



**Fondation
Universitaire
Luxembourgeoise**

Association sans but lucratif

RAPPORT FINAL SCIENTIFIQUE

Volet :

Contrat : E / VII / 4.2.

MESURES DE PERFORMANCES
DES INSTALLATIONS SOLAIRES
EXISTANT EN BELGIQUE (PARTIE WALLONNE)

FONDATION UNIVERSITAIRE LUXEMBOURGEOISE

J. BOUGARD

Responsable de l'Unité de recherche

E. MASSIN

Chercheur

Mars 1983

Mesures de performances des installations solaires existant en Belgique (partie wallonne)

IV. 1. Boucles d'eau de calibration et d'étalonnage d'instruments de mesure, nécessaires au contrôle thermique des bâtiments.

1. 1. Introduction

1. 2. Description des boucles

2.1.

2.2. Principe de fonctionnement

2.2.1. Boucle des températures

2.2.2. Boucle de calibration des débitmètres et compteurs de chaleur

2.3. Eléments mécaniques des boucles

2.3.1. Boucle des températures

2.3.2. Boucle de calibration des compteurs d'eau et de chaleur

2.4. Contrôle et appareils de mesure

1. 3. Calibration des sondes

3.1. Types de sondes

3.2. Méthode de mesure

3.3. Résultats d'essais

1. 4. Conclusions

IV. II. Production d'eau chaude par l'énergie solaire

IV. 1. Généralités

IV. 2. Dimensionnement général (25 installations analysées).

2.1. Schéma de principe

2.1.1. Schéma de principe tel qu'étudié par le C.S.T.E.

2.1.2. Variantes du circuit primaire

2.1.3. Système de vidange automatique

2.1.4. Cas particulier : chauffe-eau électro-solaire

2.2. Paramètres du chauffe-eau solaire

2.2.1.

2.2.2.

2.3. Niveau d'appoint énergétique

IV. 3. Performances énergétiques et fiabilité des installations.

3.1.

3.2. Résultats globaux

3.2.1.

3.2.2. Maximiser le rendement des collecteurs et d'utilisation de l'énergie solaire incidente

3.2.3. Maximiser la fraction solaire assurée par l'installation

3.2.4. Fiches techniques

3.2.4.1.

3.2.4.2. Coûts d'utilisation et de dimensionnement

3.2.4.3. Coûts d'installations

3.2.4.4. Fiabilité, vieillissement des installations solaires existantes

IV. 4. Conclusions

IV. III. chauffage solaire de l'habitat: état actuel en Wallonie.

IV. 1. Généralités

IV. 2. Systèmes solaires actifs à "eau".

2.1. Principes de base

2.1.1. Contraintes

2.1.2. Premières expériences (capteurs cuivres)

2.1.3. Capteurs intégrés à la toiture

A. Système le plus utilisé

B. Autres cas de toiture solaire intégrée

B.1. Monnaie

B.2. Grez-Doiceau, Brueghe, Waterloo

Maison Gillet à Grez-Doiceau

p. 82

Maison Thomas à Brueghe

p. 87

Maison CHED à Waterloo

p. 90

IV. 3. Systèmes solaires actifs à l'air.

3.1. Waterloo

3.2. Maison Lambour à Alost

3.3. Maison prototype de Soleil à Waltzing

IV. 4. Conclusion

IV. IV. Mesures "in situ" entrepris par l'Unité de recherche.

IV. 1. Principe de mesure adopté

1.1. Objectifs

1.2.

1.3.

IV. 2. Installation de production d'eau chaude dans une maison unifamiliale du Foyer Gambon (p. 107)

2.1. Description de l'installation

2.2. Mesures

2.3. Tableau des résultats mensuels globaux

2.4. Conclusions

IV. 3. Installation de production d'eau chaude + appareil chauffage dans un logement de la Sorelbo à Colfontaine

3.1. Généralités

3.2. Description de l'installation

3.3. Mesures

3.4. Analyse des mesures

IV. 4. Maison Gillet à Grz. Poicou (p. 129)

4.1. Principe du suivi scientifique adopté

4.2. Présentation de l'installation

4.2.1. Généralités

4.2.2. Chauffage solaire "basse température"

4.3. But des mesures

4.4. Sondes de mesure utilisées

4.5. Présentation des résultats

4.6. Sondes et appareils de mesure fournis par l'Unité de recherche

4.7. Résultats

IV. 5. Chauffage solaire de piscine.

IV. Bâtiments FUL. Première phase.

I. 1. Introduction

I. 2. Buts de l'instrumentation scientifique

I. 3. Diagramme énergétique.

3.1.

3.2.

3.3. Principe des mesures des flux du diagramme énergétique

I. 4. Capteurs de mesure

4.1. Type, nombre, localisation

4.1.1. Paramètres climatiques

4.1.2. Paramètres collecteurs solaires / distribution de l'énergie vers le local technique

4.1.3. Paramètres de distribution de l'énergie solaire

4.1.4. Paramètres du système "stockage eau"
(accumulateurs primaire et secondaire)

4.1.5. Paramètres du système "pompe à chaleur n° 1"

4.1.6. Paramètres " " " pompe à chaleur n° 2"

4.1.7. Paramètres " " " stockage eau glacé"

4.1.8. Paramètres du stockage en terre

4.1.9. Paramètres du sous-système "utilisation de l'énergie dans les locaux" (partie énergétique "aval").

4.1.10. Divers

4.1.11. Résumé

42. Caractéristiques

42.1. Précision Standard

42.2. Recommandations de placement

42.3. Fréquence de lecture

42.4. Revue des capteurs de mesure

A. Pyranomètre

B. Température

C. Débit massique

D. Capteur de puissance électrique

E. Capteur d'humidité de sol / humidité air

F. Compteur électriques ou énergie active

43. Mode de fonctionnement. Quelques principes.

43.6. Mesure des flux du diagramme énergétique

G1. Flux liés au sous-système "climat"

G2. Flux " " " " " collecteurs solaires "

G3. Flux " " " " " distribution de l'énergie solaire vers le local technique "

G4. Flux liés au sous-système "distribution de l'énergie solaire vers les stockages "

G5. Flux liés au sous-système "stockage eau : accumulateurs primaire et secondaire "

G6. Flux liés au sous-système "pompe à chaleur n°1"

GC1.

GG2. Calcul des flux énergétiques

G7. Flux liés au sous-système "pompe à chaleur n°2 "

G8. Flux " " " " " stockage d'eau glacée "

6.9. Flux liés au sous-système "stockage en terre"

6.9.1.

6.9.2.

6.10. Flux liés au sous-système "utilisation en locaux : partie énergétique "aval"".

6.11. Résumé

7. Analyse des performances thermiques

7.1. Données disponibles

7.2.

7.3. Energie totale fournie aux accumulateurs primaire et secondaire pour le chauffage

7.4. Energie fournie en "froid" à l'accumulateur d'eau froide

7.5. Stockages dans le sol

7.6. Coefficient de performance et rendement relatif à la collecte et à la distribution de l'énergie solaire

7.7. Coefficients d'exploitation énergétique globaux (chaud et froid confondus)

7.8. Bilans et coefficients de performance de la pompe à chaleur n° 2.

7.9. Bilans et coefficients de performance de la pompe à chaleur n° 1.

8. Système d'aquisition de données

9. Équipement complémentaire. Bâtiment FUL. 1ère phase

10. Conclusions

II. III. Liste des rapports techniques codifiés et références

III. Annexes

Annexe 1

Calcul des performances d'installation solaire
de production d'eau chaude sanitaire

Annexe 2

chauffage solaire et stockage d'énergie
à la FUL : première expérience belge
de grande ampleur

IV.

I. BOUCLES D'EAU DE CALIBRATION ET D'ETALONNAGE D'INSTRUMENTS

DE MESURE NECESSAIRES AU CONTRÔLE THERMIQUE DES BÂTIMENTS.

I.1. INTRODUCTION.

I.1.1. Un contrat d'instrumentation a été passé entre la Fondation Universitaire Luxembourgeoise et les Services de Programmation de la Politique Scientifique en vue de développer une campagne de mesures *in situ* des performances des installations solaires existant en Belgique. Le premier objet d'instrumentation est d'ailleurs la *phase 1* de construction de laboratoires et bureaux à la F.U.L. dont le système de chauffage a été choisi, étudié et proposé par le bureau d'études Latran à Arlon.

Pour toute installation solaire expérimentée, les capteurs de mesure seront placés selon la procédure proposée par E. Streed du National Bureau of Standard /30/ de façon à établir le bilan thermique global de l'installation solaire en partant de l'évaluation des bilans thermiques de chacun des sous-systèmes qui la composent.

L'objectif poursuivi par l'instrumentation d'un bâtiment est d'obtenir un bilan thermique global avec une précision de $\pm 10\%$ pour une période de temps telle que le stockage de chaleur dans chaque sous-système soit négligeable (excepté pour les sous-systèmes qui sont par leur fonction même un stockage de chaleur) : un mois pourrait constituer cette période de temps.

Il s'agit dès lors tout autant de définir les divers instruments à placer (caractéristiques générales, précisions, résolution, sensibilité, etc.) que de choisir un système d'acquisition automatique de ces données selon des séquences à déterminer.

I.1.2. Le tableau suivant, en même temps qu'il présente le type de mesures effectuées sur des installations solaires, définit la précision demandée pour chacune des mesures effectuées.

PRECISION STANDARD /31/

ELEMENT	PRECISION PROPOSEE : LIMITE MAXIMUM
Système solaire global	± 10 %
Solarimètre	± 5 %
Mesure de température :	
– absolue	0,1°C
– différentielle	0,05°C
Débit de fluide (liquide, air ...)	± 2 %
Flux de chaleur	± 2 %
Consommation électrique	± 2 %
Chauffage auxiliaire non électrique	± 2 %

Il ressort de ce tableau qu'il convient de minimiser toutes les sources d'erreur.

Les instruments de mesure doivent dès lors répondre aux critères suivants :

- sélection des instruments adéquate;
- technique d'installation standardisée;

- procédure de calibration uniforme et définie;
- limites de précision déclarée;
- contrôle de calibration sur le site même.

Il est donc indispensable de réaliser en laboratoire, sur des boucles dimensionnées à cet effet, la calibration et l'étalementage des différentes sondes nécessaires au contrôle thermique du bâtiment.

Dans l'instrumentation liée à des projets mettant en jeu l'énergie solaire, il faut noter la nécessité de maîtriser deux paramètres très importants, la température et le débit des fluides, ainsi qu'un paramètre qui est la conjonction des deux précédents : la quantité de chaleur. La précision obtenue sur ces deux paramètres est fondamentale dans la validité des bilans thermiques. Si on admet, par exemple, que le fluide par son passage dans les collecteurs solaires s'échauffe de 5°C, la seule erreur d'un dixième de degré sur les températures à l'entrée et à la sortie des collecteurs peut déjà fausser le bilan thermique de 4 %.

