représente le 55% de la SRE totale. Dans le même temps, les bureaux ont, selon le décompte des consommateurs de chaleur, consommé le 62% de l'énergie totale pour un SRE représentant 17% du SRE total.

L'indice de dépense d'énergie de la partie bureaux s'élève à :

$$IDE = \frac{403'000}{780} = 517 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

Outre le fait que les bureaux sont maintenus à 21-22°C, ce résultat surprenant peut s'expliquer comme suit :

- la partie de bureaux du garage est isolée du garage lui-même (maintien à 10°C) par un mur de 20 cm en béton sans isolation complémentaire et en partie par un vitrage,
- la dalle de chauffage des bureaux n'est pas séparée thermiquement de la dalle du garage. Un flux de chaleur est transmis de la dalle des bureaux à la dalle du garage. La mesure de la température de la dalle du garage confirme cette hypothèse: le bord de la dalle du garage présente pendant la période de chauffe a une température d'environ 5°C supérieure à celle du milieu de la dalle.

Le calcul de transmission thermique à travers la paroi de séparation montre une déperdition de 10 kW tout au long de la période de chauffe. Avec cette correction, mais sans tenir compte de l'effet de la dalle et de l'ouverture des portes entre les deux parties du bâtiment, l'indice de dépense énergétique est de :

$$IDE = \frac{403'000 - 155000}{780} = 318 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

$$IDE_{\text{pondéré}} = 318 \cdot \frac{3'204}{2'769} = 368 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

Cette valeur, au dessus de la valeur-limite selon SIA 380/1 est plus haute qu'en réalité pour les raisons expliquées plus haut. Il est néanmoins très difficile d'estimer la valeur réelle. L'indice de dépense énergétique du garage s'élève à

$$IDE = \frac{41'900 + 155000}{2'441} = 80 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

$$IDE_{\text{pondéré}} = 80 \cdot \frac{3'204}{2'769} = 93 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

Cette valeur est plus basse qu'en réalité pour les raisons expliquées plus haut.

d) Bilan énergétique du bureau atelier et de l'atelier

Le bureau ne représentant qu'une partie modeste de l'atelier et ses locaux n'étant pas isolés de la partie atelier tempéré à 15°C, nous analyserons ici le bâtiment atelier dans son ensemble.

L'indice de dépense énergétique pondéré de l'atelier s'élève à

$$IDE_{\text{pondéré}} = \frac{191'000}{1'216} \cdot \frac{3'204}{2'769} = 181 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$$

Cette valeur, relativement basse, peut s'expliquer comme suit :

- La température de la majorité du bâtiment est maintenue à 15° - 16°C.
- L'isolation de l'enveloppe est bonne.

e) Apports solaires passifs aux bâtiments

Les mesures effectuées dans ce projet ne permettent pas d'évaluer précisément des apports solaires passifs aux bâtiments du CEB. En effet, l'instrumentation nécessaire à cette mesure - solarimètre horizontal, mesures de température à divers endroits des bâtiments - n'a pas été prévue car cet aspect dépasse le cadre de ce mandat.

Néanmoins, les mesures montrent que, les jours ensoleillés d'hiver, (cf. figures 7, 8 et 9) :

- suite à l'élévation de la température extérieure et aux apports solaires passifs, la chaudière se met en veilleuse,
- l'installation solaire fournit de l'énergie au chauffage,
- les groupes de chauffage délivrent de l'énergie au chauffage au sol,
- la température dans l'atelier et dans le garage s'élève parallèlement à la température extérieure,
- la chaudière se remet en marche en fin d'après-midi.

Le même scénario se produit lors des jours d'hiver peu ou pas ensoleillés (excepté la production solaire).

Une approche plus théorique, fondée sur les valeurs d'ensoleillement selon Meteonorm 95 est présentée ci-dessous. Il faut distinguer ici les deux bâtiments, l'atelier et le garage, aux caractéristiques différentes :

L'atelier possède de grandes surfaces vitrées sur sa façade NE - 108,5 m² - sur sa façade SE - 75 m² - et en toiture (zénithale) 58 m².

La façade NE, n'est ensoleillée que pendant 1 heure le 21 décembre et pendant 4 heures le 21 septembre et 21 mars. La contribution au chauffage de cette façade en hiver est donc modeste.

La façade SE est fortement ensoleillée en hiver (cf. tableau 3). La grande majorité des vitrages étant située juste en dessous de la toiture, l'énergie solaire passive n'échauffe que la couche supérieure d'air et contribue que faiblement au confort et au chauffage de l'atelier.

Le vitrage zénithal, conçu pour un apport de lumière naturelle, est faiblement ensoleillé en hiver. De plus, la valeur de transmission globale de l'énergie incidente (valeur g) du vitrage étant faible, le vitrage zénithal ne contribue que faiblement au chauffage de l'atelier.

Le garage possède quant à lui une très grande surface vitrée zénithale et une cage d'escaliers entièrement vitrée en façade NO.

Le même commentaire sur la contribution de vitrage zénithal en hiver que celui de l'atelier peut être fait.

La contribution de la surface vitrée de la cage d'escaliers est difficilement quantifiable puisque cette cage d'escaliers est située à l'extérieur du bâtiment.

Le tableau ci-dessous présente les apports solaires passifs aux 2 bâtiments; les calculs sont basés sur l'ensoleillement dans le plan des surfaces vitrées selon Meteonorm 95 avec des coefficients de transmission globale de l'énergie incidente de 50% pour les vitrages verticaux et de 20% pour les vitrages zénithaux (valeur selon ASHRAE tenant compte du matériau du vitrage et de la hauteur du puits de lumière).

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Total octobre - mars
Atelier							
- NE	1'060	490	420	530	840	1'440	
- SE	820	490	450	520	700	960	
- zénithal	720	360	280	340	550	970	= 11'940
Garage							
- SO	2'150	1'690	440	380	1'840	2'530	
- Zénithal	8'180	4'090	3'170	3'830	6'200	11'090	= 36'560

Tableau 3 : Apports solaires passifs aux bâtiments selon Meteonorm 95

Selon cette approche, les apports solaires passifs représentent environ le 20 % des besoins en énergie de chauffage du bâtiment atelier et environ le 25% du bâtiment garage.

Néanmoins, les remarques faites précédemment sur l'utilisation de l'énergie captée par les vitrages restent valables : L'énergie captée par les vitrages zénithaux ainsi que par les vitrages SE de l'atelier sert principalement à échauffer la couche d'air sous le plafond de l'atelier et ne contribue que peu au chauffage des bâtiments.

En résumé, nous estimons à environ 15% l'apport solaire passif aux bâtiments du CEB durant la période de chauffe.

6.2 Fonctionnement de l'installation solaire

a) Généralités

La figure ci-dessous présente le pourcentage de couverture solaire des besoins thermiques des bâtiments du CEB.

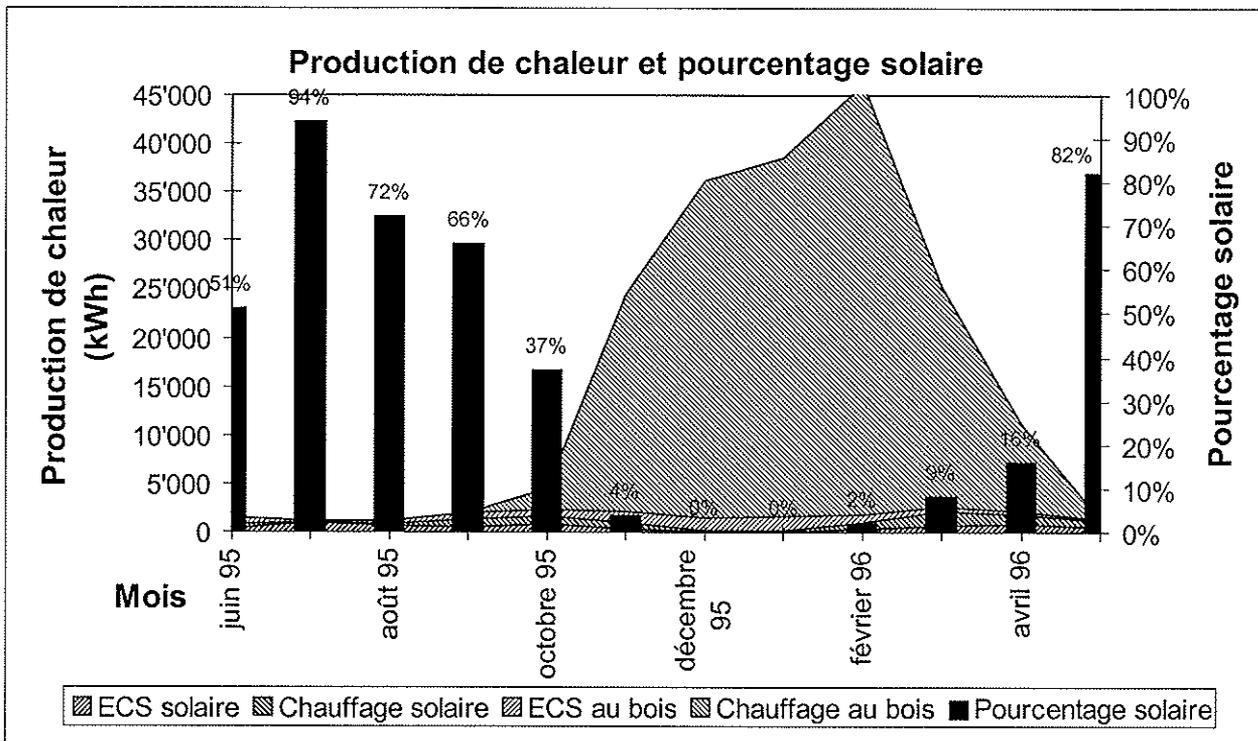


Figure 5 : Consommation d'énergie thermique et pourcentage solaire durant la période 1995-1996

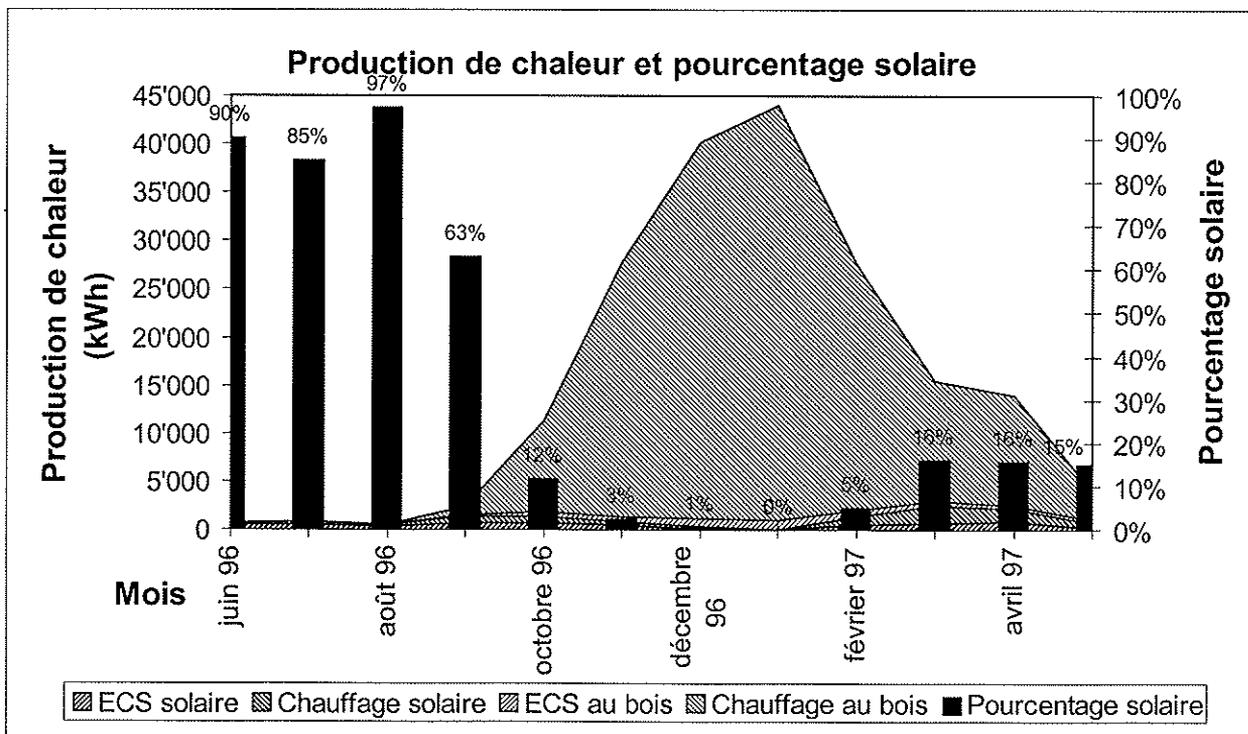


Figure 6 : Consommation d'énergie thermique et pourcentage solaire durant la période 1996-1997

On constate que, durant les périodes du 1.6.95 au 31.5.96 et du 1.6.96 au 31.5.97 :

- L'installation solaire fournit 7% de l'énergie thermique totale (12'929 resp. 12'782 kWh), ce qui correspond à une production solaire de: 126 resp. 125 kWh/m².
- Hors période de chauffe, ce pourcentage s'élève à 71% (6'371 kWh 1^{ère} période, 8'549 kWh 2^{ème} période). Une partie de cette production solaire est utilisée à la production d'eau chaude sanitaire (55% de la production solaire) alors que le reste est dissipé dans les locaux, pour éviter une surchauffe de l'installation.
- En période de chauffe, le pourcentage solaire s'élève à 3,5% pour la 1^{ère} période (6'558 kWh) et 7%, pour la 2^{ème} période (8'549kWh) dont environ 2/3 pour le chauffage et 1/3 pour la production d'ECS.

Ces constatations amènent les commentaires et explications suivants :

- Le pourcentage de couverture solaire global est inférieur à celui projeté (7% au lieu de 10%). La production solaire annuelle par m² est basse :
- Les mois de décembre et janvier pour les deux périodes ont été particulièrement peu ensoleillés (ensoleillement très inférieur à celui de Meteonorm) alors que les autres mois ont été normalement ensoleillés.
- Durant une partie de la première période de chauffe, et par suite d'une mauvaise régulation de la circulation d'ECS, l'accumulateur d'ECS a été brassé avec de l'ECS revenant à relativement haute température, réduisant notablement la possibilité de préchauffage d'ECS. La circulation n'a pas pu être éliminée car certains consommateurs se trouvent en grande distance de la chaufferie, mais la température de déclenchement de la pompe de circulation a été abaissée au maximum (35°C) pour éviter le retour d'ECS chaude dans les accumulateurs.

Les figures suivantes présentent le comportement de l'installation solaire durant un jour d'hiver ensoleillé et durant une semaine entière.

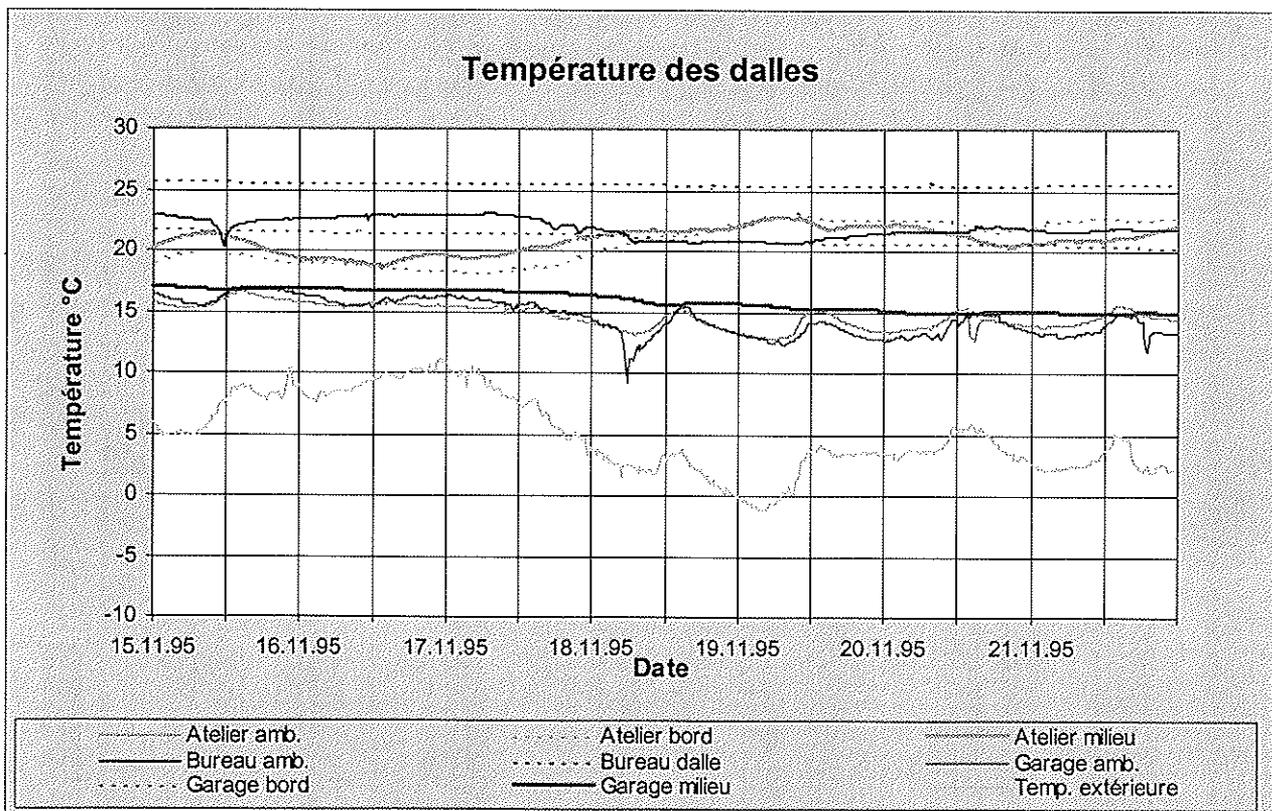


Figure 7 : Température ambiante et des dalles de chauffage au sol

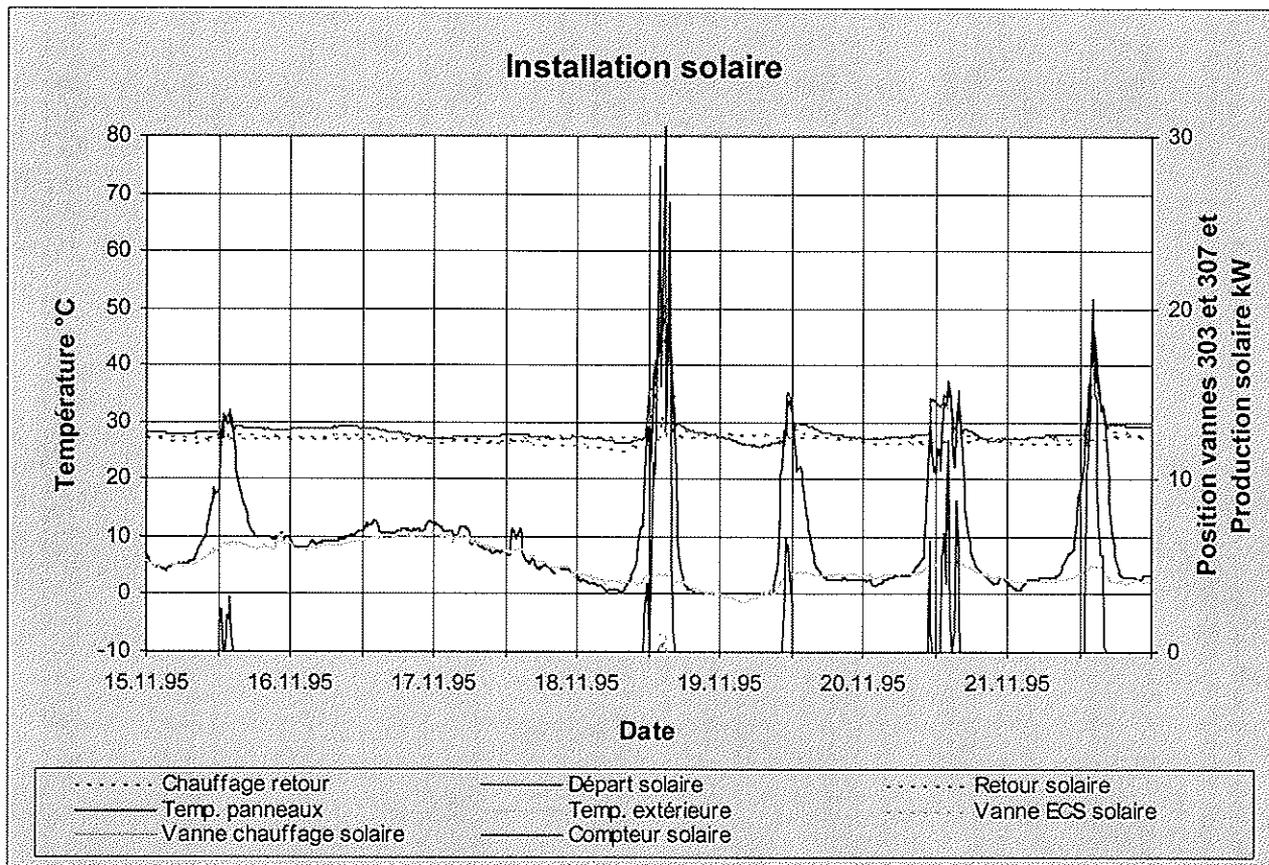


Figure 8 : Fonctionnement de l'installation solaire

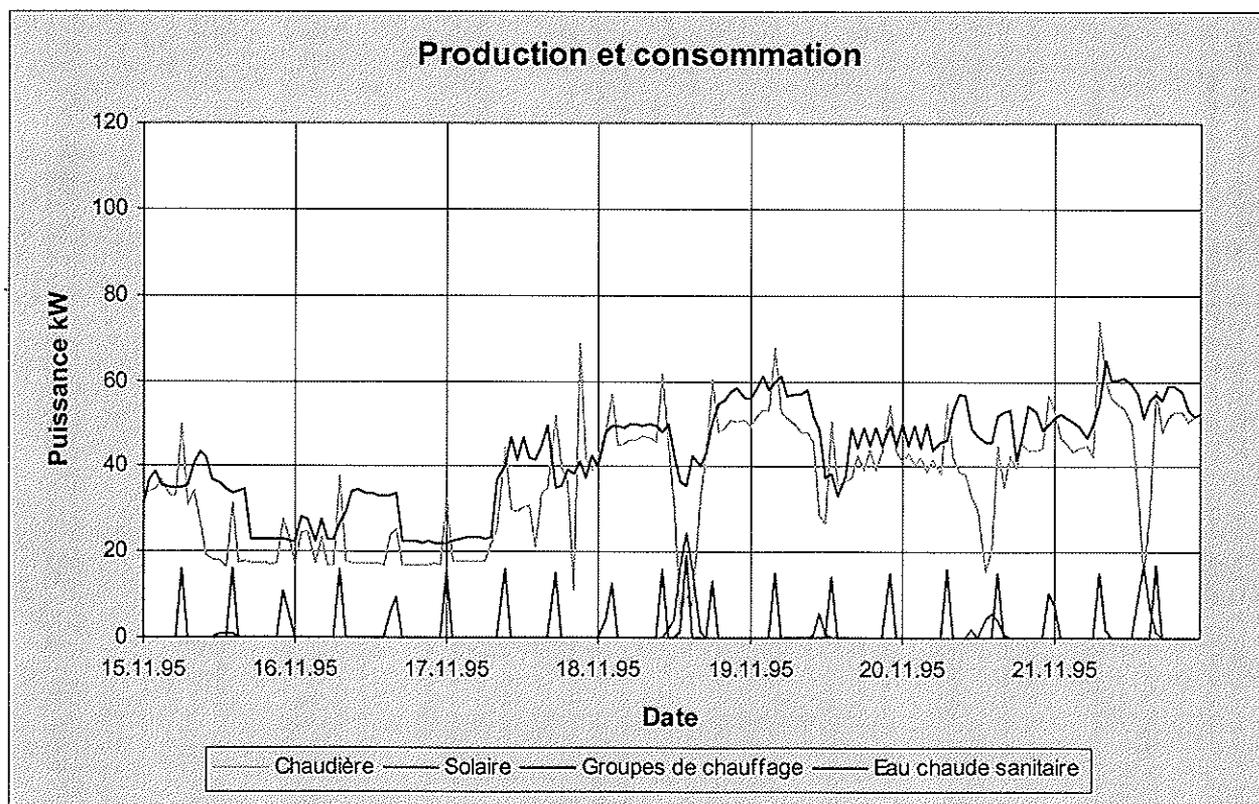


Figure 9 : Production et consommation d'énergie thermique

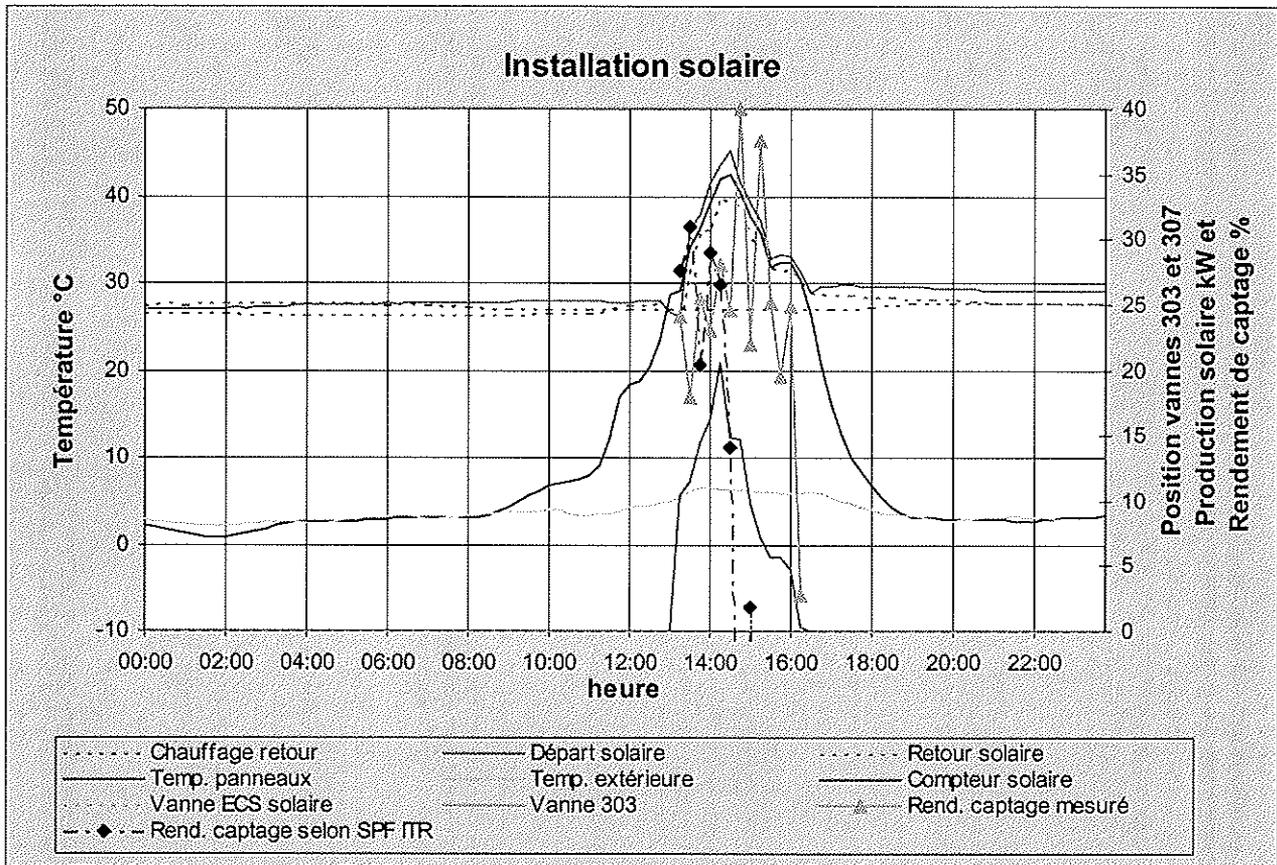


Figure 10 : Fonctionnement de l'installation solaire le 21.11.1995

Ces figures ainsi que l'analyse des autres semaines amènent les commentaires suivants :

- L'installation solaire fournit l'énergie solaire captée au consommateur le moins chaud. En hiver, le retour de chauffage est en général plus froid que l'accumulateur d'ECS,
- l'installation solaire réagit très vite à un changement d'ensoleillement,
- la température de l'énergie délivrée peut s'élever à 40°C lors de journées d'hiver (température extérieure voisine de 0°C) ensoleillées, et jusqu'à 60°C lors de journées d'été,
- le vent influence fortement le rendement de captage.

Le rendement de captage ainsi que l'influence du vent fait l'objet du chapitre suivant

6.3 Influence du vent sur le rendement de l'installation solaire

L'influence du vent sur le rendement de l'installation solaire fait l'objet du présent chapitre. Il a été étudié de deux manières :

1. Analyse de l'influence du vent local (mesuré par la station météo) sur le rendement de captage moyenné sur ¼ d'heure
2. Analyse du vent en surface et corrélation avec le vent local mesuré par la station météo.

Analyse avec les rendements moyennés sur ¼ d'heure ou sur la durée totale de production solaire

La figure ci-dessous présente le rendement moyen de captage de chaque jour avec production solaire ainsi que la droite de rendement mesuré au Solartechnik Prüfung Forschung de l'Interkantonales Ingenieurschule de Rapperswil (SPF ITR).

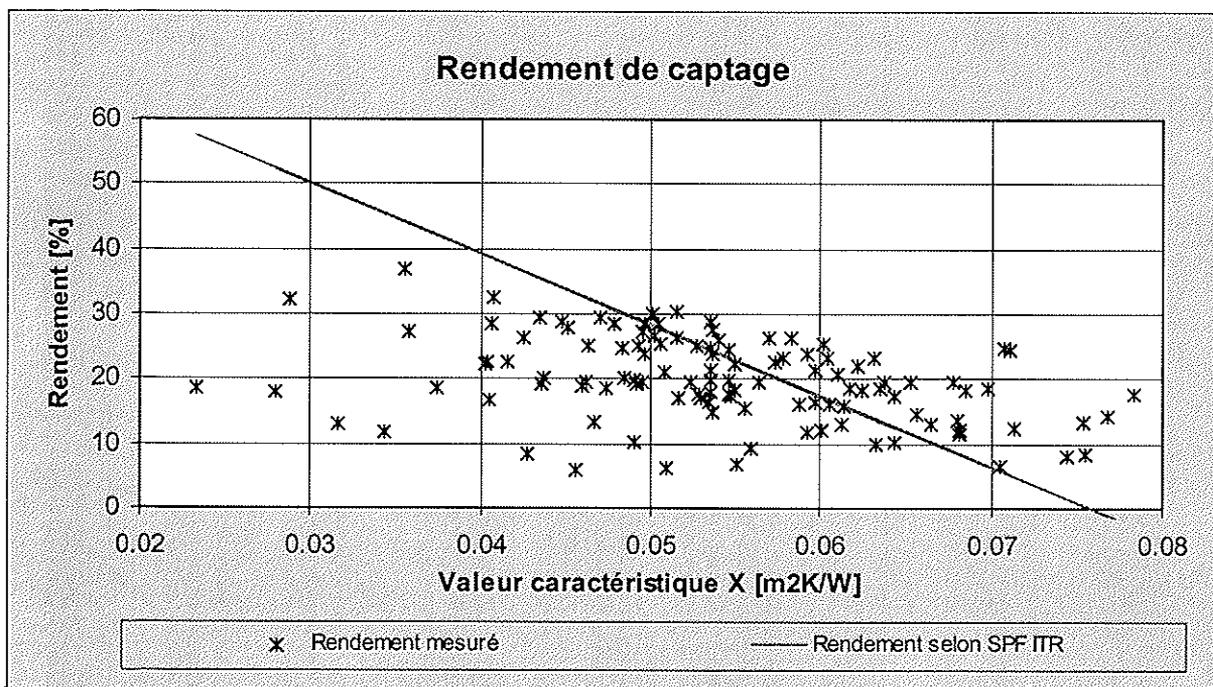


Figure 11 : Rendements de captage mesurés et selon SPF ITR

Les rendements mesurés ainsi que les valeurs caractéristiques X sont une moyenne sur toute la durée de production solaire (et non pas une valeur instantanée), et ce, pour chaque jour où une production solaire a eu lieu.

On remarque :

- Une importante dispersion des points,
- une tendance de la valeur X moins forte sur le rendement que selon SPF ITR. Par de mauvaises conditions climatiques (ensoleillement faible, température extérieure basse), les mesures montrent un rendement nettement supérieur à celui selon SPF ITR, alors que par bonnes conditions météorologiques, le rendement mesuré est en général inférieur à celui selon SPF ITR,
- le vent a une influence très forte sur le rendement de captage; ainsi tous les points fortement sous la ligne de rendement selon SPF ont été mesurés lors de jours de fort vent (20 à 30 km/h). Tous les points en dessus de la ligne de rendement selon SPF ITR

ont été mesurés lors de jours de vent faible (< 5 km/h) respectivement modéré mais du N - NE (protection des absorbeurs par le bâtiment).

Les figures suivantes présentent le rendement de captage mesuré et celui selon SPF ITR d'un jour d'été avec un vent modéré (10 km/h) et un jour d'été avec un vent fort (40 km/h).

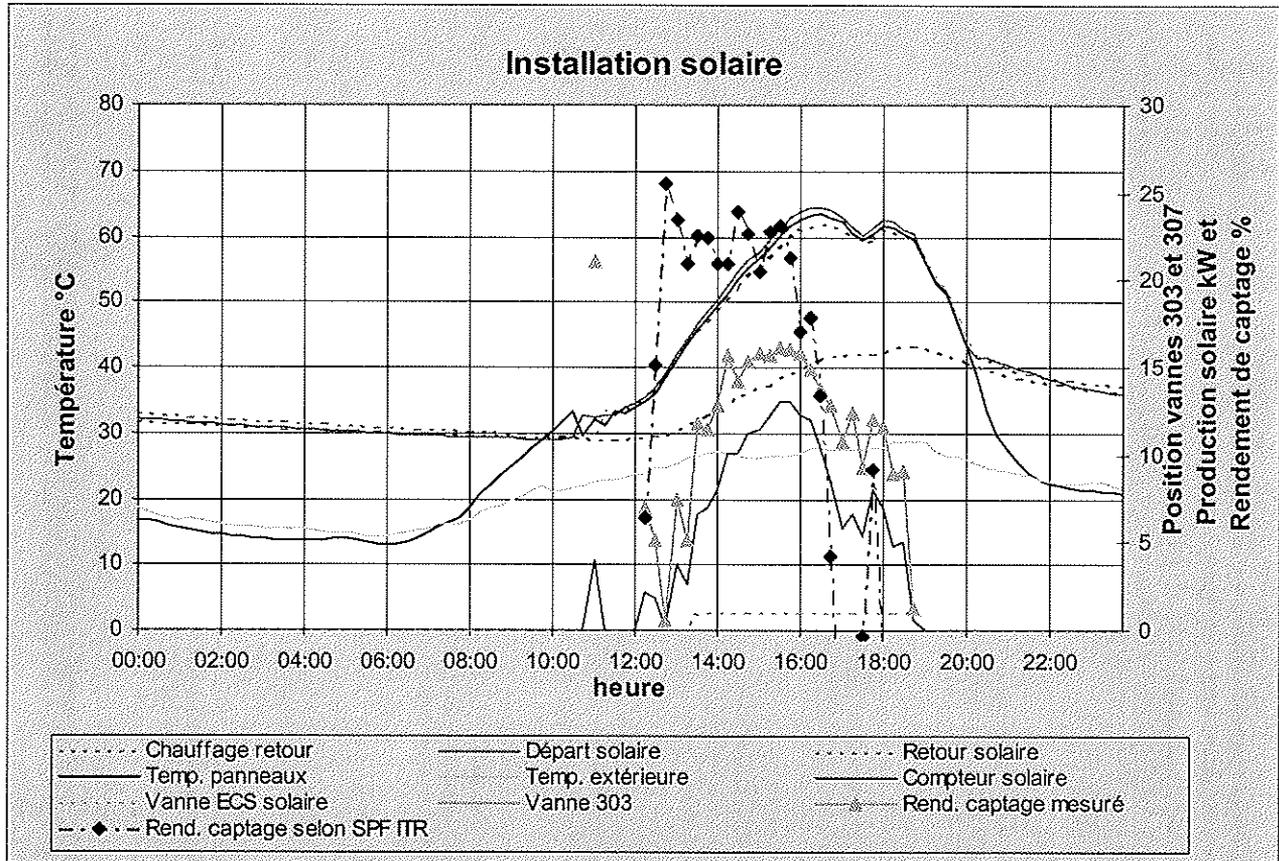


Figure 12 : Comportement et rendement de l'installation solaire un jour d'été à vent modéré