Ceci souligne encore la nécessité de choisir des sondes de température fiables et de les étailler minutieusement. D'autre part, l'utilisation de fluides spéciaux comme le glycol dans les circuits des collecteurs pose des problèmes particuliers dans l'évaluation des débits et des flux de chaleur.

Dès lors, deux boucles de calibration d'appareils de mesure ont été définies :

1°) Boucle de calibration des sondes de température
(thermocouple, Pt 100).

2°) Boucle de calibration et d'étalementage des compteurs d'eau
et de chaleur.

A côté de l'eau, l'air est également utilisé comme fluide transporteur et fournisseur d'énergie. La mesure de ces mêmes paramètres sur l'air requiert un appareillage fort différent dont il n'est pas traité ici.

I.2. DESCRIPTION DES BOUCLES.

I.2.1. La boucle de température a satisfait aux exigences suivantes :

- Stabilisation de la température de l'eau à moins de 0.05°C pendant un temps suffisant à la mesure (15 minutes au moins pour tenir compte de l'inertie des sondes).
- Température réglable de 0°C à 100°C.
- Mesure de la température avec une précision meilleure que 0.05°C.
- Débit d'eau variable entre des limites normales pour une installation réelle : de 100 litres par heure à 2 500 litres par heure (cas d'une habitation unifamiliale).

La boucle qui permet de calibrer les débitmètres et les compteurs de chaleur répond aux critères suivants :

- Débit d'eau stable et réglable entre des limites normales (100 litres par heure à 3 000 litres par heure).
- Température de l'eau pouvant être stabilisée entre la température ambiante et 80°C.
- Mesure des débits avec une précision meilleure que 2 %.

I.2.2. Principe de fonctionnement.

I.2.2.1. Boucle des températures.

La figure 1 montre le schéma de la boucle des températures. L'eau envoyée dans la boucle sous l'action de P est maintenue à température constante par le thermostat TH (stabilité : 0.02°C). Un dispositif de refroidissement annexe permet de couvrir la plage de température de 2 à 95°C . Le débit est réglé au moyen des vannes V et VT1 et peut être contrôlé au moyen du compteur d'eau D. Les sondes à étalonner peuvent être placées dans leur doigt de gant dans les positions T1 à T6 du schéma. Ce dispositif permet de calibrer les sondes de température dans les tuyauteries dans différentes conditions de débit en référence à une sonde étalon (th) placée dans le thermostat, pour une position et un doigt de gant donnés.

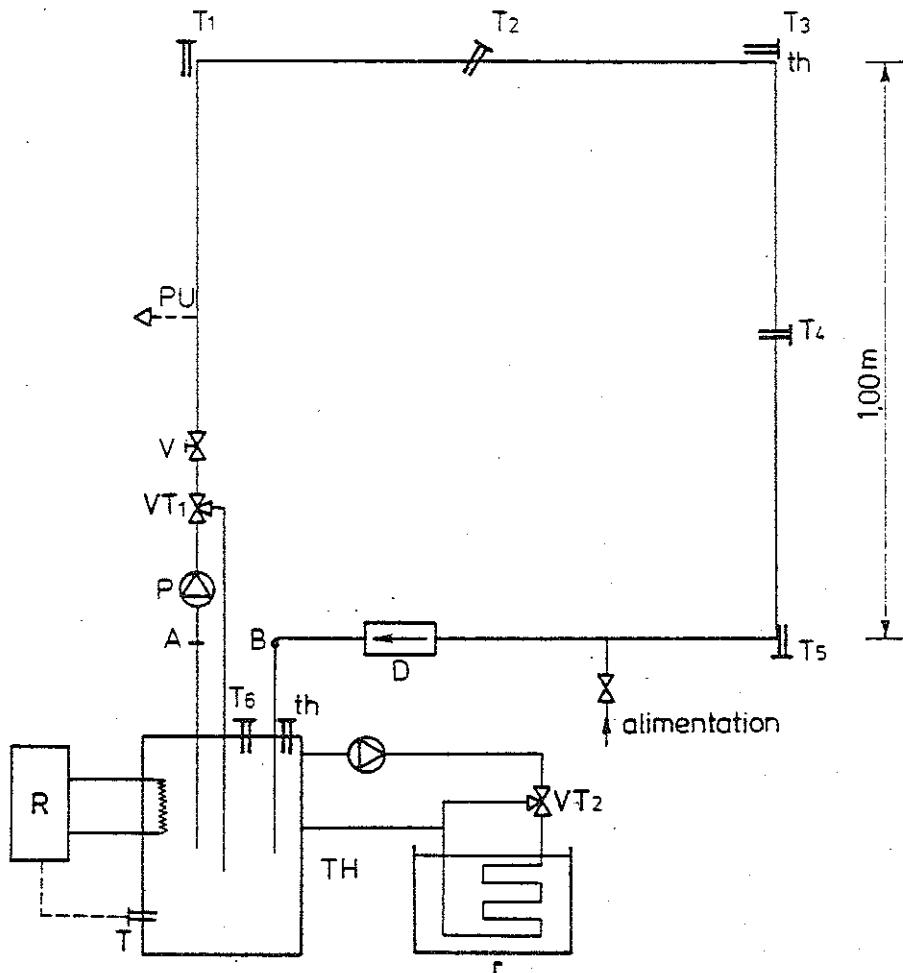
I.2.2.2. Boucle de calibration des débitmètres et compteurs de chaleur.

La figure 2 en montre le schéma.

— CALIBRATION DES COMPTEURS D'EAU.

L'eau circule dans la boucle sous l'action de la pompe P1 et est chauffée par le réchauffeur d'eau R jusqu'à température souhaitée en T1. Le réchauffeur d'eau est alors arrêté. Le débitmètre D2 est étalonné et calibré en référence au débitmètre étalon D1 (compteur à piston rotatif) pour un débit, une température (T2), une pression d'entrée (M2) donnés. Ces débitmètres fournissent des impulsions que l'on peut totaliser. Le débitmètre étalon D1 a été calibré en notre laboratoire par une méthode d'empotement dans le bac B1 dont la contenance est connue avec précision. Il suffit de compter le nombre de litres

FIGURE 1



D = Débitmètre

T₁ ... T₆ = Sondes de température

TH = Thermostat

R = Régulateur de température du thermostat avec sonde de platine T comme sonde de température

P = Pompe

V = Vanne 2 voies

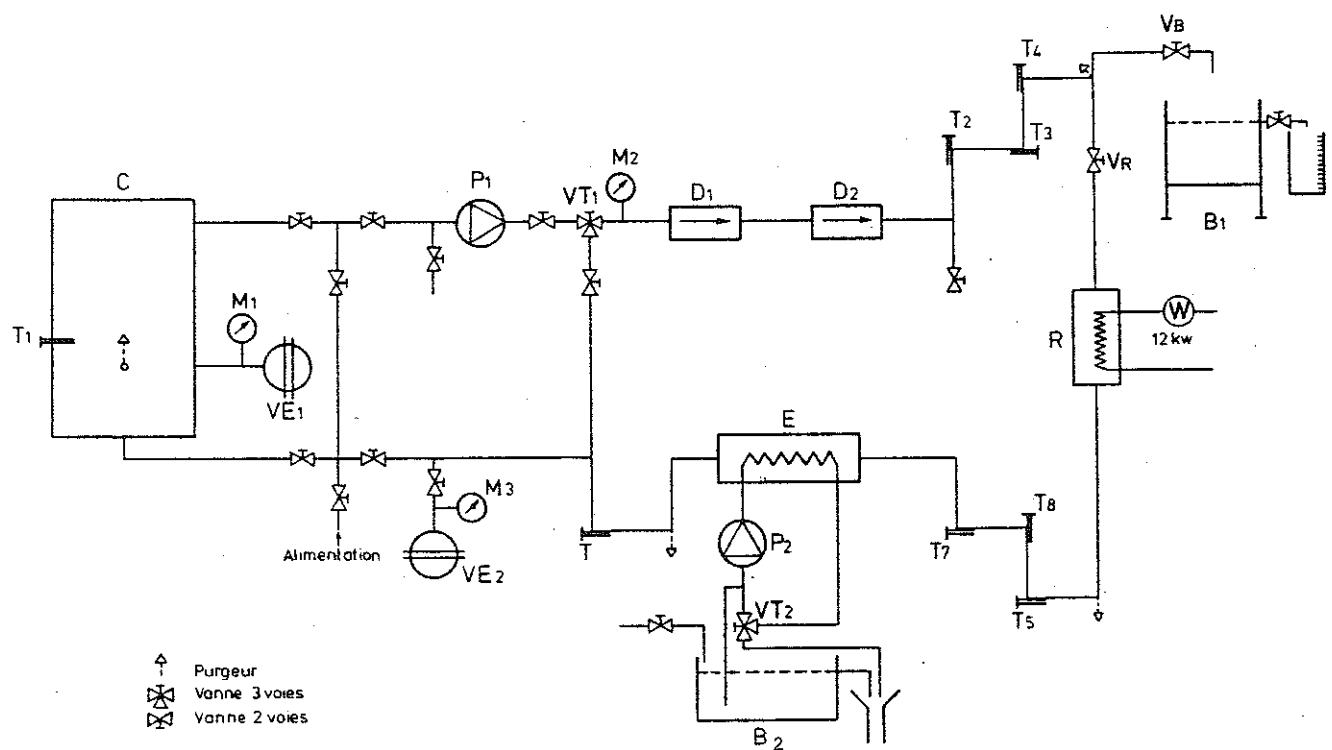
VT = Vanne 3 voies

PU = Purgeur

th = Thermomètre étalon de précision

r = Bac avec échangeur pour refroidissement jusqu'à 2°C

FIGURE 2



C	= Cuve
T_i	= Températures
M_1, M_2	= Manomètres
VE_1, VE_2	= Vases d'expansion
P_1, P_2	= Pompe de circulation
VT_1, VT_2	= Vanne 3 voies
D_1, D_2	= Débitmètres
B_1, B_2	= Bacs
E	= Echangeur
R	= Réchauffeur d'eau
W	= Wattheuremètre

débités et le contenu de l'éprouvette de trop-plein pour pouvoir contrôler le compteur d'eau pour une donnée de température et de débit. On peut balayer toute la plage des débits de 0 au débit maximum de la pompe en jouant sur la position de la vanne 3 voies VT1.

— CALIBRATION DES COMPTEURS DE CHALEUR.

La calibration des compteurs de chaleur nécessite la création d'un gradient de température fixe et d'un débit stable. L'eau circule dans la boucle sous l'action de la pompe P1 et est chauffée dans le réchauffeur d'eau R dont la puissance est variable. Elle est refroidie jusqu'à la température de départ par l'échangeur E. Le stockage C permet d'amortir les variations thermiques à la sortie de l'échangeur. Le compteur de chaleur à calibrer est constitué du compteur d'eau D2 ainsi que des sondes de température T4 et T5, par exemple.