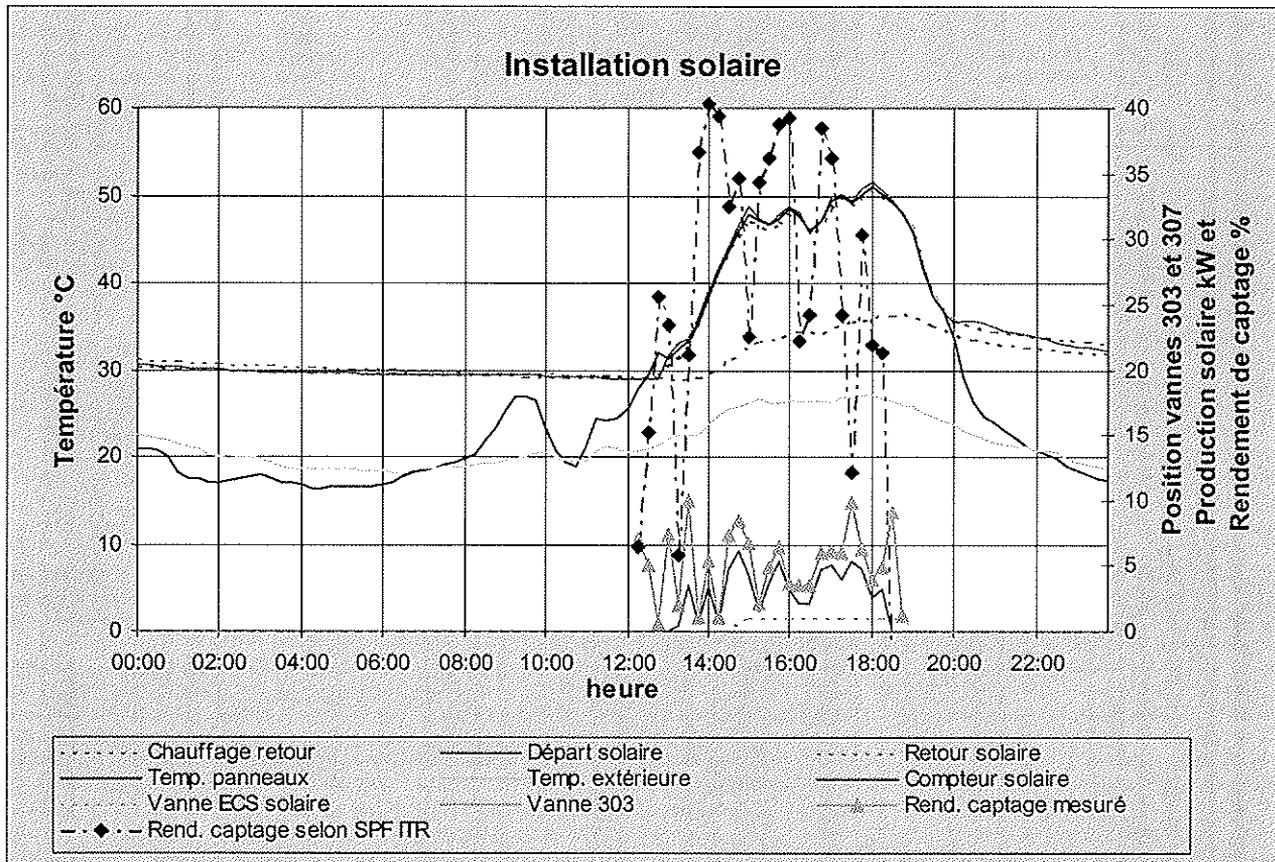


Figure 13 : Comportement et rendement de l'installation solaire un jour d'été à vent fort

En comparant les figures 10, 12 et 13, on remarque les points suivants :

- En hiver par vent calme, lorsque la température extérieure est basse (figure 10), le rendement mesuré est nettement supérieur à celui selon SPF ITR. Ce dernier est même négatif alors que la production solaire a bel et bien lieu,
- En été, le rendement mesuré est nettement inférieur à celui selon SPF ITR et ce d'autant plus que le vent balaie la surface des absorbeurs. Par contre, dès que les conditions météo se dégradent (ensoleillement faible et différence de température élevée), le rendement mesuré est supérieur à celui selon SPF ITR.

Les différences entre les rendements mesurés et ceux selon SPF ITR s'expliquent par les faits suivants :

- Les mesures de SPF ITR ne tiennent pas compte du vent. On constate ici l'importance de ce facteur pour les installations avec absorbeurs,
- la face arrière des absorbeurs du CEB est bien isolée et donne sur un local chauffé à 15°C. Les déperditions thermiques sont plus faibles que dans le cas mesuré à SPF ITR (absorbeur sur socle à l'air libre).

Analyse du vent en surface et corrélation avec le vent local mesuré par la station météo

Cette étude a été réalisée par M. Renoult dans le cadre de son travail de diplôme de l'Ecole d'ingénieurs de l'Etat de Vaud, section génie thermique. Nous présentons ici un résumé de ce travail.

Ces mesures ont été effectuées en juin et en novembre 1996 sur plusieurs semaines au moyen de l'instrumentation présentée au chapitre 5.6.

Une mesure des pertes thermiques du champ d'absorbeurs a tout d'abord été effectuée. Il s'agissait de déterminer la part liée à la convection - et donc aux conditions de vent - afin d'utiliser le résultat pour la suite des calculs de rendement en fonction du vent.

Les pertes sont calculées de la manière suivante :

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = \dot{q}_{conv.} + \dot{q}_{rayon.} + \dot{q}_{cond.} = h_1 \cdot (T_{abs} - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) + \frac{K}{e} (T_f - T_{surface})$$

où

- ε est le coefficient d'émissivité des absorbeurs = 0.18 [-]
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]
- e est l'épaisseur de l'isolant sur la surface intérieure des absorbeurs = 9 [cm]
- K est le coefficient de conductivité thermique de l'isolant = 0.0035 [W/mK]

La mesure a été réalisée la nuit de telle manière que le rayonnement solaire ne fausse pas les résultats. La température extérieure était de 4°C alors que la température du ciel a été estimée à 0°C (plafond de stratus à 800 - 1000 m d'altitude). Le vent était faible avec une vitesse en surface de 1.2 m/s en moyenne.

Les pertes totales se sont établies à 17 kW après une période transitoire.

Avec les éléments ci-dessus, les pertes s'établissent comme suit :

- Pertes par rayonnement : 18 W/m² = 1900 W pour l'ensemble de la paroi,
- Pertes par conduction : 5 W/m² = 500 W pour l'ensemble de la paroi
- Pertes par convection : 17 - 1.9 - 0.5 = 14.6 kW = 142 W/m²

Avec une différence de température de 13°C (température moyenne des capteurs 17°C, température extérieur 4°C), on obtient un coefficient de transfert de chaleur par convection par vent faible de 11 [W/m²K]. Les pertes par convection représentent environ 85% des pertes totales du champ d'absorbeurs.

Dans un premier temps, les mesures de la vitesse du vent sur la paroi ont servi à établir une corrélation entre cette vitesse et celle mesurée par la station météo. Une bonne corrélation permettrait de reprendre les mesures des deux années de mesure pour obtenir un nombre important de valeurs. Cette corrélation existe pour un vent du sud-sud-ouest mais semble peu évidente pour des vents d'une autre direction.

De ce fait, il n'a pas été possible de valoriser les mesures des deux années de mesures que pour les vents de sud et sud-est.

Le rendement des absorbeurs en fonction des classes de vent est présenté sur le graphique suivant :

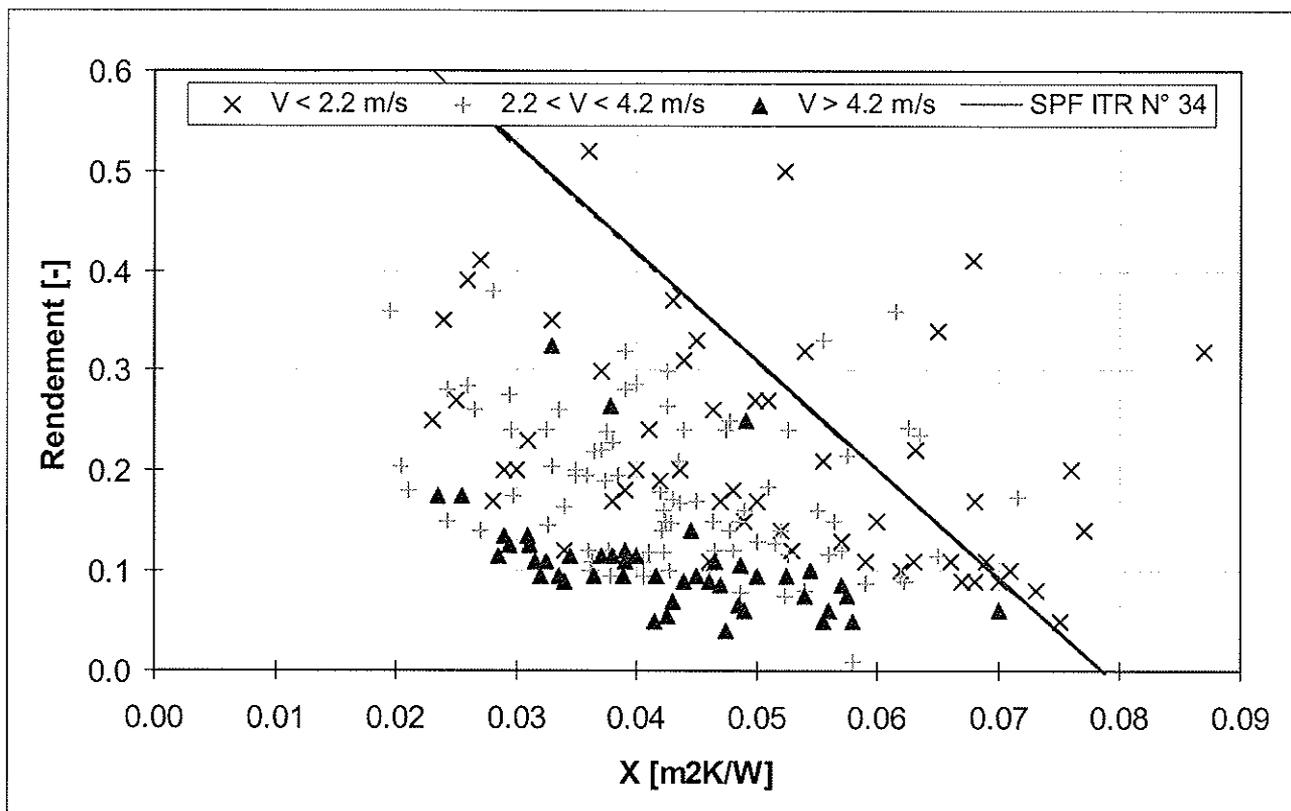


Figure 14 : Rendement des absorbeurs en fonction de la vitesse du vent mesurée par la station météo lors de vent du sud - sud ouest.

La mesure SPF ITR N°34 n'est représentée que pour mémoire étant donné que les conditions de mesures sont très différentes. On constate que le vent a une influence très importante sur le rendement de captage.

Pour des vents de plus de 4,2 m/s mesuré par la station météo (ce qui correspond à des vents de plus de 1,7 m/s mesuré sur la paroi d'absorbeurs) le rendement est relativement peu influencé par les conditions météo pour des X allant de 0.02 à 0.07. La dispersion des mesures est très importante pour des vents de vitesse inférieure à 4,2 m/s (inférieure à 1,7 m/s sur les absorbeurs). Il aurait été intéressant de disposer de points à des X inférieurs, ce qui ne s'est pas produit durant la période considérée (principalement en hiver).

Nous en concluons que le rendement est fortement influencé par le vent sur les absorbeurs, vent qui n'est qu'imparfaitement mesuré par la station météo. De plus, l'influence de la convection naturelle n'a pas pu être mesurée. Des instruments permettant la mesure de vent de moins de 0,4 m/s auraient alors été nécessaires.

En conclusion de ces mesures, il apparaît que le vent a une influence notable sur le rendement de captage et donc sur la production solaire de l'installation.

7. COUT ET RENTABILITE DE L'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE

7.1 Investissements

L'installation solaire du CEB a été étudiée pour un coût d'investissement minimum avec 3 points forts :

- l'utilisation d'absorbeurs moins chers que les capteurs solaires vitrés,
- l'intégration des absorbeurs en façade en remplacement d'éléments de façade,
- l'utilisation de la chaleur directement dans les dalles sans accumulateur de chaleur.

L'annexe E présente le détail des coûts effectifs de l'installation solaire.

Le graphique ci-dessous présente la répartition des coûts globaux d'investissement.

Le prix de la façade solaire s'élève à 855.--Fr./m² capteur. Une façade de type poteaux - traverses avec isolation coûtant environ 700 - 800 Fr./m², le surcoût estimé de la façade solaire est de Fr. 100.-- Fr./m².

Le coût total de raccordement solaire est de 417 Fr./m².

Cette valeur est élevée et peut être abaissée en :

- rapprochant les panneaux solaires de la chaufferie,
- supprimant le comptage de chaleur,
- supprimant des vannes d'arrêt et d'équilibrage non indispensables,
- supprimant les compensateurs de dilatation,
- modifiant le système de liaison hydraulique.

Un coût indicatif de 300 Fr./m² est alors significatif.

7.2 Rentabilité de l'installation solaire

Taux d'intérêt	:	6%
Amortissement	:	20 ans
Annuités	:	8,73%
Investissement	:	Fr. 517.--/m ²
Frais de capital	:	$0,0873 \cdot 517 = 45,10$ Fr./m ²
Energie produite (1995 - 1996)	:	12'929 kWh
Coût du kWh solaire	:	$45,10 \cdot 100 / 12'292 = 0,34$ Fr./kWh

Cette valeur est élevée par rapport à des installations standard actuelles. La rentabilité pourrait être améliorée en appliquant les propositions faites plus haut.

8. RESULTATS DE SIMULATION

8.1 Méthode de simulation

Le cahier des charges du volet simulation de ce projet prévoit un module TRNSYS comprenant une surface de captage solaire et une cellule de consommation avec plancher solaire. Ce module sera exploité pour la constitution des données paramétriques nécessaires à l'établissement des abaques de dimensionnement d'installations avec planchers solaires directs en Suisse.

La première phase a consisté en une simulation des installations du bâtiment du CEB et à une comparaison aux valeurs mesurées sur le site. Le détail des installations du CEB étant plus compliqué que celui d'un cas standard, un modèle de chaque composant principal a été élaboré, calculé et validé indépendamment. Ensuite ces différents composants ont été assemblés pour constituer le modèle d'ensemble.

Deux logiciels de simulation dynamique de systèmes ont été exploités. Il s'agit de TRNSYS et de HB@Multichamps. Le premier est un logiciel performant mais peu adapté à la simulation thermique de dalles. Le second, développé par BSI depuis 1987, basé sur le concept des éléments finis, permet le "mélange" d'éléments hétéroclites nécessaire à la simulation qui nous intéresse ici.

Le nombre de modules étant limité dans TRNSYS, une simulation complète des installations du CEB s'est avérée impossible et c'est HB-Multichamps qui a donc été utilisé pour la simulation d'ensemble et des modules TRNSYS ont été élaborés simultanément pour la façade solaire et pour la dalle du plancher solaire.

8.2 Principaux composants du modèle

Le modèle « CEB » a été construit de manière modulaire :

1. Façade solaire
2. Plancher solaire direct
3. Enveloppe du bâtiment

Cette approche permet la validation individuelle de chaque module. L'étape de validation terminée, les modules sont assemblés, la distribution et la régulation sont intégrés, ce qui constitue le modèle complet.

Façade solaire

Les modèles TRNSYS et Multichamps constitués comprennent les composants suivants :

- collecteur solaire de 100 m² avec courbe de performance
- pompe de 3.6 m³/h
- contrôleur commandant la pompe en comparant la température de sortie des collecteurs et la température de retour du chauffage mesurée.

La courbe de performance des absorbeurs est basée sur le modèle simplifié établi dans le cadre de l'étude "comparaison de capteurs solaires du marché suisse en 93/94" pour tenir compte de l'effet du vent.

La loi qui en résulte est du type: rendement = $C_0 - C_1 \cdot X$

où : C_0 : rendement à $X=0$

$$C_1 = (A+B \cdot v)$$

$$X = (T_m - T_a) / I$$

v : vitesse du vent [m/s]

T_m : température moyenne dans les capteurs [K]

T_a : température extérieure [K]

I : rayonnement dans le plan des capteurs [W/m^2]

Les paramètres A et B ont été déterminés par une série de simulations exploitant les mesures du 18 au 25 mars 95 et par comparaison mesures et résultats de simulation. La figure ci-dessous présente les résultats obtenus après calage avec comme paramètres $A=10$ et $B=3.5$. Ces résultats sont très proches des mesures pendant les périodes de fonctionnement du circulateur solaire.

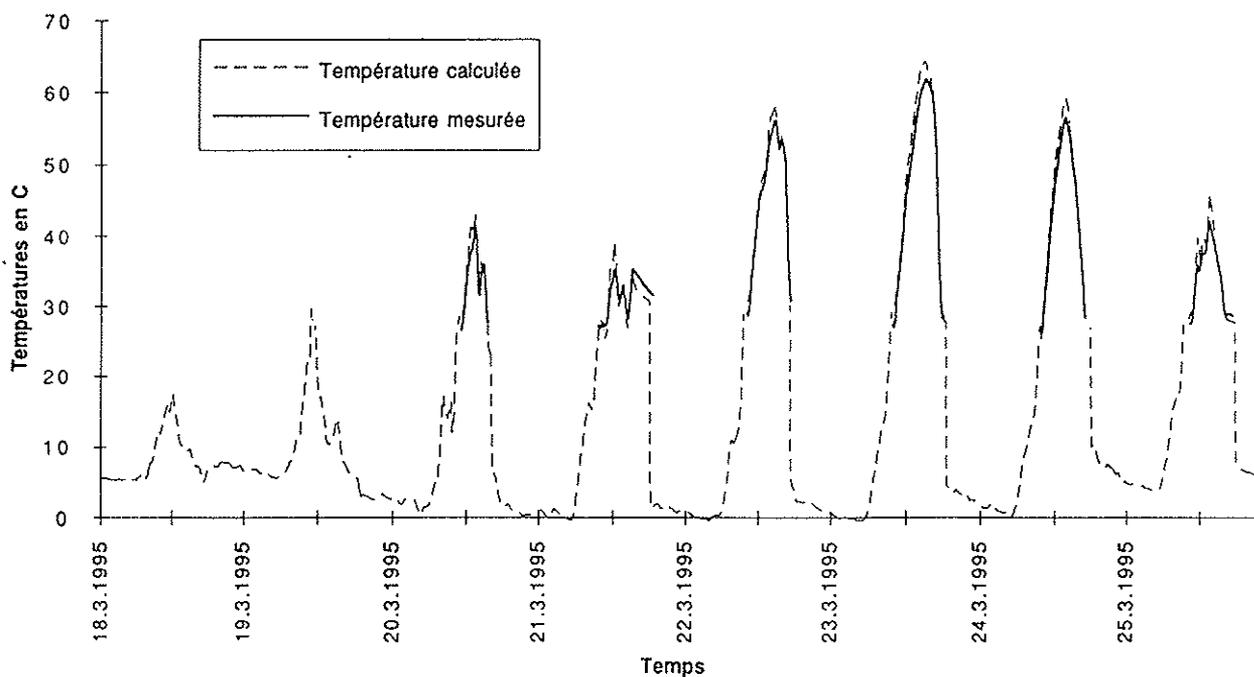


Figure 15 : Simulation de la façade solaire

Bâtiments et locaux à chauffer

Les caractéristiques des entités à chauffer sont synthétisées sous forme de cellules. Une cellule décrit tous les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur de l'entité à chauffer. Elle comprend notamment :

- le plancher solaire constitué par la dalle décomposée en couches superposées décrivant les échanges de chaleur entre les tubes de chauffage de sol, la partie supérieure de la dalle vers l'intérieur des locaux et la partie inférieure de la dalle. (stockage et pertes dans le terrain).
- les éléments de façade et de toiture impliquants des pertes thermiques vers l'extérieur ou des apports gratuits.
- les dalles et galandages intérieurs augmentant l'inertie thermique
- l'air ambiant avec les coefficients de convection avec toutes les surfaces environnantes.
- le renouvellement d'air des locaux.

Un des avantages de la description sous forme de cellule et qu'il est très facile de calculer la température rayonnante ressentie en utilisant la moyenne des températures des surfaces pondérées par leur dimension. Dans le cas du CEB deux cellules ont été identifiées (Bureau et Atelier)

Modèle TRNSYS de dalle

TRNSYS ne contient pas de module permettant de décrire ce genre de dalles simplement. Pour se limiter à l'utilisation des éléments standards de TRNSYS, la dalle est simulée par une série de cuves en série pour tenir compte des inerties. Les débits échangés entre les cuves sont calculés en tenant compte des conductivités et des épaisseurs des éléments (dalle, terrain). Le chauffage est transmis par différence de température avec l'environnement de la deuxième cuve. Des essais pour différents régimes "permanents" sur la dalle du bureau décomposée en 5 cuves ont montrés que ce modèle fonctionnait. Il est néanmoins difficile à manipuler et n'a pas été utilisé pour la suite de l'étude.

Modèle Multichamps de dalle

HB-Multichamps étant basé sur le concept des éléments finis, la description des échanges dans une dalle est très simple. Chaque couche de la dalle est un élément fini comportant les paramètres d'inertie et de conductivité. La continuité est assurée par la topologie.

Autres équipements

Le reste des équipements est constitué par l'échangeur entre circuit solaire et retour chauffage, par la chaudière d'appoint et par les groupes de régulation alimentant les différentes cellules en chaleur.

Les lois de réglage des différents équipements sont intégrées dans le modèle et un fichier météo horaire comprenant température extérieure, ensoleillement dans le plan des absorbeurs et vent complète les données.

La figure ci-dessous illustre la représentation graphique, par HB-Multichamps, du modèle des installations du CEB.

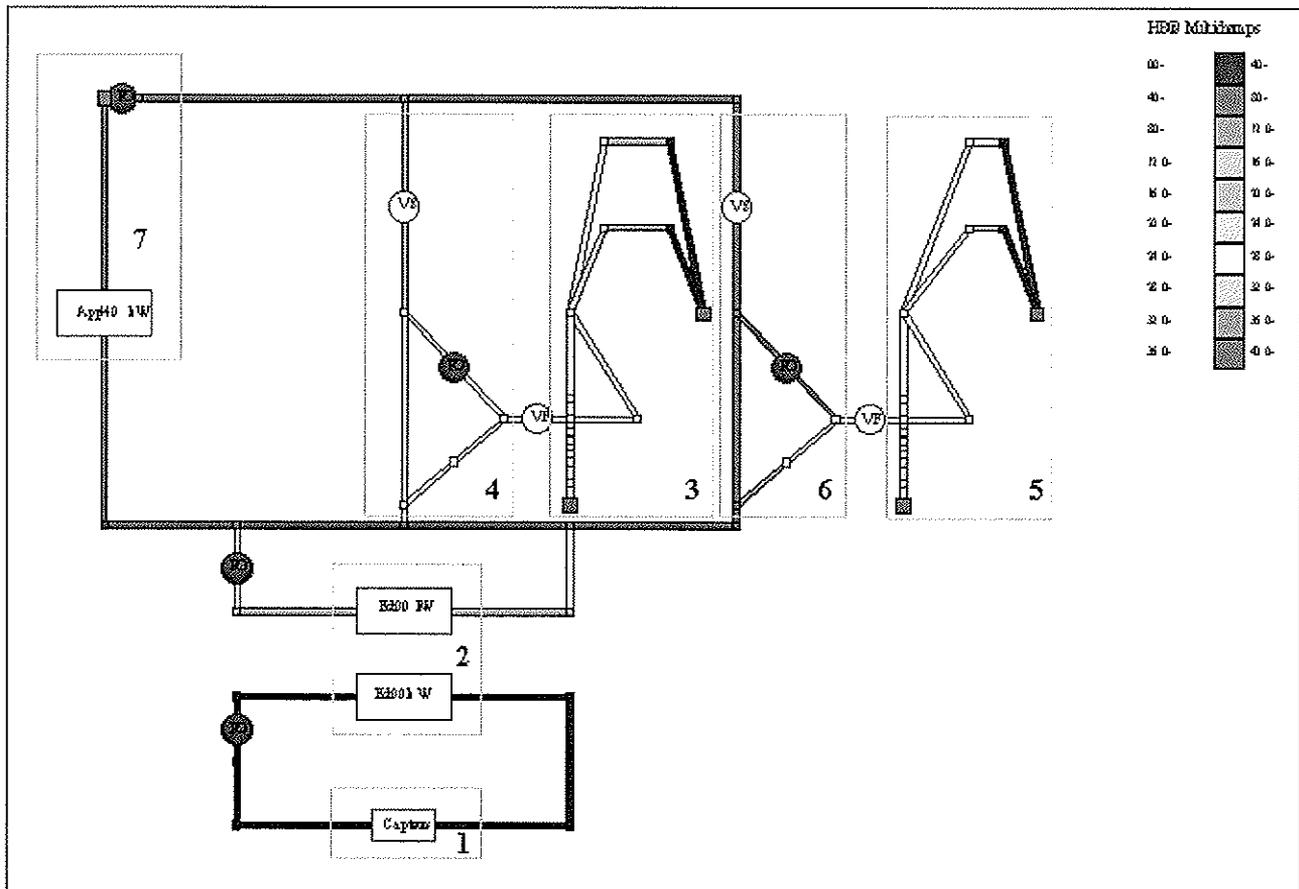


Figure 16 : Modèle HB-Multichamps complet

8.3 Résultats de simulation

Simulation annuelle du CEB avec HB-Multichamps

Le test de calage sur le mois de mars 1995 ayant fourni des résultats satisfaisant, la période de simulation a été portée à une année complète en utilisant la météo de Boudry extraite du logiciel Météonorm, mais sans les données sur le vent. Les paramètres des absorbeurs pris en compte sont ceux provenant de la mesure ITR 34, soit $C_0=0.91$ et $C_1=12$.

Le tableau ci-dessous indique l'énergie fournie par la chaudière d'appoint ainsi que par l'installation solaire, de même que la part solaire globale.

	Mesures (31 mai 95 - 1 ^{er} juin 96)	Simulation (avec Météonorm)	Unité
Appoint total	177396	161973	kWh/an
Solaire total	12970	12580	kWh/an
Part solaire	7	7	%

Tableau 4 : Comparaison entre mesures et simulation

On remarque que les quantités d'énergie sont très proches entre mesures et simulation malgré l'utilisation des données météo issues de Météonorm. La part solaire simulée est égale à celle observée entre mai 1995 et juin 1996 ainsi qu'entre mai 1996 et juin 1997.

La figure ci-dessous présente ces résultats sous forme de bilan mensuel.

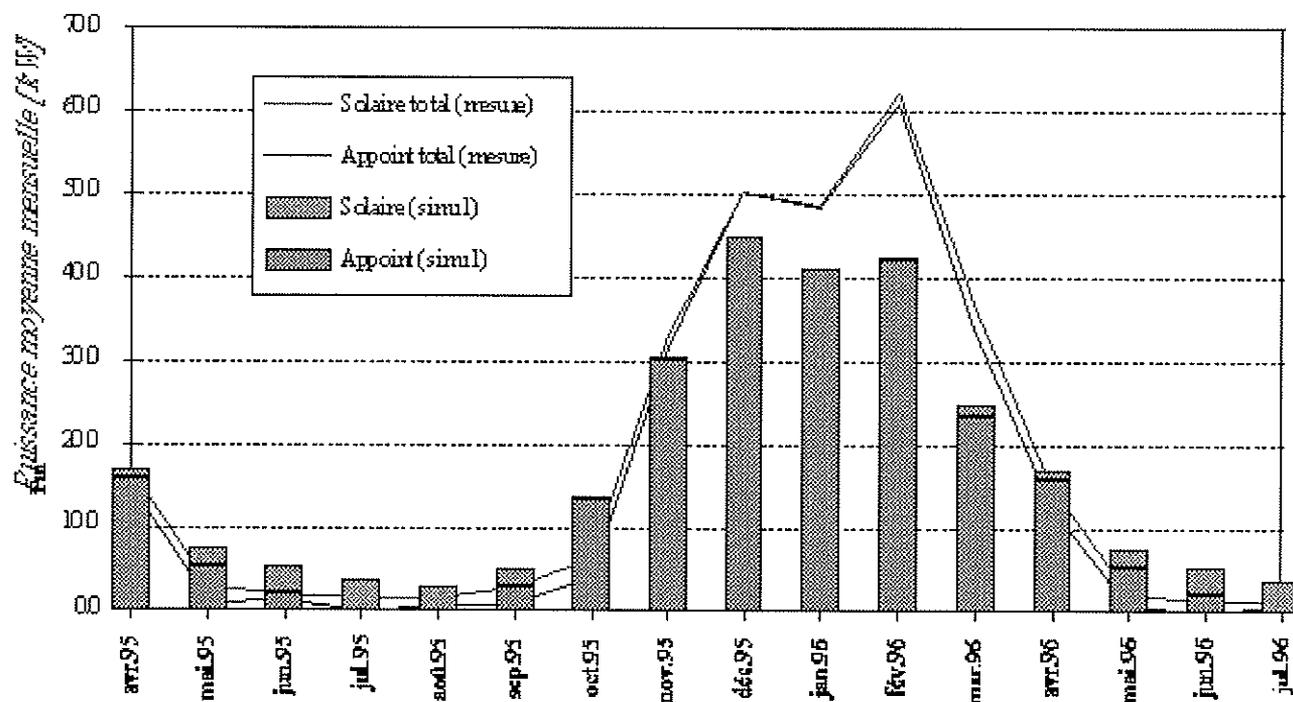


Figure 17 : Bilan mensuel et comparaison mesures - simulations

On observe une bonne concordance entre mesures et simulations, malgré des données météo non synchronisées. Cette phase de calage du modèle de plancher solaire direct sur les installations du CEB de Boudry terminée, il s'agit de construire le modèle de PSD, reprenant les composants mis en œuvre pour le CEB, mais décrivant de manière plus générale un équipement de type PSD.

9. ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT D'INSTALLATIONS SOLAIRES DE TYPE " PLANCHER SOLAIRE DIRECT "

9.1 Méthode d'élaboration des abaques

L'élaboration d'abaques suggère tout d'abord de disposer d'un ensemble de données suffisantes autorisant l'établissement de règles de comportement lorsque l'on fait varier un paramètre.

La seule manière de procéder consiste à construire le modèle de l'installation type et à identifier les paramètres principaux de celle-ci ainsi que les variations possibles de ceux-ci. Sur cette base une étude paramétrique est menée en faisant varier un paramètre après l'autre.

9.2 Paramètres pris en compte

L'installation type prise en compte est constituée par un plancher alimenté par des absorbeurs solaires identiques à ceux du CEB (Absorbeur AS d'Énergie Solaire SA), d'une dalle d'épaisseur variable isolée du terrain et d'un chauffage d'appoint indépendant pour maintenir la température ambiante minimum attendue. Les caractéristiques du bâtiment se limitent à une surface chauffée, une hauteur de local et un coefficient G [W/m³/K] (k+ren. air)

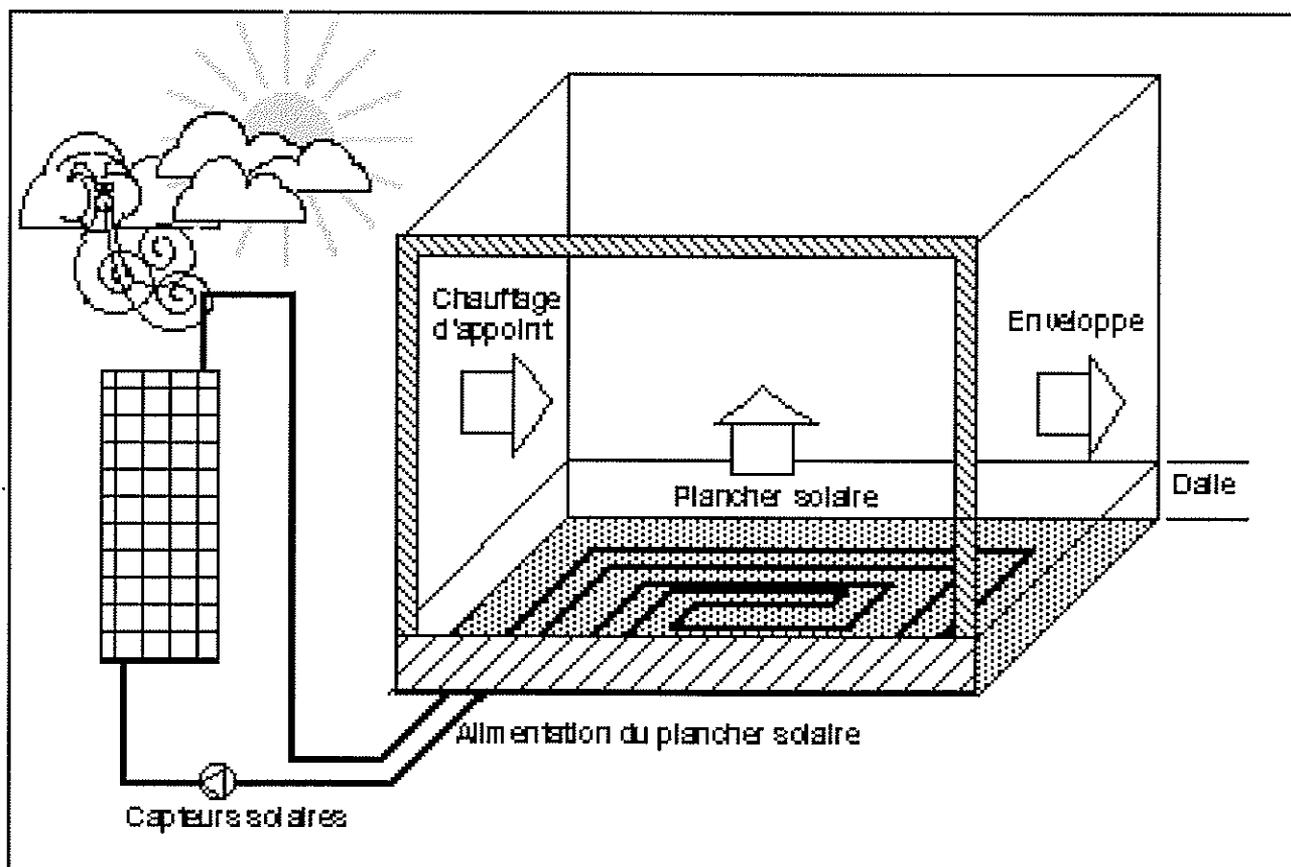


Figure 18 : Schéma simplifié de l'installation de base utilisée pour l'étude paramétrique.

L'inertie, dépendant du type de construction (massive ou légère), est prise en compte dans le modèle. On voit l'influence de celle-ci sur la quantité d'énergie annuelle sur la

figure ci-dessous. Le type de construction peut être pris en compte sous forme de degrés d'apports gratuits

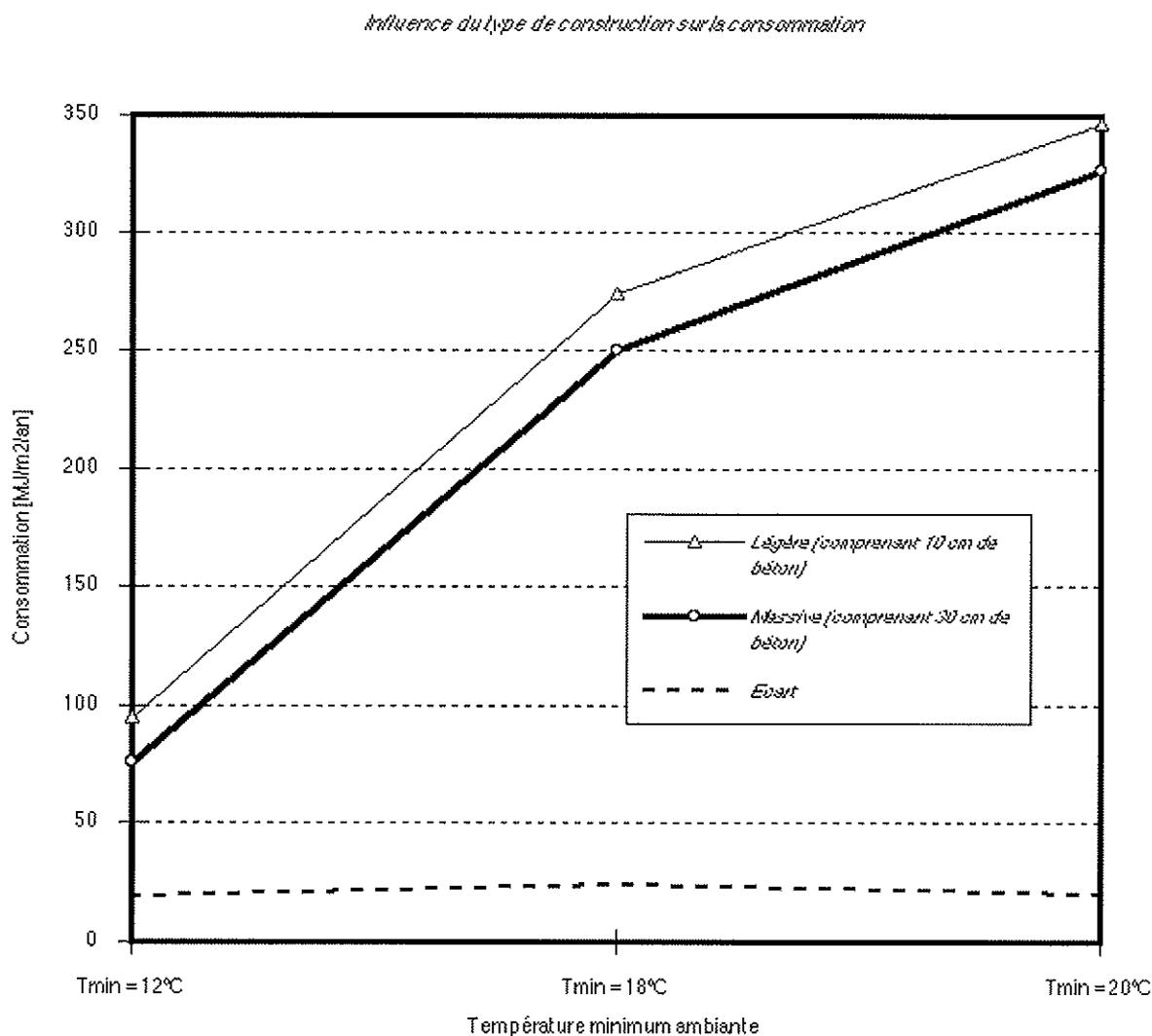


Figure 19 : Influence du type de construction sur la consommation d'énergie.