Le compteur D1 et les autres sondes de température sont des références de contrôle. D'autre part, la quantité d'énergie fournie par le réchauffeur est mesurée par watt-heuremètre. Le secondaire de l'échangeur est alimenté par la pompe P2 qui puise dans le bac B2 et sur l'eau de retour de l'échangeur. Le bac B2 est alimenté par l'eau du réseau et est maintenu à niveau constant par trop-plein.

La calibration des compteurs de chaleur se fait :

- par contrôle de la consommation électrique lire aux watts-heuresmètres;
- par comparaison aux sondes étalons disposées dans la boucle;
- par comparaison avec un compteur de chaleur performant calibré préalablement par les méthodes ci-dessus.

— BANC_D'ESSAI ET DE SIMULATION.

Cette boucle d'eau peut être utilisée pour simuler le comportement réel d'une installation de chauffage. Le réchauffeur d'eau R simule l'apport calorifique de l'élément chauffant (par exemple, collecteurs solaires, chaudière, ...). Sa puissance étant variable de 0 à 12 kW par pas de 2 kW, il est possible de simuler différents comportements. L'échangeur E permet de simuler les pertes et la charge thermique du bâtiment. Le débit d'eau froide étant variable de façon continue, toutes les situations peuvent être envisagées. Le stockage C simule l'inertie du circuit de chauffage et du bâtiment; il peut également apporter des informations concernant le comportement de stockage d'eau dans le cas du chauffage solaire par exemple. La boucle est également utilisée comme banc d'essai pour la régulation du chauffage : les vannes 3 voies VT1 et VT2 sont motorisées et peuvent être actionnées par un régulateur de façon à s'approcher de consignes de température en différents endroits de la boucle. La présence de sondes de température de précision et de débitmètres permet de contrôler le fonctionnement de la régulation. Enfin, en plus des sondes et des instruments de mesure, la boucle peut également servir au test de réchauffeurs d'eau, d'échangeurs et de matériaux isolants moyennant des modifications simples.

I.2.3. Eléments mécaniques des boucles.

I.2.3.1. Boucle des températures.

- Diamètre des conduites : 5/4 "
- Isolation : 10 cm de laine de verre
- Pompe P Grundfoss Selectic UPS 20 - 45

- VT1 : vanne 3 voies motorisées Landis & Gyr,
Billman x 3 ir $1^{1/4}$
- TH : thermostat Lauda comprenant :
 - Bain thermostatisé NBS-D 8/25, de capacité de 30 litres, muni d'une pompe Duplex assurant un débit de 8 litres par minute pour une hauteur manométrique de 3 m CE.
Large domaine de température : ~ 60 / + 300°C.
Il est équipé d'un relais électronique R2 avec starter automatique de chauffage à pleine puissance et affichage en continu de la puissance de chauffage entre 0 et 2 000 watts maximum.
 - Régulateur PTR 20/2 entièrement électronique utilisant un thermomètre à résistance de platine Pt 22 comme sonde de température. Domaine de température sélectionnable entre - 100 / 0°C; 0° / 100°C; 100° / 200°C; 200° / 300°C (stabilité de température réalisée : 0.02°C).
 - Boîte de protection de surchauffe et de niveau R 32 électronique + commutateur flottant S 300.
- La pompe Duplex du thermostat permet d'envoyer le fluide du thermostat dans un échangeur externe plongé dans un bac parcouru par l'eau de ville et / ou chargé de glace permettant un refroidissement externe de la boucle des températures et la calibration jusqu'à 2°C minimum.
- Emploi d'eau déminéralisée dans la boucle.
- th : thermomètres étalons de précision 0.01°C (matériel fourni par Belgolabo).
- La mesure des températures par thermocouples nécessite une source froide dite "Source de référence". Le zeref thermocouple ICE point, référence Unit Mectron fregistor type 136 réalisant $0^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ a été retenu.

I.2.3.2. Boucle de calibration des compteurs d'eau et de chaleur.

- Diamètre des conduites : 5/4 "
- Isolation : coquille enrobée de kraft aluminium renforcé avec fermeture par couvre-joint adhésif.
Epaisseur : 5 cm.
- P : pompes de circulation
 - P1 = pompes KSB Riomatic A 2 V (1")
 - P2 = pompes KSB Riomatic F 3 V (1^{1/4} ")
- E : échangeur de chaleur tubulaire ARBONIA WT 12

Condition nominale de dimensionnement :
 - primaire - eau à 45°C
 - secondaire - eau à 25°C
 - puissance : 20 000 kcal / h
- R : réchauffeur d'eau AEG DEC 12 (12 kW = 6 x 2 kW) permettant de simuler l'apport calorifique de 40 m² de capteurs solaires
- M : manomètre 0 - 6 bar, sauf M3 : 0 - 4 bar
- VE : vases d'expansion
 - VE1 = vase WEK 30/2
 - VE2 = vase TMT 8/1
- C : cuve de 200 litres, cylindrique

— B : bacs

B1 = bac d'aluminium 150 litres
(500 x 500 x 800 mm, trop-plein à 600 mm)

B2 = bac plastic de 200 litres

— T : sondes de température

— D1 : débitmètre étalon; insensible à la viscosité du fluide.
Il s'agit d'un compteur à piston rotatif avec émetteur
d'impulsions type VZFM-sin 40 mm Aquametro pour eau
glycolée, 0,1 litre par impulsion.
Précision meilleure à 0.3 %.

— D2 : débitmètre à tester

— VT1 { vannes 3 voies identiques à celles de la boucle des
VT2 { températures

I.2.4. Contrôle et appareils de mesure.

Un pupitre électronique a été construit (*) pour commander la boucle de simulation. Ce pupitre est une boîte d'environ 70 x 180 cm. Sur le couvercle a été dessiné le schéma de la boucle; à chaque vanne et chaque pompe sont associés un interrupteur et une diode électroluminescente. Outre l'avantage de présenter la boucle de façon claire et didactique, ces interrupteurs et voyants lumineux servent à la commande des vannes motorisées et des pompes de circulation. Les impulsions provenant des deux débitmètres sont totalisés par des compteurs digitaux à 4 chiffres dont la sortie BCD est disponible à l'avant du

(*) Par Jacques NICOLAS, Ingénieur, Chercheur F.U.L..

tableau (voir figure 3). Ces compteurs peuvent être manuellement remis à zéro et leur contenu mis en mémoire (voir figure 4). Grâce à une horloge à quartz, le temps entre 2 impulsions successives peut être affiché en centième de seconde, ce qui permet d'avoir immédiatement une idée du débit instantané.

Les 6 résistances électriques du réchauffeur d'eau sont alimentées via 6 compteurs classiques d'énergie électrique à disque. Grâce à un dispositif de photo-diode / photo-transistor, cette énergie peut être totalisée dans 6 compteurs d'impulsions du même type que ceux décrits plus haut. On peut également chiffrer le temps entre 2 impulsions de façon à connaître la puissance électrique consommée par les résistances. La hauteur d'eau dans la cuve est également affichée en millimètres sur le tableau. La figure 5 montre le schéma de principe de cette mesure digitale dont le senseur initial est un potentiomètre calé sur l'arbre d'un petit treuil.

I.3. CALIBRATION DES SONDES.

I.3.1. Types de sondes.

En principe, toutes les sondes de température compatibles avec les dimensions des tuyauteries peuvent être testées. Jusqu'à présent, plusieurs types de sondes ont été calibrées en laboratoire :

— Thermomètres à résistance :

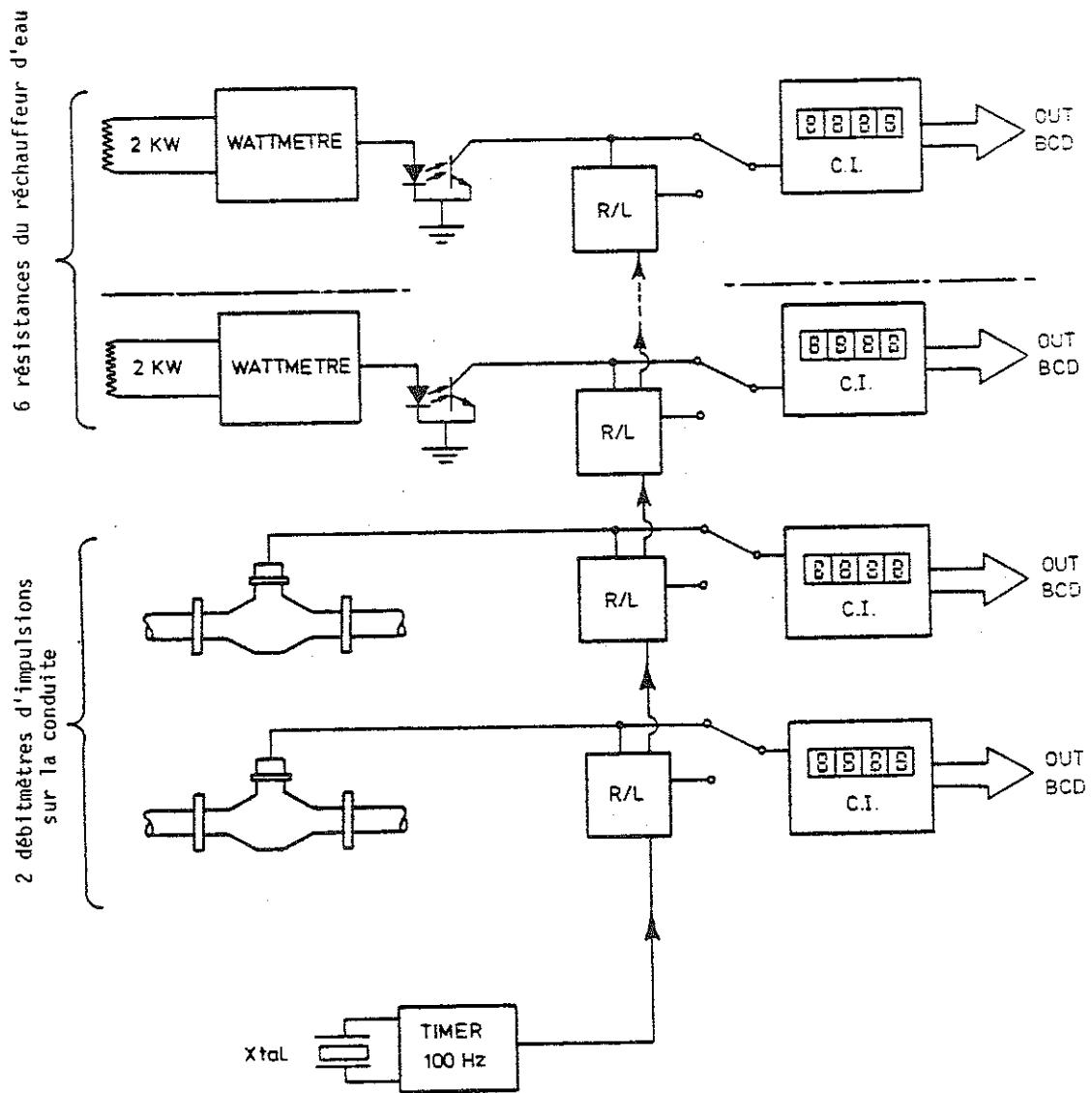
- Résistances de platine 100Ω à 0°C et $.385 \Omega / {}^\circ\text{C}$