Pour toutes les simulations présentées dans ce rapport, elle a été choisie de type massive.

Les paramètres pris en compte sont:

- Indice chauffage du bâtiment : Correspondant à la valeur limite SIA.
- Sites d'implantation: Lausanne, Locarno, Kloten, La Chaux-de-Fonds
- Températures ambiante mini. de consigne: 12, 18 ou 20°C
- Surfaces relative d'absorbeurs solaires : 2.5, 10 ou 35 % de la surface de référence énergétique du bâtiment
- Orientation: Est, Sud ou Ouest
- Inclinaison : Vertical, 45°, horizontal
- Epaisseur de la dalle de plancher solaire : 15, 20 ou 30 cm

Remarque concernant l'effet du vent sur les absorbeurs solaires :

L'effet du vent sur le rendement des absorbeurs nus est connu et peut être important en cas de situation exposée. Dans le cadre de cette étude paramétrique, celui-ci n'a pas été pris en compte. Les sites simulés correspondent ainsi à une situation protégée du vent.

Le modèle, dont la représentation graphique est visible à la figure ci-dessous, décrit l'installation de base et utilise les données météo horaires fournies par Météonorm ainsi qu'un régulateur gérant le fonctionnement du plancher solaire et du chauffage d'appoint. La régulation libère le plancher solaire quand la température extérieure est supérieure à 12°C et gère le chauffage d'appoint. Celui-ci s'enclenche lorsque la température ambiante minimale n'est plus respectée.

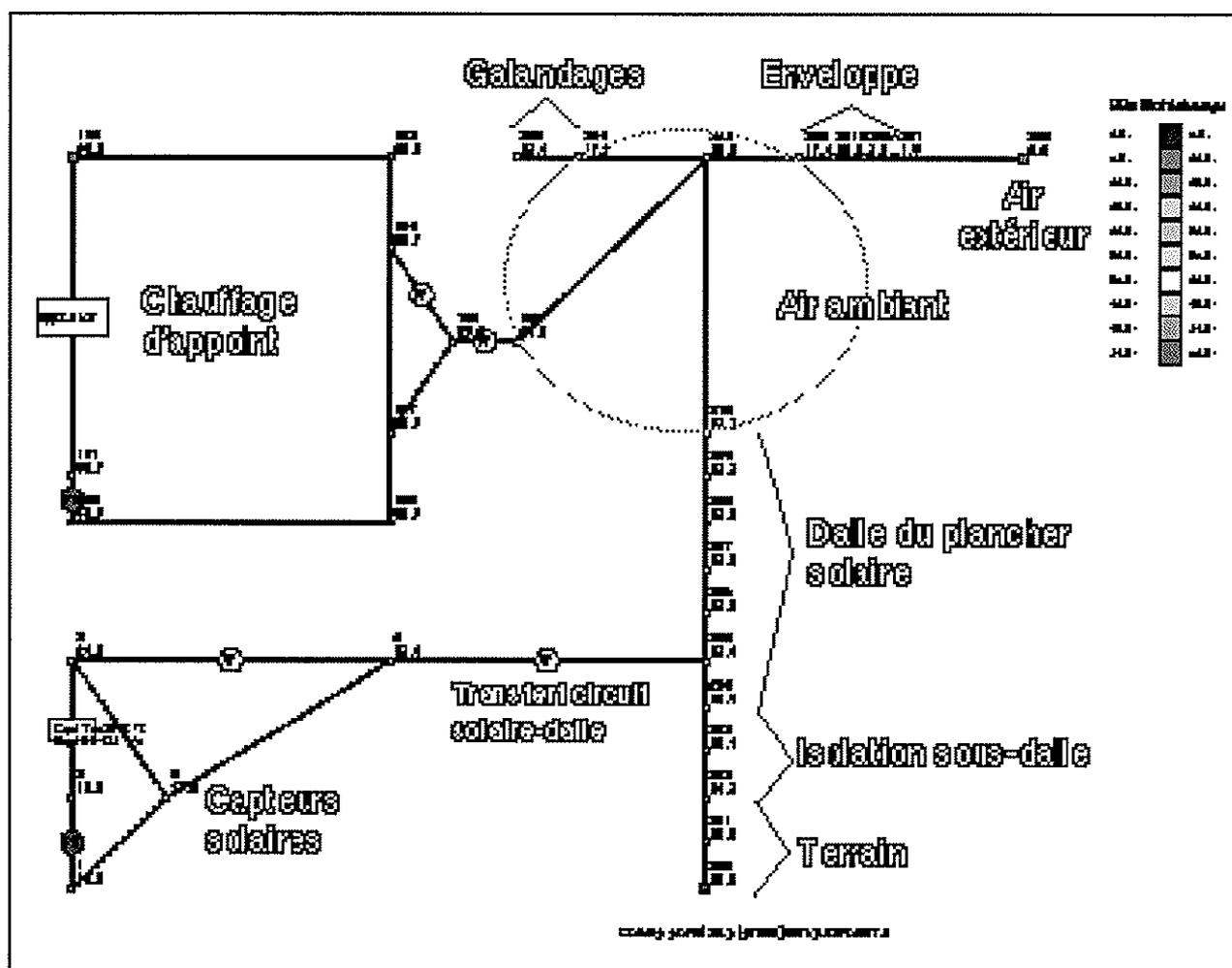


Figure 20 : Représentation graphique par HB@Multichamps du modèle de base de PSD.

Le moteur de calcul HB@Multichamps a été adapté pour permettre le calcul des cas "à la chaîne". Les résultats présentés ci-après ont nécessité 189 simulations par site météo. Les données du modèle ont été mises en forme sur un tableur et sont mises à jour dynamiquement selon la valeur des paramètres choisis. Cette manière de faire permet de générer rapidement les scénarios à simuler tout en évitant au maximum les erreurs de saisie.

9.3 Résultats principaux

Les valeurs simulées ont été intégrées et sauvegardées toutes les 24 heures. Les fichiers de résultats présentent donc les valeurs moyennes journalières d'une année complète. L'analyse des résultats s'est faite selon la même méthode que pour les données. Un tableur, dans lequel il suffit de "coller" le fichier de résultats, calcule le bilan énergétique du cas simulé, à savoir l'énergie brute fournie respectivement par le PSD et le système de chauffage d'appoint, ainsi que l'énergie nette fournie par le PSD, ne tenant pas compte de l'énergie permettant d'atteindre une température ambiante supérieure à celle demandée. Cette normalisation est nécessaire pour permettre la comparaison des cas sur une base commune dans les tables de dimensionnement.

L'analyse des résultats pour chaque site indique les éléments principaux suivants :

Épaisseur de dalle du plancher

La figure ci-dessous présente les résultats obtenus en faisant varier l'épaisseur de dalle pour une configuration donnée d'installation. On voit clairement l'optimum obtenu pour une épaisseur de dalle de 20 cm. La variation de la quantité d'énergie fourni par le PSD est faible, ainsi le passage d'une chape de 5 cm à une dalle de 20 cm n'augmente la quantité d'énergie fournie de 8% environ. Par contre, la solution avec une dalle de 20 cm est plus économique pour une nouvelle construction et pratiquement impossible pour un bâtiment existant.

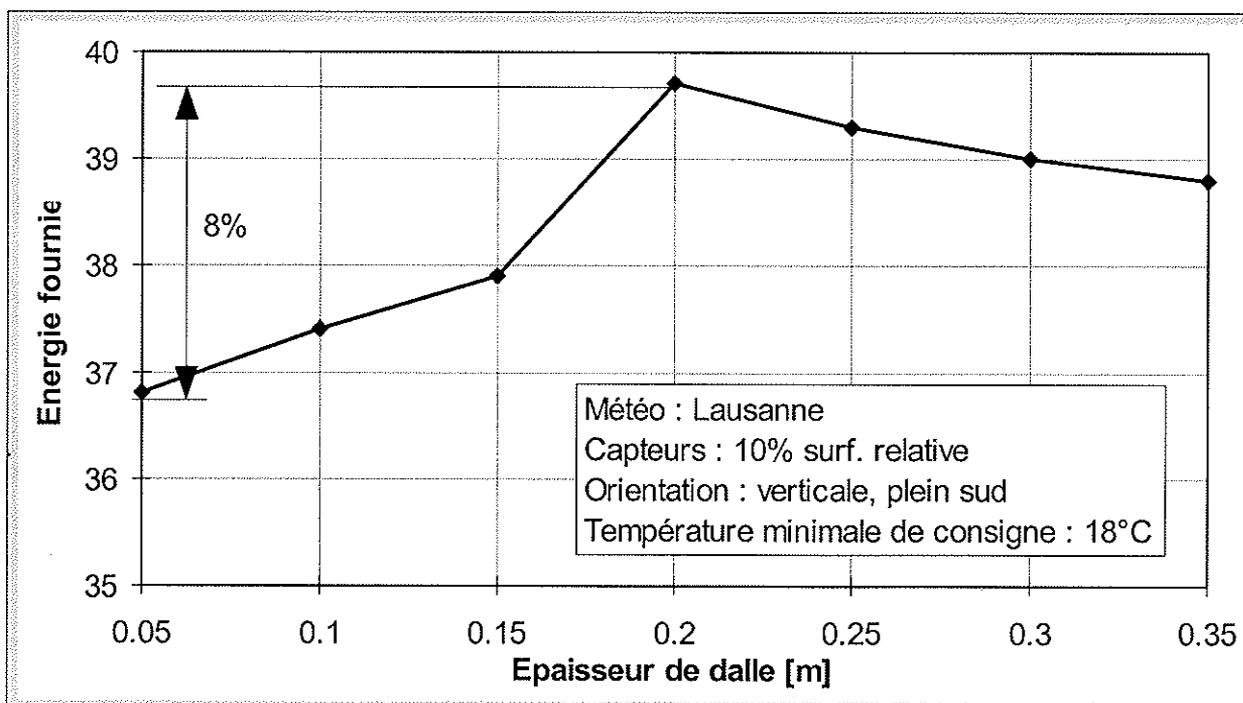


Figure 21 : Variation de l'énergie produite en fonction de l'épaisseur de la dalle

Orientation et inclinaison

Le paramètre principal est évidemment la surface installée de capteurs et son implantation. Les meilleurs résultats sont obtenus dans l'ordre pour la configuration présentant une orientation plein Sud et une inclinaison à 45°, puis par une façade de même orientation puis par une toiture plane et enfin par les autres orientations et inclinaisons.

Régulation du plancher

L'effet des paramètres de la régulation est très sensible surtout quand la surface de capteurs devient importante. La puissance à mi-saison devient grande par rapport aux besoins et le risque de surchauffe devient grand. Les résultats des simulations pour les cas avec température minimale de 18°C ne sont pas tout à fait comparables aux autres cas, car la régulation coupait le plancher si la température extérieure était supérieure à 10°C, contre 12°C pour le cas avec température minimale de 20°C. Ceux-ci sont donc légèrement sous-estimés

Surface des capteurs

Le choix de la surface à installer est principalement économique mais également pratique. La figure ci-dessous présente en détail la quantité d'énergie fournie par un PSD et son prix de revient en fonction de la surface installée. Les valeurs économiques suivantes ont été choisies :

Taux d'intérêt :	6%
Durée d'amortissement :	20 ans
Annuités :	8.73 %
Surcoût des capteurs :	100.- SFr/m ² de capteur
Raccordement capteurs et plancher :	150.- SFr/m ² de capteur
Tubes plancher solaire :	10.- SFr/m ² de plancher
Dalle :	Pas de surcoût
Electricité :	Pas prise en compte

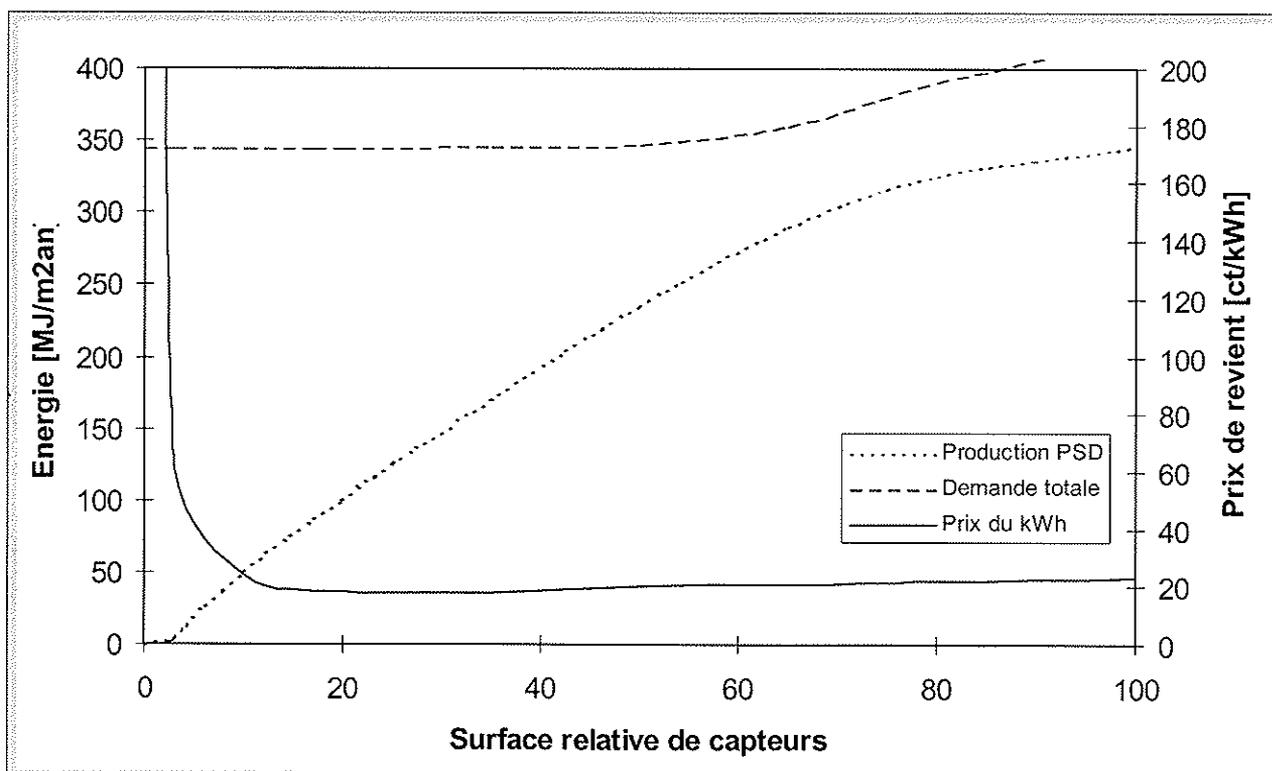


Figure 22 : Evaluation de la surface optimum de capteurs à installer.

Les "petites" surfaces produisent une énergie dont le prix de revient est très élevé. Il apparaît qu'il faut atteindre une surface installée de 35% de la surface à chauffer pour atteindre l'optimum économique de 18 ct/kWh. Pour rendre les "petites" surfaces plus

attractives, il faut simplifier et optimiser au maximum les installations en proposant des composants modulaires préfabriqués et en simplifiant les raccordements.

A titre de comparaison, une simulation similaire d'un PSD exploitant des capteurs vitrés (Azur 3 d'Agena) a été effectuée. La figure ci-dessous fournit les résultats comparatifs des capteurs vitrés et des absorbeurs nus. On remarque qu'à quantité d'énergie fourni par le PSD identique, il faut entre deux et trois fois plus d'absorbeurs nus que de capteurs vitrés. Malgré cela, les absorbeurs sont économiquement plus intéressants, car leur coût de base est très inférieur et qu'une partie du coût peut être compensé par la moins value sur le revêtement de façade ou de toiture si leur montage se fait en façade ou en toiture comme c'est le cas au CEB. Ce genre d'installation en façade est plus difficile avec des capteurs vitrés.

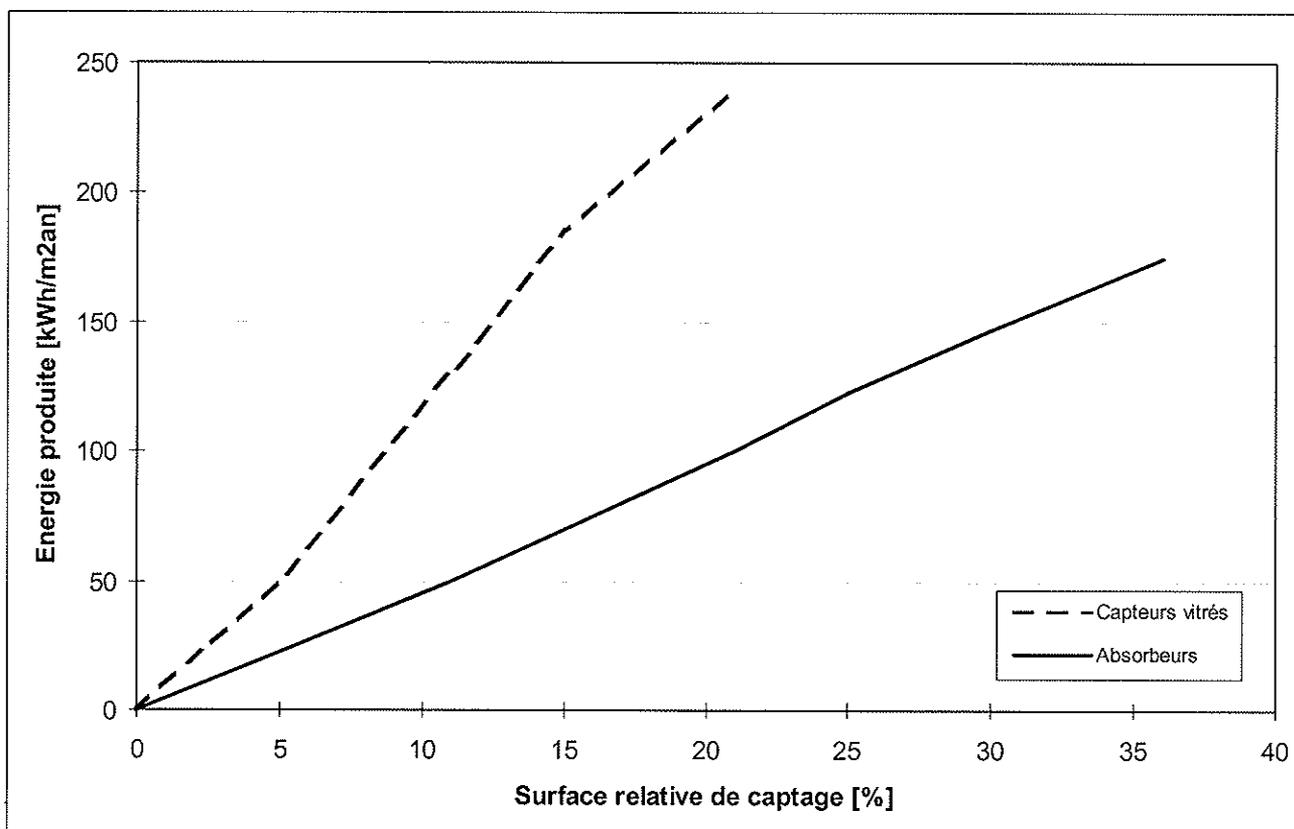


Figure 23 : Comparaison entre absorbeurs et capteurs vitrés

9.4 Forme et utilisation des abaques

Les résultats de simulation sont organisés dans un tableau de manière à pouvoir être facilement exploités. Pour chaque jeu de paramètres, correspondant à une case du tableau, on trouve l'énergie fournie par le PSD, la demande totale de chaleur ainsi que la température ambiante moyenne obtenue pendant la période de chauffage. Les énergies sont exprimées selon les unités classiques rapportées à la surface de référence énergétique, soit en MJ/m²/an.

L'annexe F regroupe les différentes abaques. Le tableau ci-dessous présente un extrait des résultats de simulation correspondant à une halle avec PSD située à Lausanne dont les capteurs solaires seraient verticaux.

Plancher solaire direct										
Table de dimensionnement Energie fournie par le PSD [MJ/m²/an]										
<i>valeurs normées à la température ambiante minimum</i>										
<i>(Energie fournie par le PSD comptabilisée si Tamb ≤ Tmini)</i>										
Météo		LAUSANNE								
Demande 380/1 [MJ/m ² /an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison	Vertical			45°			horizontal
			Orientation	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
			S relative							
Demande	T ambiante	Epaisseur dalle	S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
76	12	0.15	2.5	2	1	1	3	1	1	1
76	12	0.15	10	37	14	18	43	24	24	24
76	12	0.15	35	72	36	48	72	53	54	53
76	12	0.2	2.5	10	0	0	10	6	7	6
76	12	0.2	10	47	16	23	43	23	23	23
76	12	0.2	35	72	35	47	72	53	54	53
76	12	0.3	2.5	11	6	6	10	6	6	6
76	12	0.3	10	41	17	23	47	23	23	23
76	12	0.3	35	72	35	47	72	47	54	53
251	18	0.15	2.5	8	0	1	9	1	6	6
251	18	0.15	10	30	13	16	41	22	22	22
251	18	0.15	35	129	51	57	157	85	77	83
251	18	0.2	2.5	4	3	3	10	4	4	4
251	18	0.2	10	32	10	17	47	17	25	23
251	18	0.2	35	134	53	67	159	88	89	89
251	18	0.3	2.5	5	4	4	10	3	4	4
251	18	0.3	10	31	10	16	46	17	22	18
251	18	0.3	35	128	53	63	156	88	89	89
326	20	0.15	2.5	3	1	1	6	1	2	2
326	20	0.15	10	34	13	13	51	25	25	25
326	20	0.15	35	146	70	71	194	111	104	111
326	20	0.2	2.5	4	3	4	5	4	4	4
326	20	0.2	10	32	12	18	51	27	28	27
326	20	0.2	35	153	68	81	206	114	122	123
326	20	0.3	2.5	4	3	3	5	4	4	4
326	20	0.3	10	32	12	18	51	27	28	26
326	20	0.3	35	152	68	81	202	112	115	122

Tableau 5 : Exemple de table de dimensionnement

On peut en tirer les observations suivantes :

- l'optimum d'orientation est bien le Sud
- la température ambiante minimum est largement dépassée lorsque la surface de capteurs devient importante. Elle peut ainsi atteindre 15°C pour un minimum de 12°C, lorsque la surface relative est de 35%.

Exemple d'utilisation 1:

Données : Halle de 410 m² avec façade disponible plein SUD, température minimale de 20°C, dalle de 20 cm et surface relative de 35%.

Résultats : Energie fournie par le PSD : 166 MJ/m²/an soit 49% des besoins. Légère surchauffe des locaux à mi-saison.

En reprenant les hypothèses économiques du chapitre 9.3 on en tire les données suivantes de surcoût :

- 144 m² de capteurs et raccordement à 250 SFr/m²
- 410 m² de plancher à 10 SFr/m²
- annuités 8.73% de 40'100 SFr soit 3'500 SFr/an
- énergie fournie par le plancher solaire 18'900 kWh/an soit à 19 ct/kWh

Exemple d'utilisation 2:

Données : Idem exemple 1 mais surface relative de 10%.

Résultats : Energie fournie par le PSD :39 MJ/m²/an soit 12% des besoins. En reprenant les hypothèses économiques du chapitre 9.3 on en tire les données suivantes de surcoût :

- 41 m² de capteurs et raccordement à 250 SFr/m²
- 410 m² de plancher à 10 SFr/m²
- annuités 8.73% de 14'350 SFr soit 1'250 SFr/an
- énergie fournie par le plancher solaire 4'440 kWh/an soit à 28 ct/kWh

Conclusion :

On voit que le fait de disposer d'une surface de captage importante permet de profiter au maximum de l'ensoleillement moyen de la mi-saison ce qui permet de couvrir une part beaucoup plus importante du chauffage et donc de diminuer le prix de revient du kWh.

Les abaques de dimensionnement sont construites de manière dynamique sur la base des tables à l'aide d'un logiciel de type tableur.

L'utilisateur donne 5 paramètres et peut voir la tendance des deux autres sous forme graphique. Cette forme d'exploitation des résultats est plus "vivante" que la lecture de tabelles et permet d'apprécier facilement l'influence de deux paramètres sur les performances du plancher. Cette utilisation nécessite un logiciel de type tableur (Excel).

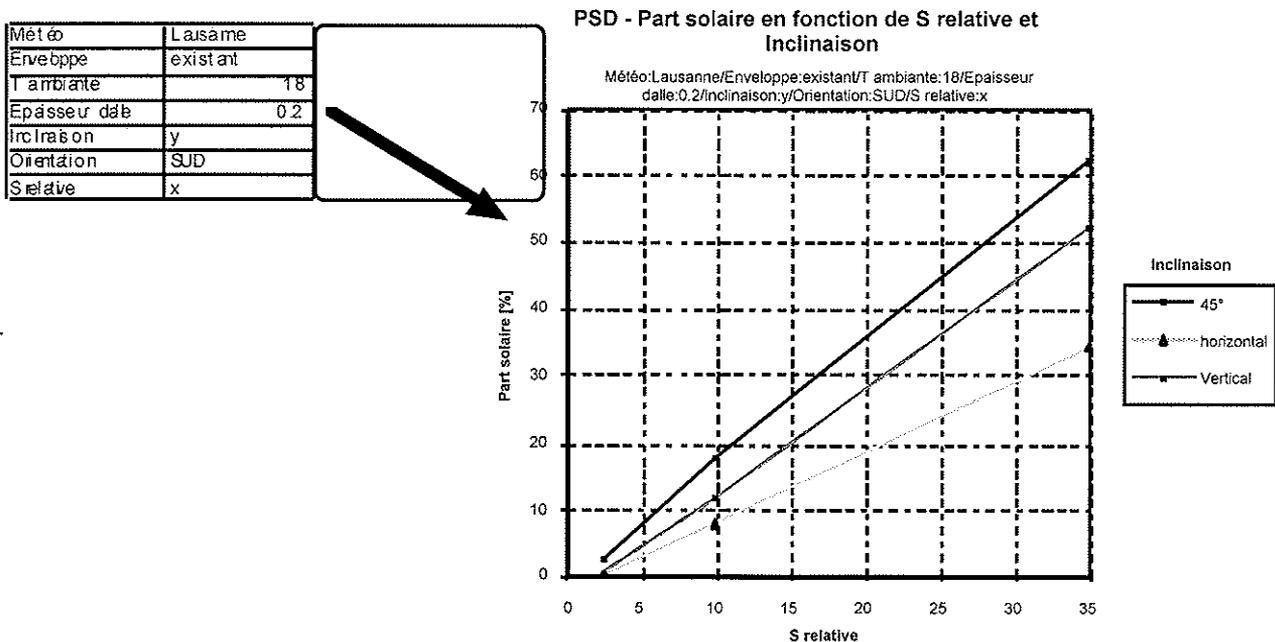


Figure 24 : Exemple de résultats

10. PROPOSITIONS D'AMELIORATION

Pour que les installations de plancher solaire direct deviennent compétitives avec d'autres formes d'énergie, il est nécessaire de simplifier et d'optimiser tous les composants et de compresser tous les coûts. Pour atteindre cet objectif il est primordial de se diriger vers des systèmes préfabriquables utilisant des composants les plus standard. En effet, comme déjà mentionné au chapitre 7, l'installation solaire du CEB produit de l'énergie thermique à environ 34 ct/kWh. Cette valeur pourrait être abaissée à 28 ct/kWh en simplifiant tous les éléments. Pour atteindre des valeurs plus basses, seule une solution avec des éléments standardisés entre en considération.

Le schéma ci-dessous illustre ce que pourrait être un élément modulaire de plancher solaire direct. Il offrirait un élément de façade de 72 m² de capteurs par groupes de 12 m² et l'interface entre façade solaire et plancher pourrait être constitué par un module préfabriqué permettant le raccordement en étoile des groupes de capteurs ainsi que des boucles du plancher. Il assurerait la circulation et l'expansion de l'élément de façade.

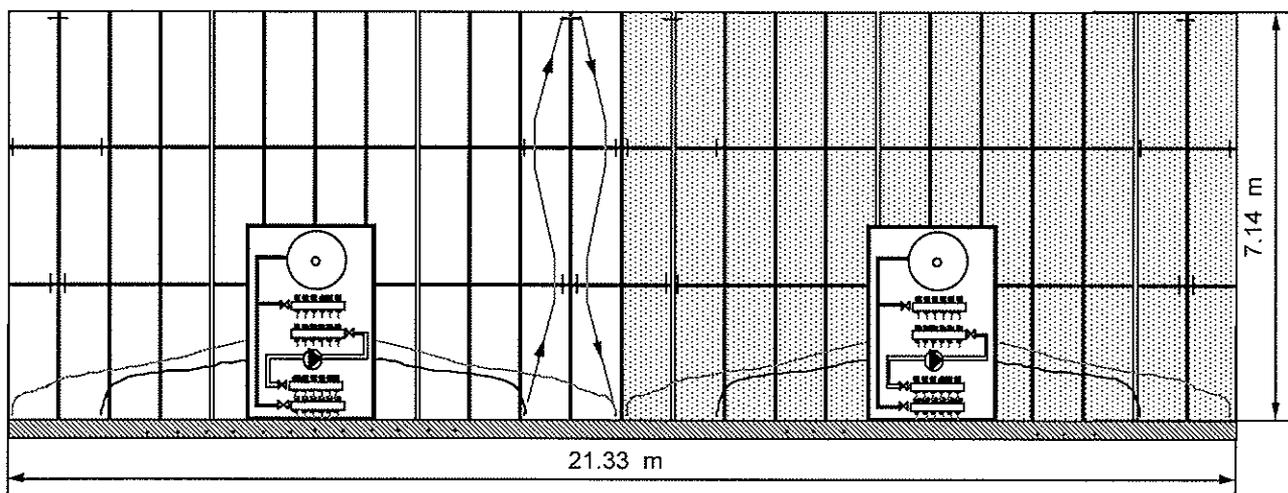


Figure 25 : Proposition pour un système de plancher solaire direct standardisé

Avec de telles solutions il est possible d'envisager les coûts suivants pour une halle de 200 m² comportant un module de 72 m²:

Surcoût capteurs	7'200 SFr
Surcoût tubes PSD	2'000 SFr
Module préfabriqué	3'500 SFr
Raccordements	3'000 SFr
Total	15'700 SFr
Annuités à 8.73 %	1'370 SFr/an
Energie fournie par le PSD	9200 kWh/an
Prix de revient du kWh	15 ct/kWh

Malgré l'optimisation des composants, il faudrait une augmentation de 50% du prix du mazout pour que le prix de revient de la chaleur du plancher solaire direct devienne compétitif.

Une extension du module permettrait de traiter l'air de renouvellement en direct et de stocker dans la dalle les excédents et ainsi d'accéder à une température de captage encore plus basse.

11. CONCLUSION

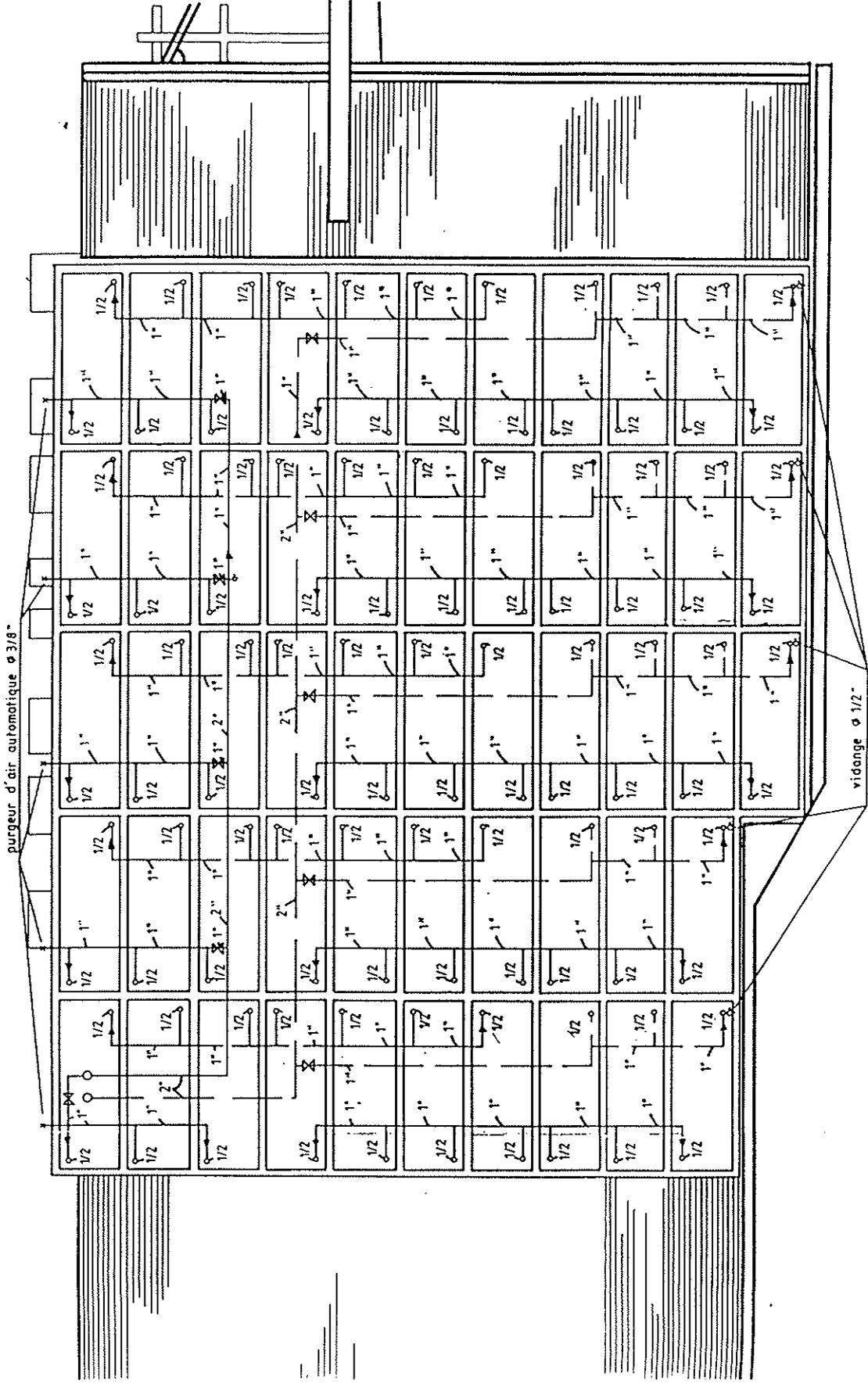
La mesure et l'analyse de l'installation solaire du CEB a permis de mettre en évidence les points suivants :

- L'installation solaire de 100 m² (ce qui correspond à 2% de la surface de plancher) a couvert le 7% des besoins en énergie thermique des bâtiments. Cette valeur est plus basse que celle prévue lors du projet (10%). Ceci est notamment dû à des conditions météorologiques nettement plus défavorables que la moyenne pendant certains mois d'hiver et à l'influence du vent sur le rendement de captage, influence qui n'a pas pu être prise en compte dans le projet.
- Le rendement de captage des absorbeurs est fortement influencé par le vent. Les pertes par convection sont de loin les plus importantes (environ 85% des pertes totales).
- Le prix du kWh s'élève à 34 ct/kWh avec l'installation existante. Une simplification du système permettrait de réduire cette valeur à 28 ct/kWh. Pour obtenir un prix de revient du kWh d'un plancher solaire direct concurrentiel, il est nécessaire de recourir à des éléments standard et d'installer une surface de l'ordre de 35% de la surface de dalle. De cette manière, les belles journées d'hiver et de mi-saison seront valorisables dans le plancher.
- Un modèle de simulation a été construit sur le logiciel HB Multichamps et a été validé par rapport aux mesures.
- Les tables de dimensionnement de planchers solaires directs ont été établies pour :
 - quatre sites d'implantation : Lausanne, Locarno, Kloten, La Chaux-de-Fonds
 - trois indices de chauffage du bâtiment : SIA existant, limite et cible
 - trois températures ambiante mini. de consigne: 12, 18 ou 20°C
 - trois surfaces relatives d'absorbeurs solaires : 2.5, 10 ou 35 % de la surface de référence énergétique du bâtiment
 - trois orientations : Est, Sud ou Ouest
 - trois inclinaisons : vertical, 45°, horizontal
 - trois épaisseur de la dalle de plancher solaire : 15, 20 ou 30 cm