ou $1\ 000 \Omega$ à 0°C et $3.85 \Omega / {}^\circ\text{C}$

- Résistances à base de cuivre 233Ω à 0°C et $1 \Omega / {}^\circ\text{C}$

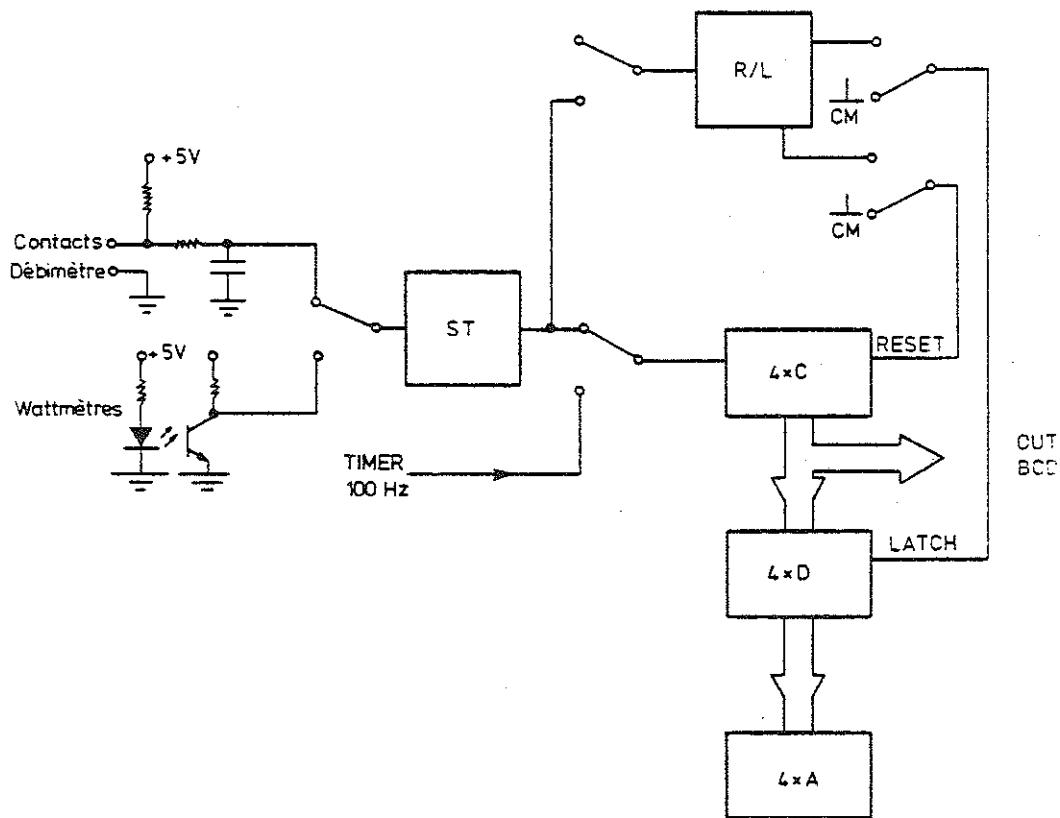
ou $2\ 330 \Omega$ à 0°C et $10 \Omega / {}^\circ\text{C}$

FIGURE 3



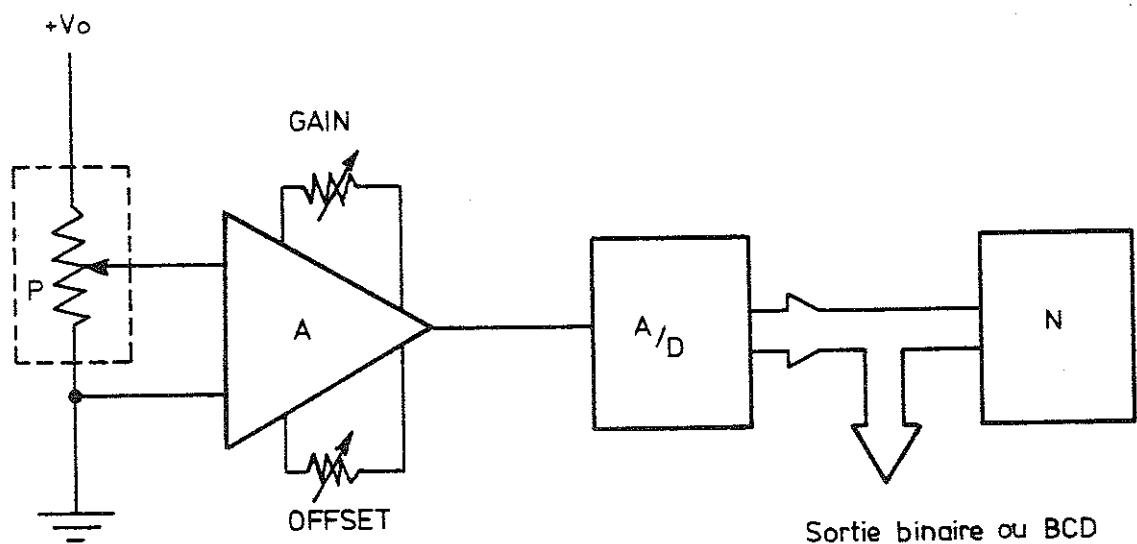
R/L = Commande RESET et LATCH des compteurs digitaux
 C.I. = Compteur d'impulsions

FIGURE 4



ST = Trigger de Schmitt
 R/L = Commande RESET et LATCH
 4xC = 4 compteurs à décade
 4xD = 4 décodeurs-drivers avec mémoire
 4xA = 4 afficheurs 7 segments
 CM = Commande manuelle

FIGURE 5



- A = Amplificateur opérationnel
A/D = Convertisseur analogique - digital
N = Décodeur à afficheur 3 chiffres
P = Potentiomètre de mesure provenant d'un système à flotteur ou autre

— Thermocouples

Cuivre - konstantan dans différentes configurations

— Thermistances

Différents types de 30Ω à 25°C jusqu'à $16 \text{k} \Omega$ à 0°C

— Capteurs monolithiques à semi-conducteurs

fournissant, soit un courant ($1 \mu\text{A} / {}^\circ\text{C}$)

soit une tension (de 2 à 10 mV / ${}^\circ\text{C}$)

En ce qui concerne les débitmètres, plusieurs types ont été calibrés : compteurs à turbine ou à piston rotatif, émetteur d'impulsions à relais R E E D, à senseur de proximité ou à microswitch.

Nous avons testé leur comportement aux chocs thermiques, leur précision, leur tenue dans le temps, la fiabilité du préétalonnage des impulsions.

Enfin, nous avons testé essentiellement un seul compteur de chaleur jusqu'à présent : le CALEC, d'Aquametro. Il s'agit d'un appareil à microprocesseur qui tient compte non seulement du débit et de la différence de température, mais également de la variation avec la température de la chaleur spécifique et de la densité du fluide utilisé. Cet appareil s'est révélé d'une très bonne précision; c'est pourquoi nous l'utilisons comme étalon.

Nous avons d'ailleurs fait placer plusieurs appareils de ce type sur des installations solaires en fonctionnement dans la partie wallonne du pays / 5 /.

I.3.2. Méthode de mesure.

- Les sondes de température sont calibrées dans la boucle des températures de la façon suivante.

Les sondes sont placées aux endroits désirés sur la boucle (T1 ... T5). La pompe P est mise en marche et les vannes VT1 et V sont réglées de façon à lire le débit désiré sur le débitmètre D. Le régulateur du thermostat TH est réglé sur la température désirée. Dès qu'on approche de cette température, un réglage fin est réalisé en agissant sur le potentiomètre du régulateur et sur la vanne VT2 de l'échangeur de refroidissement. Le thermomètre th est choisi dans la décade correspondant à la température utilisée. Quand cette température est atteinte, on attend environ 15 minutes de stabilisation et on compare la valeur lue sur le thermomètre étalon th à la valeur électrique sortant de la sonde mesurée.

- La calibration du débitmètre étalon D1 se fait par empotement dans le bac B1. La vanne VB est ouverte; la vanne VR est fermée. On compare le nombre d'impulsions émises par D1 à la quantité d'eau réelle qui a traversé le débitmètre. Cette quantité d'eau est égale à la capacité de B1 jusqu'au trop-plein (149 litres) plus le contenu de l'éprouvette graduée.
- La calibration d'un débitmètre quelconque se fait alors par comparaison avec D1.
- Le traitement des résultats de mesure est effectué sur un ordinateur IBM series 1.

I.3.3. Résultats d'essais.

- En ce qui concerne les sondes de température, il s'est avéré que la résistance de platine Pt 100 reste un des standards de mesure les plus fiables pour autant qu'on choisisse une sonde de bonne qualité et qu'on réalise la mesure en 4 fils.
La reproductibilité est de l'ordre du centième de degré et l'écart

de calibration absolue, qui est une mesure de l'interchangeabilité et de la fidélité à l'équation théorique, est de l'ordre de 1 ou 2 / 10ème de degrés.

Les sondes électroniques monolithiques du type L X 5700, LM 3911 ou LM 334 de National Semi Conducteur, A D 590 de Analog Device ou M T S 102 de Motorola, se sont avérées en général très fiables et nettement moins chères que les résistances de platine.

Les avantages de ces sondes sont une bonne reproductibilité, une excellente linéarité et un signal de sortie facilement utilisable pour une mesure extérieure (tension ou courant).

Un inconvénient des sondes monolithiques est qu'elles présentent un très mauvais étalonnage absolu, c'est-à-dire qu'on ne peut garantir leur interchangeabilité à moins de \pm 2 ou 3°C en moyenne. Elles s'avèreront donc très utiles dans les cas où une calibration aura été réalisée.

Les thermocouples sont relativement précis, mais ne sont pratiquement applicables que pour des mesures de laboratoire, puisqu'ils nécessitent la présence d'une source froide si on veut garder une bonne précision. Leur application principale dans le chauffage pourrait être la mesure différentielle de 2 températures où ils restent très pratiques. Enfin, les performances des résistances à coefficient de température négatif (C T N) dépendent très fort de leur type et de leur qualité.