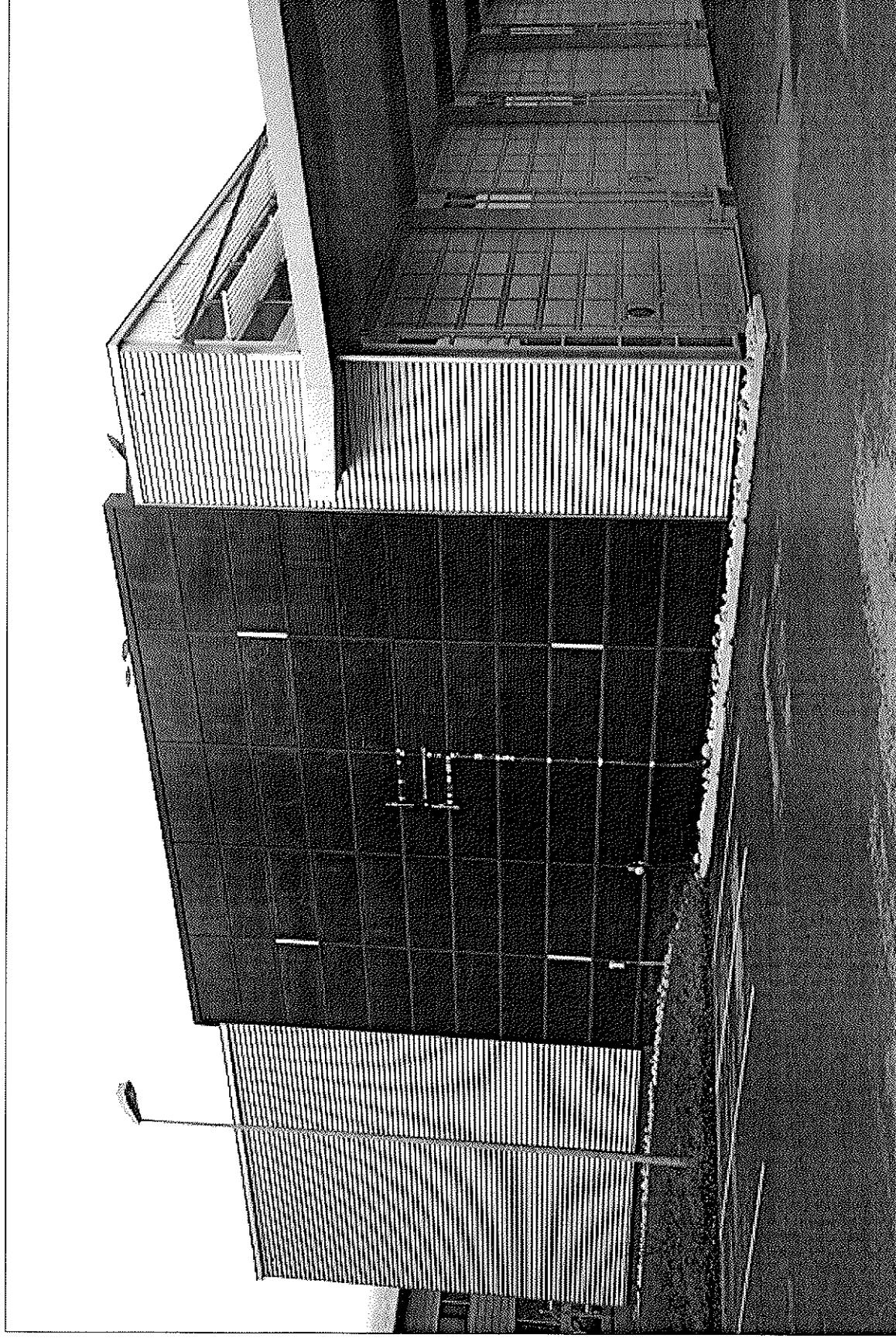
Ces résultats sont disponibles sous forme de tables et de fichier de tableur (Excel) simples à utiliser.

En conclusion, nous pouvons affirmer que seuls un dimensionnement correct, une simplification du système et le recours à des éléments standard permettraient, au prix du pétrole actuel, de réaliser une installation « plancher solaire direct » avec absorbeurs compétitive.

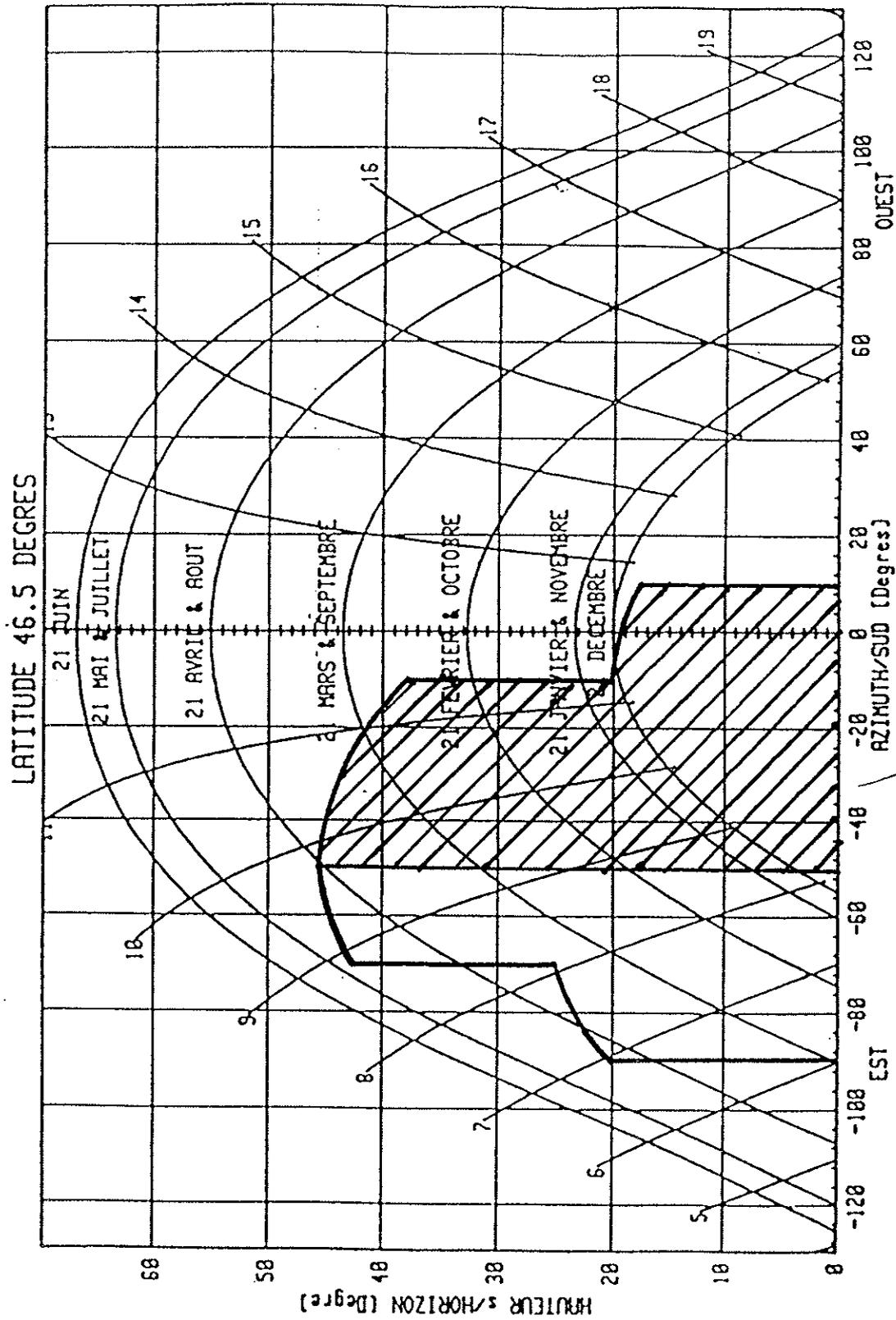
Annexe A : Schéma de raccordement des capteurs



Annexe B : Photo de la façade d'absorbeurs



Annexe C : Ombre sur la façade d'absorbeurs (par les silos à sel)



Annexe D : Liste des points de mesure

Emplacement	Sonde	Sonde N°	Unité
	Date		
	Heure		
ATELIER	Ambiance		°C
	Bord dalle		°C
	Milieu dalle		°C
GARAGE	Ambiance		°C
	Bord dalle		°C
	Milieu dalle		°C
BUREAU	Dalle		°C
	Ambiance		°C
CHAUDIERE	Compteur	109	kWh
CHAUFFAGE	Départ	103	°C
	Retour	305	°C
SOLAIRE	Compteur	308	kWh
	Vanne 303	303	-
	Vanne 307	307	-
	Départ	308	°C
	Retour	308	°C
	Panneaux	304	°C
E.C.S.	Compteur	306	kWh
BOUILLEUR SOLAIRE	Bas	310	°C
	Haut	306	°C
ENSOLEILLEMENT			W/m2
ACCUMULATION	Drapeau		-
SURCHAUFFE	Drapeau		-
GROUPE BUREAUX	Pompe	601	-
	Départ	603	°C
	Retour	604	°C
GROUPE GARAGE	Pompe	701	-
	Départ	703	°C
	Retour	704	°C
GROUPE ATELIER	Pompe	501	-
	Départ	503	°C
	Retour	504	°C
GROUPE LOCAUX ATELIER	Pompe	401	-
	Départ	403	°C
	Retour	404	°C
GROUPE VENTILATION	Pompe	801	-
	Départ		°C
	Retour		°C
METEO	Text		°C
	RH %		%
	Vent vitesse		km/h
	Vent direction		-

Annexe E : Détail des coûts du raccordement solaire

	réalisé					simplifié complété		simplifié	
	matériel	montage	montage	total		total			
	fr	part	fr	fr	fr/m2	fr	fr/m2	fr/m2	
APPAREILS	18698	0.51	9538	28236	257	11333	103	101	
circulateur	677	0.50	339	1016	9	2000	18 a	9	
compteur de chaleur	5693	0.40	2277	7970	72	0	0 b	0 b	
expansion	736	0.50	368	1104	10	1104	10	10	
cterne récupération	408	0.50	204	612	6	612	6	6	
antigel	1050	0.20	210	1260	11	1260	11	11	
pompe remplissage	489	0.50	245	734	7	734	7	7	
raccords capteurs	4570	1.00	4570	9140	83	0	0 d	0 d	
échangeur chauffage	2424	0.20	485	2909	26	2909	26	26	
échangeur chauf.-eau	2262	0.20	452	2714	25	2714	25	25	
transfert ch.- eau	389	1.00	389	778	7	0	0 e	7	
TUYAUTERIE	8684	0.30	2637	11321	103	11321	103	103	
conduites	2637	1.00	2637	5274	48	5274	48	48	
calorifugeage	6047		0	6047	55	6047	55	55	
ROBINETTERIE	3968	1.00	3968	7936	72	2970	27	24	
vannes d'arrêt	916	1.00	916	1832	17	584	5 c	5 c	
vannes d'équilibrage	925	1.00	925	1850	17	0	0 f	0 f	
compensateur dilatat.	934	1.00	934	1868	17	0	0 e	0 e	
remplissage	220	1.00	220	440	4	440	4	4	
épurateur	168	1.00	168	336	3	336	3	0 e	
therm.vid.purge,	805	1.00	805	1610	15	1610	15	15	
REGULATION	0		862	862	8	3500	32	8	
vannes, capteurs	0		862	862	8	1500	14 a	8	
tableau électrique	0		0	0	0	2000	18 a	0	
CHAUFFE-EAU	0		0	0	0	4000	36 a	0	
TOTAL	31350	0.54	17005	48355	440	33124	301	236	
offre montage		0.54	16960						
surface capteurs	110 m2								
COMMENTAIRES	a: à inclure pour être représentatif								
	b: pas indispensable								
	c: trop nombreuses								
	d: inclus avec les capteurs								
	e: évitable								
	f: inutile								

Plancher solaire direct

Table de dimensionnement Energie fournie par le PSD [MJ/m2/an]

valeurs normées à la température ambiante minimum

(Energie fournie par le PSD comptabilisée si $T_{amb} \leq T_{mini}$)

Météo	LAUSANNE
-------	----------

Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison	Vertical			45°			horizontal
			Orientation	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
			S relative							
Demande	T ambiante	Epaisseur dalle	S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
76	12	0.15	2.5	2	1	1	3	1	1	1
76	12	0.15	10	37	14	18	43	24	24	24
76	12	0.15	35	72	36	48	72	53	54	53
76	12	0.2	2.5	10	0	0	10	6	7	6
76	12	0.2	10	47	16	23	43	23	23	23
76	12	0.2	35	72	35	47	72	53	54	53
76	12	0.3	2.5	11	6	6	10	6	6	6
76	12	0.3	10	41	17	23	47	23	23	23
76	12	0.3	35	72	35	47	72	47	54	53
251	18	0.15	2.5	8	0	1	9	1	6	6
251	18	0.15	10	30	13	16	41	22	22	22
251	18	0.15	35	129	51	57	157	85	77	83
251	18	0.2	2.5	4	3	3	10	4	4	4
251	18	0.2	10	32	10	17	47	17	25	23
251	18	0.2	35	134	53	67	159	88	89	89
251	18	0.3	2.5	5	4	4	10	3	4	4
251	18	0.3	10	31	10	16	46	17	22	18
251	18	0.3	35	128	53	63	156	88	89	89
326	20	0.15	2.5	3	1	1	6	1	2	2
326	20	0.15	10	34	13	13	51	25	25	25
326	20	0.15	35	146	70	71	194	111	104	111
326	20	0.2	2.5	4	3	4	5	4	4	4
326	20	0.2	10	32	12	18	51	27	28	27
326	20	0.2	35	153	68	81	206	114	122	123
326	20	0.3	2.5	4	3	3	5	4	4	4
326	20	0.3	10	32	12	18	51	27	28	26
326	20	0.3	35	152	68	81	202	112	115	122

Plancher solaire direct										
Table de dimensionnement Energie fournie par le PSD [MJ/m2/an]										
<i>valeurs normées à la température ambiante minimum</i>										
<i>(Energie fournie par le PSD comptabilisée si Tamb ≤ Tmini)</i>										
Météo	LOCARNO									
Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison	Vertical			45°			horizontal
			Orientation	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
Demande	T ambiante	Epaisseur dalle	S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
			65	12	0.15	2.5	14	2	2	9
65	12	0.15	10	50	15	16	49	18	20	19
65	12	0.15	35	63	44	52	62	55	56	55
65	12	0.2	2.5	19	7	7	16	7	7	7
65	12	0.2	10	50	15	17	55	19	25	25
65	12	0.2	35	63	44	52	62	55	55	55
65	12	0.3	2.5	20	7	7	17	7	7	7
65	12	0.3	10	50	15	17	55	19	25	19
65	12	0.3	35	62	44	45	62	55	55	55
230	18	0.15	2.5	18	0	0	8	6	6	6
230	18	0.15	10	50	7	13	48	15	16	15
230	18	0.15	35	159	45	48	175	76	72	76
230	18	0.2	2.5	20	2	2	11	8	8	8
230	18	0.2	10	52	11	11	49	17	18	17
230	18	0.2	35	162	47	48	178	73	79	78
230	18	0.3	2.5	20	2	2	12	7	8	8
230	18	0.3	10	52	10	11	50	18	18	18
230	18	0.3	35	162	42	49	177	73	49	78
300	20	0.15	2.5	20	1	1	8	6	6	6
300	20	0.15	10	53	13	16	52	28	24	24
300	20	0.15	35	174	62	60	212	106	92	100
300	20	0.2	2.5	17	2	2	10	6	7	7
300	20	0.2	10	50	15	16	53	24	25	24
300	20	0.2	35	176	62	66	210	101	101	109
300	20	0.3	2.5	17	2	2	10	6	7	7
300	20	0.3	10	50	15	16	52	23	24	24
300	20	0.3	35	173	62	61	209	101	100	103

Plancher solaire direct

Table de dimensionnement Energie fournie par le PSD [MJ/m2/an]

valeurs normées à la température ambiante minimum

(Energie fournie par le PSD comptabilisée si Tamb ≤ Tmini)

Météo **La Chaux-de-Fonds**

Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison Orientation	Vertical			45°			horizontal
				SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
Demande	T ambiante	Epaisseur dalle	S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUES	SUD
140	12	0.15	2.5	4	1	1	11	2	2	2
140	12	0.15	10	62	25	31	80	38	39	38
140	12	0.15	35	139	77	85	138	97	99	97
140	12	0.2	2.5	9	4	4	16	5	5	5
140	12	0.2	10	66	28	35	84	38	45	43
140	12	0.2	35	139	76	85	138	96	101	96
140	12	0.3	2.5	10	5	4	16	5	5	5
140	12	0.3	10	66	28	34	78	38	45	43
140	12	0.3	35	138	76	85	138	96	100	96
360	18	0.15	2.5	5	0	3	10	3	4	4
360	18	0.15	10	46	16	21	65	30	33	33
360	18	0.15	35	193	82	90	240	135	130	129
360	18	0.2	2.5	6	2	2	9	5	6	6
360	18	0.2	10	46	17	22	67	32	36	34
360	18	0.2	35	195	81	98	245	137	139	136
360	18	0.3	2.5	6	2	2	9	4	6	5
360	18	0.3	10	44	17	21	65	32	34	33
360	18	0.3	35	189	76	96	236	133	140	136
440	20	0.15	2.5	6	1	2	10	5	7	6
440	20	0.15	10	49	20	26	75	39	41	41
440	20	0.15	35	211	103	108	279	169	165	176
440	20	0.2	2.5	7	2	2	10	6	6	6
440	20	0.2	10	48	20	26	76	40	43	44
440	20	0.2	35	207	99	118	287	173	177	178
440	20	0.3	2.5	6	2	2	10	6	6	6
440	20	0.3	10	46	20	26	74	39	44	43
440	20	0.3	35	201	96	117	279	164	171	172

Plancher solaire direct**Table de dimensionnement Energie fournie par le PSD [MJ/m2/an]***valeurs normées à la température ambiante minimum**(Energie fournie par le PSD comptabilisée si Tamb ≤ Tmini)*

Météo	KLOTEN
--------------	---------------

Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison	Vertical			45°			horizontal
				Orientation	SUD	EST	OUES	SUD	EST	OUES
			S relative							
Demande	T ambiante	Epaisseur dalle	S relative	SUD	EST	OUES	SUD	EST	OUES	SUD
100	12	0.15	2.5	2	1	1	7	1	1	1
100	12	0.15	10	27	8	7	34	15	14	20
100	12	0.15	35	85	43	31	85	51	43	49
100	12	0.2	2.5	6	5	5	7	5	5	5
100	12	0.2	10	33	14	13	41	23	21	22
100	12	0.2	35	90	41	37	90	51	48	48
100	12	0.3	2.5	6	6	5	6	6	5	6
100	12	0.3	10	32	14	13	41	22	20	22
100	12	0.3	35	85	41	37	90	51	48	48
290	18	0.15	2.5	1	0	0	1	0	0	0
290	18	0.15	10	21	8	7	32	14	13	13
290	18	0.15	35	95	48	42	124	65	71	64
290	18	0.2	2.5	2	0	0	5	1	0	1
290	18	0.2	10	23	11	7	35	18	16	17
290	18	0.2	35	106	58	47	134	82	72	78
290	18	0.3	2.5	1	0	0	3	1	0	1
290	18	0.3	10	23	11	7	34	18	16	17
290	18	0.3	35	102	59	48	135	82	72	77
370	20	0.15	2.5	1	0	0	6	4	1	4
370	20	0.15	10	27	18	12	43	29	23	23
370	20	0.15	35	115	75	69	165	104	108	108
370	20	0.2	2.5	2	1	1	8	3	2	3
370	20	0.2	10	28	21	14	48	31	25	29
370	20	0.2	35	129	93	73	185	125	111	125
370	20	0.3	2.5	2	1	1	6	3	2	3
370	20	0.3	10	28	21	13	46	32	24	29
370	20	0.3	35	123	87	73	178	124	110	120