Pour ses qualités de robustesse, bonne précision et fiabilité à long terme, et son bas prix de revient, un modèle de doigt de gant a été conçu, testé et retenu :

- tête de sonde en plastique, permettant le raccordement 4 fils à des circuits électroniques;

- gaine en aluminium;

- diamètre extérieur 8 mm
diamètre intérieur 6 mm

- longueur du doigt de gant = 50 à 100 mm;
 - raccordement aux tuyauteries en G 1/2 "
ou G 3/8 ".
- En ce qui concerne les mesures de débit, on constate que :
- les débitmètres à piston rotatif assurent une précision meilleure que 1 % et même de 0,3 % pour un prix variant de 15 000 à 25 000 francs belges;
 - dans une gamme de prix plus bas, inférieure à 5 000 F.B., les débitmètres à turbine testés laissent apparaître une précision de 2 % dans les meilleurs cas. Certains réagissent très mal aux chocs thermiques et leur qualité semble évoluer dans le temps.
- La calibration des 33 sondes de température Pt 100 Ω 0°C à placer dans la maison solaire de la Faculté Polytechnique de Mons a été réalisée à la F.U.L. par l'unité de recherche / 4 /.

I.4. CONCLUSION.

Deux boucles d'eau de calibration et de simulation ont été réalisées en laboratoire. Elles ont permis de tester un bon nombre de sondes de température, débitmètres, compteurs de chaleur qui seront placés dans les bâtiments dont on veut évaluer les performances thermiques.

IV.

II. PRODUCTION D'EAU CHAUDE PAR L'ENERGIE SOLAIRE.

II.1. GENERALITES.

- Le recensement des installations solaires en fonctionnement en Belgique démontre la part prépondérante occupée par le chauffe-eau solaire dans les applications de l'énergie solaire dans notre climat caractérisé par 1 600 heures d'ensoleillement ($\pm 10\%$) et par un rayonnement solaire global de 1 000 kWh (+ 15 % - 5 %) par m^2 de capteur plan bien orienté et par an.
- La production d'eau chaude constitue à court et moyen terme l'application de l'énergie solaire appelée à connaître le plus grand marché dans notre pays :
 - elle répond à un schéma malgré tout assez classique et sa rentabilité est jugée meilleure étant donné le besoin d'eau chaude réparti sur l'année entière de façon continue, ce qui ne pose pas le problème d'un stockage intersaisonnier;
 - les prix actuels pratiqués : 15 000 ... 25 000 F.B. / m^2 (prix global de l'installation ramené à un m^2 de capteur), font de l'énergie solaire un produit coûteux. Peu de particuliers acceptent un investissement "à risque" supérieur à 100 000 F.B., ce qui limite l'application à quelques m^2 de capteurs et à la production de l'eau chaude.
- Dans une première approche, 25 installations solaires prises au hasard ont été répertoriées pour une première analyse. Elles sont reprises dans le tableau 1. Elles sont relativement jeunes encore : 18 sont postérieures à 1980 et la plus ancienne date de 1977. Ce chapitre en fait le point.

TABLEAU 1

LIEU	S (m ²)	PENTE	ORIEN- TATION	TYPE DE BÂTIMENT	V/S (1/m ²)	M (1/j)	V (1)	TYPE D'APPOINT	PARTICULARITES
Waterloo (1980)	2	45°	S-O	mais. unif.	80	90	160	Dans accumulateur en aval (gaz)	
Jambes (1981)	4	50°	Sud	mais. unif.	50	<u>200</u>	200	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gaz)	
Ottignies (1980)	4	45°	Sud	mais. unif.	50	140	200	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
Dongelberg (1980)	5	27°	S-O	mais. unif.	17	100...150	85 + 150	Electricité de nuit dans accumulateur en aval	capteurs intégrés toiture
Villers-la- Ville (1980)	6	35°	S-E	mais. unif.	50	150	300	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
Bruxelles (1979)	6	34°	Sud	centre de recherche	58.3	< 150	350	Néant	
Ben-Ahin (1980)	6	30°	S-S-O	mais. unif.	58.3	100	350	Par échangeur, serpentin dans la partie supérieure du stockage solaire (gasoil)	
Tilff (1980)	6	50°	Sud	mais. unif.	41.7	100	250	Electricité nuit dans le stockage solaire été sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
La Hulpe (1977)	6	43°	S-S-O	mais. unif.	50	<u>140</u>	300 (+ 100)	Electricité nuit dans accumulateur en parallèle; enclenchement manuel possible de jour	
Ans (1980)	6	45°	S-O	centre de recherche	50	<u>200</u>	300 (+ 200)	Electricité de nuit dans accumulateur en aval	
Limelette (1980)	8	45°	Sud	centre de recherche	25	<u>230</u>	200	Néant	capteurs tuile polyméacryl
Pépinster (1978)	8	33°	Sud	mais. unif.	50	200	400	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
Warmifontaine (1980)	8	45°	Sud	mais. unif.	37.5	100	300	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
Eupen (1980)	8	45	Sud	mais. unif.	81.2	150...200	650	Electricité dans accumulateur en aval (été); sinon serpentins dans stockage solaire gasoil	
Nannine (1979)	8	50°	Sud	mais. unif.	50	200	400 + 200	Electricité, tarif bi-horaire, dans accumulateur solaire même	
Colfontaine (1982)	9.2	60°	S-E	mais. unif.	27.6		290	Echangeur instantané en aval alimenté par l'eau de la chaudière (gasoil)	Capteurs intégrés toiture préchauf. locaux également
Bruxelles (1980)	12	30°	S-E	mais. unif.	33.3	150...200	400	Electrosolaire (été); sinon dans accumulateur en aval (gasoil)	
Harnoncourt (1976-1977)	14	30°	Sud	mais. unif.	92.8	600	300 + 1 000	Dans accumulateur en aval (électricité (été) ou gasoil)	Thermosiphon
Sorinne-la- Longue (1980)	16	45°	O	mais. unif.	40.6	50...300	650	Dans accumulateur en aval (gasoil)	
Genval (1981)	30	45°	Sud	Vestiaire, douches	50	<u>500...600</u>	1 500	Dans accumulateur en aval (gaz naturel)	
Marioie (1980)	32	50°	Sud	imm. appart. (18)	50	<u>850 - 1 400</u>	1 600	Dans accumulateur en aval (gasoil)	
Auderghem (1981)	34	45°	Sud	imm. appart.	51	>> 2 000	1 750	Dans accumulateur en aval (gaz naturel)	
Lasnes (1978)	40	27°	S-O	mais. unif.	28.7		150 + 350 (+ 650)	Dans accumulateur de 650 litres (gasoil)	Capteurs intégrés toiture préchauf. locaux également
Namur (1978)	100	45°	Sud	école hôtelière	40	> 4 000	4 000	Electricité de nuit dans accumulateur en aval	
Forest (1981)	200	45°	S-S-O	imm. appart. (96)	30	2 700	6 000	Par échangeur en aval du stockage (gaz naturel)	

1° Il apparaît qu'il existe en Belgique des installations fiables après deux ans de fonctionnement : des résultats intéressants ont été obtenus. Leur suivi doit être poursuivi dans un triple but :

- Effectuer l'analyse du point de vue énergétique et son évolution dans le temps.
- Contrôler le vieillissement des installations pour établir leur durée de vie technique et dégager les installations fiables à long terme. La tenue des matériaux est cruciale et il convient de poursuivre les recherches en ce sens et d'évaluer les innovations.
- Arriver à tirer le meilleur parti des installations solaires dans notre climat de façon que soient retrouvés dans la pratique les résultats obtenus par les modèles de simulation des installations solaires / 15 /.
Le but ultime est d'arriver à ce que l'utilisateur puisse sélectionner le matériel qu'il désire installer et son utilisation selon des critères objectifs et puisse exiger de son installateur ce qui est nécessaire à la durée de vie de l'installation, notamment l'entretien, le service après vente, la garantie.

2° Il existe beaucoup d'installations qui ont connu bien des déboires, résultats de l'ignorance des installateurs, utilisateurs, architectes, ...

Quelques mauvaises expériences mises en épingle peuvent signifier un retard important dans le développement d'une nouvelle technologie. Les résultats de mesure obtenus et certains principes d'utilisation élémentaires que nous avons dégagés devraient permettre de tirer le meilleur parti des installations solaires dans notre climat.

- Nous avons pu constater que des firmes belges et même wallonnes ont commercialisé leurs installations solaires pour la production d'eau chaude dans les pays en voie de développement.
Ceci démontre que les études et applications réalisées en Belgique ont permis d'ouvrir les portes à un marché beaucoup plus important ... Pour reprendre les paroles du Président d'I.D.E., Monsieur G. Descy : " *L'expérience faite au Rwanda démontre que nous ne devons pas avoir peur de prendre nos responsabilités pour fournir et placer l'équipement de chauffe-eau solaire à plus de 10 000 kilomètres de chez nous* ".
- Le présent chapitre synthétise plusieurs rapports réalisés dans le cadre du présent contrat : / 12 /, / 13 /, / 14 /, / 15 /, / 9, 10, 11 /, / 6 /.

II.2. DIMENSIONNEMENT GENERAL (25 installations analysées).

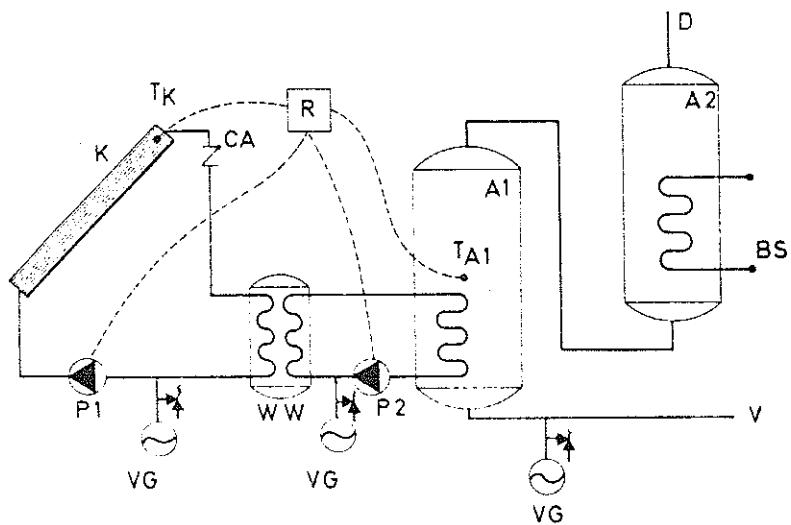
II.2.1. Schéma de principe.

Une utilisation de production d'eau chaude sanitaire utilisant l'énergie solaire répond à un schéma assez classique. La conversion de l'énergie solaire est effectuée à l'aide de collecteurs plans; la circulation forcée du fluide caloporteur permet le transfert de l'énergie captée vers le réservoir de stockage par l'intermédiaire d'un échangeur incorporé au stockage; c'est dans le stockage que l'énergie requise pour l'utilisation est prélevée. L'énergie d'appoint nécessaire, vu le caractère essentiellement variable du rayonnement solaire, permet d'avoir une température constante à l'utilisation quelles que soient les conditions climatiques.

Plusieurs schémas de principe peuvent être distingués :

II.2.1.1. Schéma de principe tel qu'étudié par le C.S.T.C.

FIGURE 6



A1 - A2	Accumulateurs
BS	Chauffage d'appoint (gaz, mazout, électricité)
CA	Clapet antiretour
D	Distribution d'eau chaude
K	Capteurs solaires
P1 - P2	Circulateurs
R	Régulation
V	Alimentation en eau
VG	Groupe de sécurité
WW	Echangeur de chaleur

- L'énergie solaire, absorbée par le capteur K, est amenée par un fluide (eau + glycol) circulant en circuit fermé, vers l'échangeur de chaleur WW où elle est transmise à un second fluide (eau) circulant également en circuit fermé.
- Ce dernier fluide transmet l'énergie solaire à l'eau stockée en A1. L'eau ainsi préchauffée alimente l'accumulateur A2 où elle est mise à température à l'aide d'un moyen classique de production de chaleur (gaz, mazout, électricité).
- La circulation dans les deux circuits fermés est réalisée par les circulateurs P1 et P2 dont la mise en service est commandée par la régulation R. Les circulateurs ne sont mis en service que si la température TK dépasse suffisamment la température TA1 (2 à 5°C).

PARTICULARITES :

- L'échangeur de chaleur, à circulations forcées, est extérieur au stockage solaire et est parcouru par deux fluides en circuit fermé. Ce type d'installation est compatible avec le règlement de l'Association Nationale des Services des Eaux qui interdit l'ajonction de produits antigel dans un circuit hydraulique en contact avec de l'eau potable.
- Inconvénient majeur : le circuit secondaire fermé nécessite donc un serpentin d'échange dans le stockage. La présence de deux échangeurs pour transférer l'énergie solaire à l'eau sanitaire multiplie les sources d'irréversibilités et diminue le rendement de distribution de l'énergie solaire collectée.
- Une installation (Auderghem) a répondu à ce schéma de principe.

- L'installation de Colfontaine est conforme à la règle de l'ANSEAU par un schéma différent lié à la particularité offerte par le stockage à triple enveloppe : l'eau chaude sanitaire occupe la partie intérieure du stockage entourée complètement par une enveloppe d'eau préchauffée elle-même par le circuit solaire pour assurer le chauffage des locaux.

II.2.1.2. Variantes au circuit primaire.

Actuellement, la majorité des installations rencontrées ne sont pas conformes à la norme ANSEAU, de façon à obtenir un échange plus direct des calories au circuit primaire :

- soit usage d'un échangeur tubulaire incorporé au stockage parcouru par le fluide caloporteur (13 installations) : figure 7;
- soit usage d'un échangeur extérieur au stockage dont le circuit secondaire est ouvert et parcouru par l'eau sanitaire (5 installations) : figure 8.

FIGURE 7

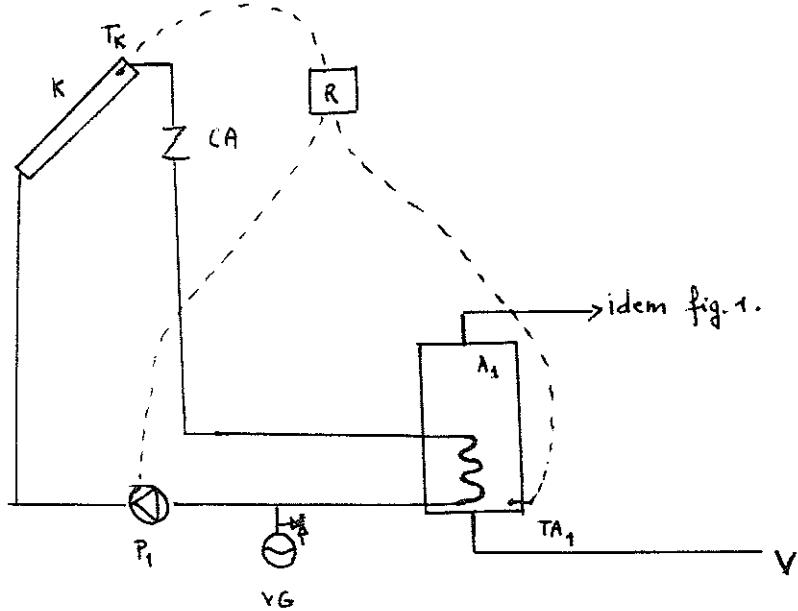
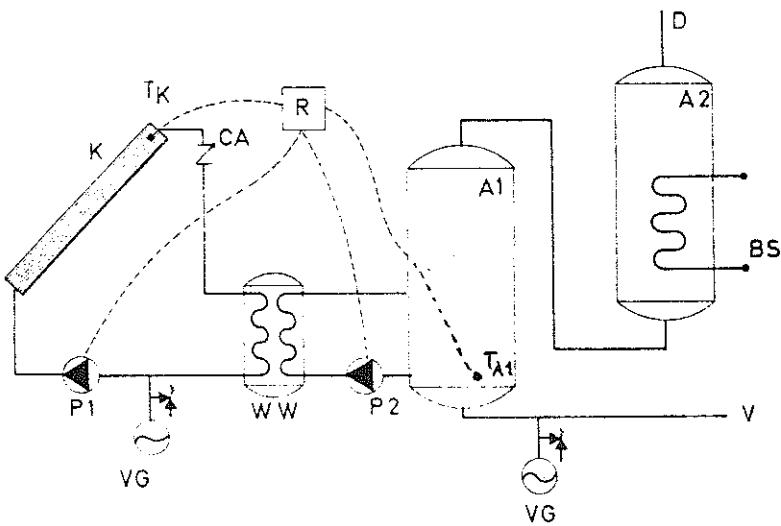


FIGURE 8



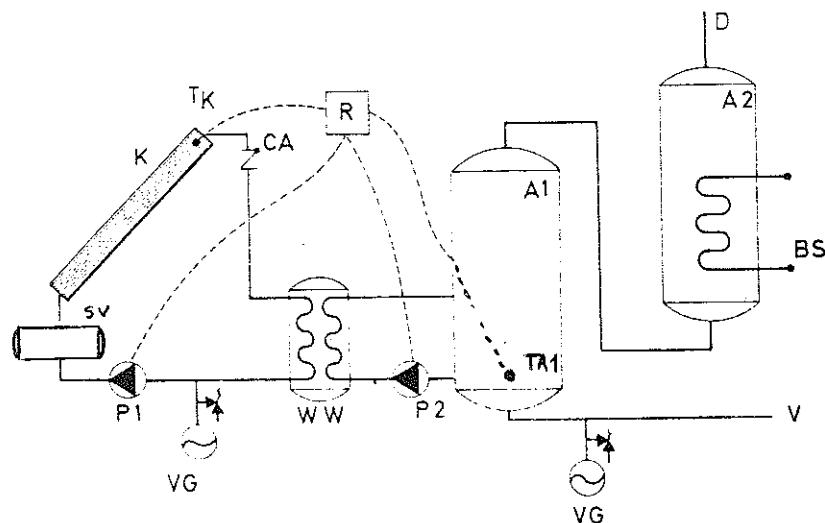
II.2.1.3. Système de vidange automatique (figures 9 et 10).

Quatre installations ont été rendues conformes à la norme ANSEAU par usage d'un réservoir de vidange automatique dans lequel l'eau contenue dans les capteurs est ramenée par gravitation à l'arrêt de l'installation.
(Genval - Ans - Forest - Lasnes).

Les trois premières utilisent un échangeur extérieur au stockage à circulation forcée, la dernière un échangeur tubulaire incorporé au stockage.

Les installations de Genval et Forest sont instrumentées par l'Unerg et leur suivi mérite beaucoup d'attention à cet égard.

FIGURE 9



SV Système vidange automatique

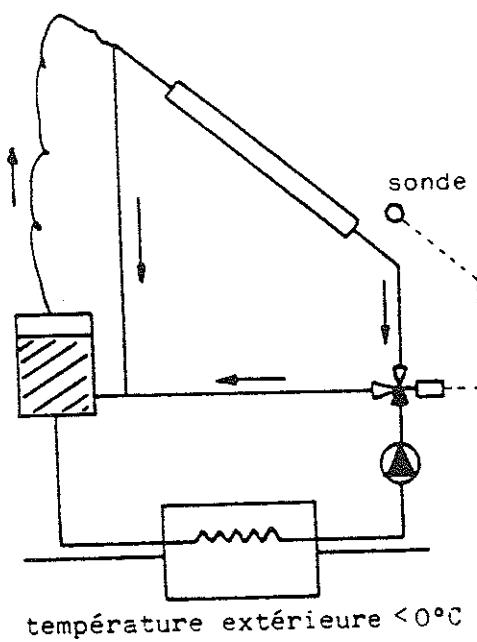
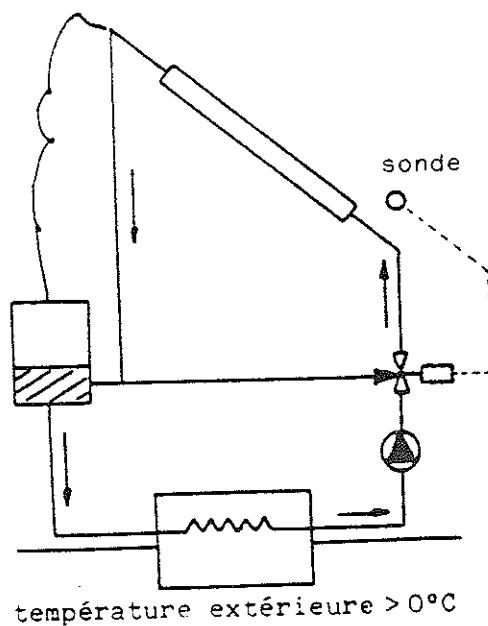
La Faculté Polytechnique de Mons a étudié, construit, testé, un système fiable de vidange automatique fonctionnant même en cas de panne du réseau électrique, dont le réservoir de vidange joue le rôle du vase d'expansion / 15 / (figure 10).

Toutefois, par ce principe, l'eau réoxygénée est plus corrosive et il y a lieu d'évaluer si l'installation ne doit pas nécessairement être réalisée en cuivre.
Il convient d'attendre le suivi dans le temps de ces installations.

REMARQUE

L'installation de Harnoncourt fonctionnant par thermosiphon est conforme à la règle de l'ANSEAU : circuit primaire parcouru par de l'eau et l'installation est arrêtée et vidangée en période hivernale.