Plancher solaire direct

Résultats des simulations

E brute PSD [MJ/m2/an] / E totale [MJ/m2/an] / Tambiante moy [°C]

Météo LAUSANNE

Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison Orientation S relative	Vertical			45°			horizontal
				SUD	EST	OUEST	SUD	EST	OUEST	
80	12	0.15	2.5	15/88/12.4	10/85/12.3	11/85/12.3	19/92/12.5	12/87/12.4	13/88/12.4	13/88/12.4
80	12	0.15	10	54/93/12.6	27/89/12.4	28/86/12.3	67/100/12.8	40/91/12.5	39/90/12.5	40/92/12.5
80	12	0.15	35	162/166/14.9	86/126/13.6	87/115/13.3	190/194/15.8	122/144/14.2	116/138/14	122/144/14.2
80	12	0.2	2.5	16/81/12.2	11/86/12.3	11/87/12.4	20/85/12.3	13/83/12.2	14/83/12.2	14/84/12.3
80	12	0.2	10	57/86/12.3	27/87/12.4	30/83/12.3	69/102/12.9	40/93/12.6	41/94/12.6	43/96/12.6
80	12	0.2	35	170/173/15.1	88/128/13.7	98/126/13.6	202/205/16.2	126/149/14.4	130/152/14.5	131/154/14.5
80	12	0.3	2.5	16/81/12.2	11/80/12.1	11/81/12.2	20/85/12.3	13/83/12.2	14/83/12.2	14/84/12.3
80	12	0.3	10	55/90/12.5	27/86/12.3	30/83/12.2	69/98/12.7	40/93/12.6	41/93/12.6	42/95/12.6
80	12	0.3	35	168/171/15.1	86/127/13.7	97/125/13.6	199/202/16.1	122/150/14.4	129/150/14.4	129/152/14.5
260	18	0.15	2.5	9/254/17.7	5/258/17.9	6/259/17.9	11/255/17.8	6/259/17.9	7/255/17.8	7/255/17.8
260	18	0.15	10	36/260/17.9	14/255/17.8	17/255/17.8	46/258/17.9	22/254/17.8	23/255/17.8	22/254/17.8
260	18	0.15	35	136/261/18	57/259/17.9	59/255/17.8	167/264/18.1	89/258/17.9	83/260/17.9	85/256/17.8
260	18	0.2	2.5	9/258/17.9	5/256/17.8	6/256/17.8	11/255/17.8	7/257/17.8	8/257/17.9	7/257/17.9
260	18	0.2	10	37/258/17.9	14/258/17.9	18/255/17.8	49/255/17.8	23/259/17.9	26/255/17.8	24/255/17.8
260	18	0.2	35	144/263/18	56/257/17.8	69/256/17.8	177/271/18.3	91/257/17.9	97/262/18	94/259/17.9
260	18	0.3	2.5	9/258/17.9	5/256/17.8	6/256/17.8	11/255/17.8	7/257/17.8	8/258/17.9	7/257/17.8
260	18	0.3	10	37/259/17.9	14/258/17.9	18/255/17.8	49/257/17.8	23/259/17.9	27/259/17.9	24/260/17.9
260	18	0.3	35	140/266/18.1	56/257/17.8	68/259/17.9	174/272/18.3	91/257/17.8	96/261/18	94/259/17.9
330	20	0.15	2.5	7/328/20.1	4/327/20.1	4/327/20.1	10/328/20.1	5/328/20.1	6/328/20.1	6/328/20.1
330	20	0.15	10	38/329/20.1	17/328/20.1	19/330/20.2	56/329/20.2	27/327/20.1	28/327/20.1	28/327/20.1
330	20	0.15	35	159/338/20.4	75/329/20.2	76/328/20.1	211/341/20.5	120/333/20.3	112/332/20.3	118/331/20.2
330	20	0.2	2.5	7/327/20.1	4/325/20	4/325/20	11/329/20.2	6/326/20.1	7/327/20.1	7/327/20.1
330	20	0.2	10	39/331/20.2	16/328/20.1	21/327/20.1	57/330/20.2	29/326/20.1	32/328/20.1	31/328/20.1
330	20	0.2	35	166/337/20.4	73/329/20.2	87/330/20.2	223/341/20.6	123/334/20.3	128/330/20.2	130/331/20.2
330	20	0.3	2.5	7/327/20.1	4/325/20	4/325/20	11/329/20.2	6/326/20.1	7/327/20.1	6/327/20.1
330	20	0.3	10	39/332/20.2	16/329/20.2	21/327/20.1	57/331/20.2	29/327/20.1	32/328/20.1	31/329/20.2
330	20	0.3	35	165/337/20.4	73/329/20.1	87/330/20.2	220/342/20.6	120/332/20.3	125/334/20.3	129/331/20.2

Plancher solaire direct

Résultats des simulations

E brute PSD [MJ/m2/an] / E totale [MJ/m2/an] / Tambiante moy [°C]

Météo	LOCARNO	Inclinaison		Vertical			45°			horizontal	
		T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Orientation S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST		OUEST
65		12	0.15	2.5	16/67/12.1	10/72/12.3	10/72/12.3	19/74/12.3	12/74/12.3	12/74/12.3	12/75/12.3
65		12	0.15	10	61/76/12.4	23/73/12.3	24/73/12.3	71/87/12.8	34/82/12.6	35/80/12.5	36/81/12.6
65		12	0.15	35	174/176/15.8	80/100/13.2	81/95/13	200/202/16.7	113/123/14	111/120/13.9	114/124/14
65		12	0.2	2.5	17/62/11.9	10/68/12.1	10/68/12.1	20/68/12.1	12/70/12.2	12/70/12.2	12/70/12.2
65		12	0.2	10	61/76/12.4	24/74/12.3	24/73/12.3	73/82/12.6	34/80/12.5	36/75/12.4	37/77/12.4
65		12	0.2	35	176/179/15.9	80/100/13.2	84/97/13.1	204/207/16.9	115/124/14	115/125/14	119/128/14.2
65		12	0.3	2.5	16/62/11.9	10/68/12.1	10/68/12.1	19/68/12.1	12/70/12.2	12/69/12.2	12/70/12.2
65		12	0.3	10	60/75/12.4	23/73/12.3	24/72/12.2	71/81/12.6	34/80/12.5	35/75/12.3	36/81/12.6
65		12	0.3	35	174/176/15.8	78/99/13.2	81/101/13.2	201/204/16.8	113/123/14	113/123/14	117/126/14.1
230		18	0.15	2.5	9/221/17.4	4/234/17.8	4/234/17.8	11/233/17.8	6/230/17.6	6/231/17.7	6/231/17.7
230		18	0.15	10	43/223/17.4	12/235/17.8	13/230/17.6	51/233/17.8	19/235/17.8	19/234/17.8	19/235/17.8
230		18	0.15	35	162/234/17.8	49/234/17.8	51/233/17.8	188/244/18.1	80/234/17.8	78/236/17.9	77/232/17.7
230		18	0.2	2.5	9/219/17.3	5/233/17.7	5/233/17.7	11/230/17.7	6/229/17.6	6/229/17.6	6/229/17.6
230		18	0.2	10	42/221/17.3	12/232/17.7	13/232/17.7	51/232/17.7	19/233/17.7	21/233/17.8	20/233/17.7
230		18	0.2	35	163/232/17.7	48/231/17.7	51/233/17.8	192/244/18.1	80/237/17.9	81/233/17.7	82/234/17.8
230		18	0.3	2.5	9/219/17.3	5/233/17.7	5/233/17.7	11/230/17.6	6/229/17.6	6/229/17.6	6/229/17.6
230		18	0.3	10	43/222/17.4	12/232/17.7	13/232/17.7	51/231/17.7	19/232/17.7	21/233/17.7	20/232/17.7
230		18	0.3	35	160/229/17.6	47/235/17.8	51/232/17.7	189/243/18.1	79/237/17.9	51/232/17.7	80/232/17.7
300		20	0.15	2.5	8/287/19.6	4/302/20.1	4/302/20.1	10/301/20.1	5/298/20	5/298/20	5/298/20
300		20	0.15	10	43/289/19.7	14/300/20	16/299/20	57/304/20.2	24/295/19.9	23/298/20	24/299/20
300		20	0.15	35	174/299/20	67/304/20.2	62/301/20.1	223/310/20.4	109/302/20.1	97/304/20.2	104/302/20.1
300		20	0.2	2.5	7/289/19.7	4/301/20.1	4/301/20.1	11/299/20	5/298/20	6/298/20	5/297/20
300		20	0.2	10	43/292/19.8	14/298/20	15/298/20	58/304/20.2	25/299/20	25/299/20	25/300/20
300		20	0.2	35	177/300/20	64/300/20	68/300/20.1	227/316/20.6	109/306/20.2	106/304/20.2	112/302/20.1
300		20	0.3	2.5	8/289/19.7	4/301/20.1	4/301/20.1	11/299/20	5/298/20	6/298/20	5/298/20
300		20	0.3	10	43/292/19.8	14/298/20	15/298/20	58/304/20.2	24/300/20	25/300/20	25/300/20
300		20	0.3	35	174/300/20	63/300/20	67/305/20.2	224/314/20.5	107/305/20.2	105/304/20.2	110/306/20.2

Plancher solaire direct

Résultats des simulations

E brute PSD [MJ/m2/an] / E totale [MJ/m2/an] / Tambiante moy [°C]

Météo La Chaux-de-Fonds

Demande 380/1 [MJ/m2/an]	T ambiante [°C]	Epaisseur dalle [m]	Inclinaison Orientation S relative	Vertical		45°		horizontal		
				SUD	:EST	:OUEST	SUD		:EST	:OUEST
140	12	0.15	2.5	20/158/12.4	12/153/12.3	13/154/12.3	26/158/12.4	17/157/12.4	18/158/12.4	18/158/12.4
140	12	0.15	10	84/164/12.6	42/159/12.5	45/156/12.4	107/169/12.7	63/167/12.7	63/166/12.6	66/170/12.7
140	12	0.15	35	252/256/15.1	141/206/13.7	141/198/13.5	299/303/16.4	194/239/14.6	188/230/14.4	195/241/14.7
140	12	0.2	2.5	21/153/12.3	13/151/12.2	14/152/12.3	27/153/12.3	17/155/12.3	18/156/12.4	18/156/12.4
140	12	0.2	10	85/161/12.5	42/156/12.4	47/154/12.3	109/167/12.7	63/167/12.7	66/163/12.6	68/167/12.7
140	12	0.2	35	253/256/15.1	138/204/13.7	148/205/13.7	303/307/16.5	193/239/14.6	197/239/14.6	201/248/14.9
140	12	0.3	2.5	20/153/12.3	13/150/12.2	14/152/12.3	26/153/12.3	17/154/12.3	18/155/12.4	18/156/12.4
140	12	0.3	10	84/160/12.5	41/155/12.4	46/154/12.3	107/170/12.8	62/167/12.7	65/162/12.5	68/167/12.7
140	12	0.3	35	249/252/15	136/202/13.6	147/204/13.7	299/303/16.4	190/237/14.6	195/237/14.6	198/244/14.8
360	18	0.15	2.5	10/362/18	6/362/18	6/360/17.9	14/361/18	8/361/18	9/362/18	9/361/18
360	18	0.15	10	54/364/18.1	22/362/18	26/362/18	74/365/18.1	36/362/18	40/363/18	39/362/18
360	18	0.15	35	210/373/18.3	91/366/18.1	99/364/18.1	268/384/18.6	147/368/18.2	143/369/18.2	144/371/18.3
360	18	0.2	2.5	10/360/18	6/361/18	6/360/18	15/362/18	8/360/17.9	9/360/17.9	9/359/17.9
360	18	0.2	10	54/364/18	21/360/17.9	27/361/18	74/364/18	37/361/18	41/361/18	40/362/18
360	18	0.2	35	210/371/18.3	87/362/18	105/364/18	271/383/18.6	146/366/18.1	151/368/18.2	151/371/18.2
360	18	0.3	2.5	11/361/18	6/361/18	6/361/18	15/362/18	8/361/18	9/360/17.9	9/361/18
360	18	0.3	10	53/365/18.1	21/361/18	26/362/18	73/364/18	37/361/18	40/363/18	40/363/18
360	18	0.3	35	205/373/18.3	85/365/18.1	104/364/18	265/385/18.6	144/367/18.1	150/366/18.1	149/370/18.2
440	20	0.15	2.5	9/438/20.1	5/439/20.1	5/439/20.1	13/439/20.1	8/438/20.1	9/438/20.1	8/438/20.1
440	20	0.15	10	54/441/20.1	24/440/20.1	29/439/20.1	82/443/20.2	44/440/20.1	46/440/20.1	46/440/20.1
440	20	0.15	35	226/450/20.4	110/442/20.2	115/443/20.2	308/465/20.8	184/451/20.4	175/446/20.3	187/446/20.3
440	20	0.2	2.5	9/438/20.1	5/439/20.1	5/438/20.1	14/439/20.1	8/438/20.1	8/438/20.1	8/438/20.1
440	20	0.2	10	54/442/20.2	23/439/20.1	29/439/20.1	82/442/20.2	43/440/20.1	47/440/20.1	47/439/20.1
440	20	0.2	35	222/451/20.4	104/440/20.1	124/441/20.2	314/462/20.7	183/445/20.3	188/446/20.3	193/451/20.4
440	20	0.3	2.5	9/438/20.1	5/439/20.1	5/439/20.1	14/440/20.1	8/438/20.1	9/438/20.1	8/438/20.1
440	20	0.3	10	53/443/20.2	23/439/20.1	29/439/20.1	81/442/20.2	43/439/20.1	48/440/20.1	47/440/20.1
440	20	0.3	35	218/452/20.5	102/442/20.2	122/441/20.1	307/463/20.7	177/449/20.4	183/448/20.3	188/452/20.4

Plancher solaire direct

Résultats des simulations

E brute PSD [MJ/m2/an] / E totale [MJ/m2/an] / Tambiante moy [°C]

Météo	KLOTEN	Inclinaison		Vertical		45°		horizontal	
		Orientation S relative	SUD	EST	OUEST	SUD	EST		OUEST
100	12	0.15	15/114/12.4	11/111/12.3	10/110/12.3	18/112/12.3	14/114/12.4	12/112/12.3	14/113/12.4
100	12	0.15	47/120/12.6	27/120/12.6	25/119/12.5	59/125/12.7	37/123/12.7	36/122/12.6	38/118/12.5
100	12	0.15	148/164/13.9	81/139/13.1	81/150/13.5	176/191/14.7	107/157/13.7	111/169/14	112/164/13.9
100	12	0.2	15/109/12.3	12/107/12.2	11/107/12.2	18/113/12.4	14/110/12.3	13/109/12.2	14/110/12.3
100	12	0.2	49/117/12.5	30/118/12.5	27/115/12.4	63/123/12.7	40/119/12.5	39/119/12.5	41/120/12.6
100	12	0.2	158/169/14	95/155/13.6	86/150/13.5	190/201/15	124/173/14.2	118/171/14.1	124/176/14.3
100	12	0.3	15/109/12.3	12/107/12.2	11/106/12.2	18/113/12.4	14/109/12.3	13/109/12.2	14/110/12.3
100	12	0.3	49/117/12.5	30/117/12.5	27/115/12.4	62/122/12.6	40/118/12.5	38/119/12.5	41/120/12.6
100	12	0.3	155/171/14.1	94/154/13.6	85/149/13.5	188/198/14.9	122/172/14.2	117/170/14.1	122/174/14.2
290	18	0.15	7/294/17.8	5/293/17.8	5/293/17.8	10/296/17.9	7/295/17.8	6/294/17.8	7/294/17.8
290	18	0.15	29/296/17.9	17/297/17.9	13/295/17.8	38/294/17.8	23/297/17.9	19/294/17.8	20/294/17.8
290	18	0.15	111/304/18.1	55/295/17.8	52/298/17.9	141/305/18.1	74/297/17.9	79/297/17.9	74/298/17.9
290	18	0.2	8/294/17.8	5/293/17.8	5/293/17.8	11/294/17.8	7/294/17.8	6/294/17.8	7/294/17.8
290	18	0.2	31/295/17.8	18/295/17.8	14/294/17.8	42/296/17.8	26/296/17.9	21/293/17.8	23/294/17.8
290	18	0.2	119/301/18	68/298/17.9	54/295/17.8	155/308/18.2	92/298/17.9	84/299/18	87/297/17.9
290	18	0.3	7/294/17.8	5/293/17.8	5/293/17.8	10/295/17.8	7/294/17.8	6/294/17.8	7/294/17.8
290	18	0.3	31/296/17.9	18/296/17.8	14/294/17.8	42/296/17.9	26/296/17.9	21/294/17.8	23/294/17.8
290	18	0.3	118/303/18.1	68/297/17.9	54/294/17.8	153/306/18.2	92/298/17.9	83/299/17.9	86/297/17.9
370	20	0.15	6/372/20.1	5/372/20.1	4/371/20.1	10/372/20.1	8/371/20.1	6/373/20.2	7/370/20.1
370	20	0.15	32/373/20.2	23/372/20.1	17/372/20.1	48/372/20.2	32/371/20.1	27/371/20.1	29/373/20.2
370	20	0.15	129/381/20.4	80/373/20.2	74/373/20.2	182/385/20.5	111/374/20.2	116/375/20.2	114/373/20.2
370	20	0.2	6/372/20.1	5/371/20.1	4/371/20.1	11/370/20.1	8/372/20.1	7/372/20.2	8/372/20.1
370	20	0.2	35/373/20.2	25/371/20.1	18/371/20.1	54/373/20.2	36/372/20.1	30/373/20.2	34/372/20.1
370	20	0.2	142/381/20.4	103/378/20.3	79/373/20.2	206/388/20.6	142/385/20.5	125/381/20.4	139/381/20.4
370	20	0.3	6/372/20.1	5/371/20.1	4/370/20.1	10/371/20.1	8/372/20.1	7/372/20.2	8/372/20.1
370	20	0.3	34/373/20.2	25/372/20.1	17/372/20.1	53/374/20.2	37/373/20.2	30/373/20.2	34/372/20.2
370	20	0.3	140/384/20.5	102/381/20.4	78/373/20.2	202/392/20.7	141/384/20.5	123/381/20.4	136/383/20.5