FIGURE 10



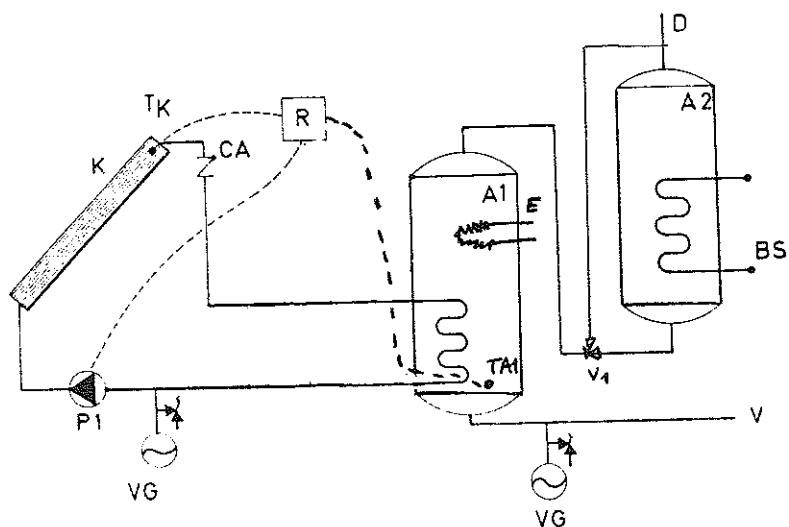
II.2.1.4. Cas particulier : Chauffe-eau électro-solaire
(période estivale).

Avec résistance électrique en direct dans le haut du stockage.

Appoint traditionnel (période hivernale).

Cas de 6 installations.

FIGURE 11



E Résistance électrique d'appoint

V1 Vanne manuelle permettant de
by-passier l'accumulateur d'appoint
(situation été)

II.2.2. Paramètres du chauffe-eau solaire.

II.2.2.1.

Dans le dimensionnement d'un chauffe-eau solaire, les paramètres importants sont :

- la surface des collecteurs $S (m^2)$
- le volume du réservoir $V (m^3)$
- la consommation d'eau chaude journalière ... $M (\text{litre})$

Pour les 25 installations analysées :

- la surface collecteur a varié de 2 à 16 m^2 pour les applications en maison unifamiliale avec une tendance à des installations de 4 à 8 m^2 ;
- la surface collecteur a varié de 30 à 200 m^2 pour les grosses installations : immeubles à appartements, école hôtelière de Namur, eau pour douches et lavabos de vestiaires, ... Le cas de Lasnes ($40 m^2$) est un cas particulier en ce sens qu'il associe le préchauffage de l'eau du chauffage de l'habitation et correspond à des besoins d'eau sanitaire beaucoup plus élevés que les besoins moyens d'un ménage belge;
- le rapport V/S a varié entre $17 \frac{l}{m^2}$ et $93 \frac{l}{m^2}$: la valeur classique de $50 \frac{l}{m^2}$ est apparue à 10 reprises.
 $V/S > 50 \frac{l}{m^2}$ qui favorise une température plus basse dans les collecteurs et le stockage et donc un meilleur rendement des collecteurs et d'utilisation du stockage est apparu à 5 reprises

$V/S < 50 \text{ l/m}^2$ qui favorise une température plus élevée dans le stockage soit un meilleur confort au détriment du rendement intrinsèque des capteurs est apparu à 10 reprises

- le rapport entre la consommation moyenne journalière d'eau chaude et le volume du stockage ($= M/V$) a été supérieur ou égal à 100 % pour 4 installations. Dans la majorité des autres cas, ce rapport est même estimé proche de 50 %;
- jusqu'ici, il était reconnu qu'une famille de 4 personnes utilise en moyenne 200 l/jour à $45 \dots 60^\circ\text{C}$; les chiffres de consommation d'eau chaude relevés sur diverses installations (Jambes, La Hulpe, Marloie, Forest ...) font état d'une valeur se situant entre 25 et $30 \text{ l/jour/personne}$, soit pratiquement la moitié de la valeur prise en compte pour les études ! Dans un immeuble à appartements à Marloie, une valeur plus élevée de $44 \text{ l/jour/personne}$ a été relevée. Elle constitue l'exception, car les 4 autres immeubles identiques situés aux alentours témoignent de 25 à $30 \text{ l/jour/personne}$.

II.2.2.2.

Pratiquement toutes les installations sont bien orientées au Sud avec une tolérance d'environ 25° ouest et 25° est, et présentent une bonne inclinaison par rapport à l'horizontale dont l'optimum est de 40° en considérant qu'une inclinaison variant de 25° à 60° n'a pas d'influence majeure sur le fonctionnement du système. Les modèles de simulation de fonctionnement de chauffe-eau solaire qui ont été établis à la Faculté Polytechnique de Mons / 15 / par un programme SYS5-CHAUEAU démontrent l'importance des paramètres

suivants : pente, azimut, η_0 , coefficient de perte du collecteur U_m , coefficient de perte des tuyauteries U_t , efficacité de l'échangeur : voir annexe 1.

Les dossiers / 14 / établis pour les installations conjuguées aux essais standardisés de tous les types de capteurs réalisés à Mons fournissent les éléments nécessaires au calcul de ces paramètres.

Le calcul a été exécuté en détail pour le cas de l'installation du Foyer Jambois, instrumentée par l'unité de recherche, pour lequel la bonne concordance des résultats avec le programme a été vérifiée.

II.2.3. Type d'appoint énergétique.

— Neuf installations ont utilisé la chaudière traditionnelle à fuel ou gaz pendant l'année entière, dont :

6 en aval du stockage solaire

(Waterloo, Genval, Marloie, Auderghem, Lasnes, Forest)

2 par échangeur (serpentin) placé dans la partie supérieure du stockage

(Ben-Ahin, Sorinne-la-Longue)

1 par échangeur instantané en aval du stockage

(Colfontaine)

— Neuf installations ont utilisé le système électrosolaire en été tout en gardant le fuel ou le gaz comme appoint le reste du temps, dont :

6 : électricité en direct dans la partie supérieure
du stockage
(Jambes, Ottignies, Villers-la-Ville,
Pépinster, Warmifontaine, Bruxelles)

2 : électricité à accumulation dans un deuxième
stockage en série du stockage solaire; possi-
bilité d'enclenchement manuel de jour
(Harnoncourt, Eupen)

1 : électricité à accumulation dans le stockage
solaire même : à déconseiller
(Tilff)

— Cinq installations ont utilisé l'appoint électrique pendant
l'année entière, dont :

3 : électricité à accumulation dans un accumulateur en
aval du stockage solaire de préchauffage; enclen-
chement manuel de jour
(Dongelberg, Ans, Namur)

1 : électricité à accumulation dans un deuxième stockage
en parallèle sur le stockage solaire; enclenchement
manuel de jour. Mauvais rendement.
(La Hulpe)

1 : électricité, tarif bihoraire dans le stockage
solaire même par enclenchement manuel uniquement.
Peu souple, pas idéal.
(Naninne)

REMARQUES

- Les grosses installations ont un appoint par gaz / gasoil en aval du stockage solaire pendant l'année entière.
- Dans le cas d'une maison unifamiliale, la puissance de l'appoint électrique varie de 2 000 W à 3 000 W.
- Les solutions suivantes, utilisant l'électricité comme appoint, sont compatibles dans leur principe avec l'emploi de l'énergie solaire :
 - le système électrosolaire avec résistance électrique dans la partie supérieure du stockage solaire (été);
 - le système électrique à accumulation dans un accumulateur en série avec le stockage solaire (été ou année).

Les performances au niveau énergétique sont cependant à vérifier !

II.3. PERFORMANCES ENERGETIQUES ET FIABILITE DES INSTALLATIONS.

II.3.1.

- L'installation de Jambes a été l'objet d'une instrumentation limitée pour en réduire les coûts / 5 /, soignée et continue à partir du 14 mars 1981 et a constitué l'installation de référence pour nos comparaisons.

L'installation de Colfontaine (95 m²) est équipée en matériel de mesures depuis mai 1982. Le suivi débutera en août 1982.

Plusieurs autres projets d'instrumentation ont été préparés par l'unité de recherche et sont en veilleuse faute d'accord de financement des Services de Programmation de la Politique Scientifique, notamment l'Ecole Hôtelière de Namur et quelques cas représentatifs de maison unifamiliale.

Le chapitre IV traite des méthodes de suivi réalisées de façon plus détaillée.

- Plusieurs installations (La Hulpe, Ans, Limelette, Bruxelles, Genval, Auderghem, Forest) ont fait l'objet d'instrumentation utilisant les mêmes principes et matériels de mesure par d'autres organismes avec lesquels des contacts ont été entretenus et dont les résultats sont confidentiels.
- Les installations ont fait l'objet par l'unité de recherche d'un formulaire basé sur les documents C.E.E. et A.I.E. et d'une appréciation par notre unité de recherche / 14/. Les défauts de matériel, les satisfactions ou insatisfactions des utilisateurs sont repris dans ces documents encore confidentiels.

Le formulaire A.I.E., relatif à 5 installations solaires de production d'eau chaude prises au hasard, a été réalisé / 6/.

- En résumé, les installations solaires reprises dans le tableau 1 on fait l'objet d'une fiche technique reprenant des caractéristiques générales et un commentaire général relatif à leur fiabilité, les défauts observés, les points particuliers, l'économie / 12/.

II.3.2. Résultats globaux.

II.3.2.1.

Deux critères antagonistes peuvent être pris en compte pour juger des performances énergétiques d'une installation solaire :

1° Le rendement global d'utilisation effective de l'énergie solaire incidente :

$$\eta_u = \eta_c \cdot \eta_s = \frac{E_c}{G.S} \cdot \frac{E_u}{E_c}$$

avec η_c = rendement des collecteurs solaires

η_s = rendement d'utilisation effective de l'énergie stockée

G = énergie solaire incidente dans un m^2 de capteur

S = surface des capteurs solaires

E_u = énergie solaire réellement utilisée

E_c = énergie solaire collectée

2° La fraction solaire qui représente le rapport entre la quantité d'énergie solaire utilisée dans le chauffe-eau solaire et la quantité totale d'énergie nécessaire pour obtenir l'eau à température désirée.

F_{sol} , ainsi défini, est directement fonction de la quantité d'eau chaude consommée et de la température à laquelle elle est consommée. Pour des comparaisons, une température d'eau

chaude de 45° est souvent adoptée et permet de définir une fraction solaire simplifiée.

Pour les grosses installations et les immeubles à appartements, afin de couvrir les déperditions de la boucle de distribution et d'assurer le confort et la satisfaction de l'ensemble des utilisateurs, une température de 60°C doit être adoptée.

Un autre facteur ne doit pas être négligé : il s'agit du coefficient de performance COP défini comme le rapport entre la quantité d'énergie thermique solaire utilisée et la quantité d'énergie électrique consommée pour le fonctionnement du système (pompe de circulation , régulation).

La consommation électrique du circulateur est calculée par la formule suivante :

$$C = \frac{9,81 \cdot D \cdot H}{3\,600 \cdot \eta} \quad \text{en Watt}$$

D = débit en litre / heure

H = perte de charge (mCE)

η = rendement du circulateur,

actuellement : 5 à 10 % pour les petites installations

15 à 20 % pour les grosses installations

/ 43 /

Pour minimiser C et maximiser le coefficient de performance de l'installation, il convient d'éviter le surdimensionnement

qui conduit à des pertes de charge excessives et à des rendements de pompes et de collecteurs déplorables :

- fixer D entre 40 et 60 $1/h \cdot m^2$;
- calculer H précisément et minimiser H (tuyauteries, collecteurs, échangeurs, choix du fluide caloporteur) ;
- choisir un circulateur performant, adapté à l'installation.

II.3.2.2. Maximiser le rendement des collecteurs et d'utilisation de l'énergie solaire incidente.

- Les résultats de l'installation solaire dans une maison unifamiliale du Foyer Jambois (installation décrite au chapitre 4, / 9 /, / 10 /, / 11 /) ont démontré :
 - une énergie collectée de $380 \text{ kWh} / m^2 \cdot \text{an}$ (70 % pour la période estivale) ;
 - une énergie utilisée de $305 \text{ kWh} / m^2 \cdot \text{an}$;
 - un rendement d'utilisation du stockage de 80 % :
 - un rendement de captage de l'énergie solaire incidente de 40 ... 43 %
 - un rendement d'utilisation réelle de l'énergie solaire de 30 ... 33 %
 - un coefficient de performance de 9 (avec des variations mensuelles de 6 à 13.6).

Ces résultats ont été rendus possibles en favorisant un fonctionnement à basse température de l'installation solaire. L'expérimentation a montré l'influence primordiale du puisage en quantité et répartition journalière sur le rendement d'utilisation du stockage.

Pour arriver à ce résultat, plusieurs conditions minimales ont été remplies :

- $V/S = 50 \text{ l/m}^2$
- $M/V = 100\%$ au moins et un puisage bien réparti sur la journée avec une utilisation davantage en fin de journée qu'en matinée
- stockage isolé normalement par 5 cm de mousse synthétique d'un coefficient de conductibilité $\lambda = 0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, placé dans un local où la température restait supérieure à 10°C en permanence
- des collecteurs simple vitrage performants
 - { $\tau \geq 0.91$ $\alpha = 0.9$ $\epsilon = 0.7$ }
 - { $\eta_o = 0.75$ $U_m = 4.0 \text{ W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$ }bien orientés (sud; pente : 45°)
- une régulation différentielle efficiente avec un différentiel de température de consigne réglé à 2°C qui permet de collecter la moindre énergie disponible, ainsi que le traduit la valeur élevée du temps de fonctionnement du circulateur : 1 772 h / an. Cette faible valeur de 2°C a été rendue possible grâce à :
 - faible capacité des collecteurs (0.8 l/m^2) et du circuit primaire

- isolation du circuit primaire minimale (1.5 cm de mousse synthétique) et une longueur du circuit raisonnable (< 20 m) d'où un coefficient de perte de 3.0 W / °C

- un échangeur tubulaire placé dans la partie basse du stockage (efficacité : 0.7)
- une bonne stratification observée dans le stockage
- un dimensionnement raisonnable du circulateur solaire et le choix d'un fluide caloporteur (propylène glycol dans l'eau 30 ... 35 %) ayant de bonnes propriétés thermiques et une viscosité acceptable, ce qui minimise la consommation des auxiliaires

En contrepartie, la fraction solaire réalisée par l'installation s'est révélée faible (38.7 % pour l'année) contre 39.2 % prévus par les modèles de simulation / 15 / / 34 /. Même en été, la fraction solaire a été de 50 % seulement et l'électricité d'appoint (2.3 kW) ne suffisait pas pour assurer le confort désiré par les occupants.

Ce type d'installation doit être considéré comme une installation de préchauffage solaire et est caractérisé par l'impossibilité pratique d'arrêter la chaudière traditionnelle d'appoint en période estivale.

- Théoriquement, le rendement de collecte et d'utilisation de l'énergie solaire incidente pourrait encore être augmenté par :
 - des besoins en eau chaude plus élevés $M/V >> 100 \%$, au détriment de la fraction solaire évidemment;
 - un stockage mieux isolé (épaisseur de l'isolant, coefficient de conductibilité λ) placé dans une ambiance à température plus élevée;

- un collecteur solaire plus sélectif ($\epsilon \leq 0.2$);
- une isolation supérieure du circuit primaire ($U_t \rightarrow 1.6 \text{ W} / ^\circ\text{C}$);
- un échangeur plus performant : quelques mesures de températures effectuées localement sur l'installation de Jambes ont révélé que l'échangeur tubulaire placé au bas du stockage possédait une efficacité insuffisante. Ce fait a été observé sur d'autres installations et expliquent l'emploi d'échangeur extérieur au stockage, à circulation forcée, à haute performance pour de faibles gradients thermiques à couvrir.

(Echangeur à plaque ou tubulaire en cuivre). C'est le cas des installations de Ans, Genval, Marloie, Forest, Tilff, Pépinster, Eupen, Bruxelles. De manière générale, les grosses installations ont recours à des échangeurs extérieurs au stockage. Dans ce cas, la consommation des auxiliaires de fonctionnement électriques, le coefficient de performance de l'installation, le différentiel de température de consigne du régulateur différentiel, le temps de fonctionnement du circulateur solaire doivent être observés de façon à évaluer l'amortissement réel du surcoût y lié.

- Les essais effectués à Laborelec en 1978-1979 / 35 / sont dans la ligne des résultats observés au Foyer Jambois et ont signifié qu'une énergie collectée de $400 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{an}$ pour un rendement d'utilisation du stockage de 90 % peuvent être obtenus moyennant :
 - un rapport $V / S > 50 \text{ l} / \text{m}^2$;
 - un renforcement de l'isolation du stockage à 75 mm d'épaisseur;
 - un capteur sélectif à double vitrage.

Par contre, le point faible de cette installation a résidé dans un COP faible 2-1 dû à une puissance trop importante de la pompe de circulation et de sa régulation.

- D'autres essais effectués récemment par l'Unerg sur un immeuble à 45 appartements d'Auderghem, équipé de $S = 34 \text{ m}^2$, $V = 1\ 750$ litres par des techniques de mesure identiques à celles du Foyer Jambois, laissent penser qu'une énergie solaire utilisée de $380 \dots 400 \text{ kWh/m}^2 \text{ an}$ pourrait être obtenue (par extrapolation).

L'immeuble est équipé d'une crèche, grosse consommatrice d'eau, si bien que la consommation d'eau chaude journalière est supérieure à $4\ 000 \text{ l/jour}$.

Les coefficients de performance variant de 10 à 16 pourraient être obtenus sous réserve de vérification !

Il s'agit aussi d'une installation de préchauffage solaire et l'appoint par une chaudière à énergie traditionnelle s'impose toujours, même en été.

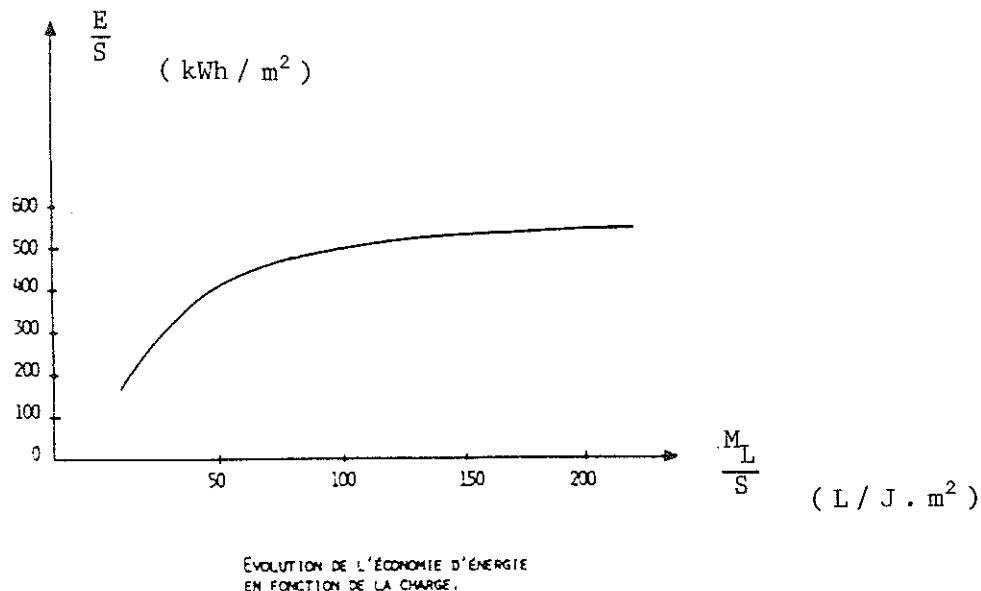
- Les installations qui visent à maximiser le rendement de captage sont caractérisées par une température dans le circuit solaire qui permet d'éviter la surchauffe. C'est le cas au Foyer Jambois où des températures instantanées de 65°C ont été observées dans le circuit solaire.

Vu le puisage effectué, il ne s'est présenté que deux journées où l'eau chaude fut supérieure à 35°C en moyenne; 93 journées ont fourni une température supérieure à 35°C dont une cinquantaine supérieure à 45°C en tenant compte que la résistance électrique a consommé 179 kWh en juin et août (42 jours de fonctionnement) mais a été débranchée le reste du temps car elle ne permettait pas d'assurer le confort suffisant.

— La figure 12 rappelle que l'économie d'énergie, et donc la rentabilité, est maximale pour les installations à collecteurs fortement chargés.

C'est le cas des applications où la surface des collecteurs est limitée par des contraintes techniques ou architecturales (surface de toiture) et où les besoins sont grands : écoles, hôpitaux, centres sportifs, ...

FIGURE 12



Quelques cas étudiés à la Faculté Polytechnique de Mons à l'aide du programme SYS 5 CHAUEAU sont repris dans le tableau n° 2, p. 46.

Ces résultats confirment qu'une économie supérieure à 400 kWh / m² pourrait être atteinte par une installation dimensionnée pour maximiser le rendement de collecte et d'utilisation de l'énergie solaire dans notre climat.

Conditions minimales :

- $V/S \geq 50 \text{ l/m}^2$
- $M/V \geq 100 \%$
- L'appoint traditionnel s'impose toujours vu la faible fraction solaire obtenue qui ne permet pas d'assurer le confort voulu.

APPLICATION	BESOINS $M (\text{l/jour})$	SURFACE DE COLLECTEURS $S (\text{m}^2)$	STOCKAGE $V (\text{m}^3)$	ECONOMIE D'ENERGIE $\text{kWh / m}^2 \cdot \text{an}$	M/V (%)	V/S ($1/\text{m}^2$)
Douches d'une piscine à ciel ouvert (174 jours de fonctionnement)	4 000	60	3	332	133	50
Cité étudiante	13 000	196	6	367	216	30.6
Hôpital	20 000	250	9	443	222	36.0

TABLEAU 2

II.3.2.3. Maximiser la fraction solaire assurée par l'installation.

- Certaines installations ont fonctionné de manière à assurer une fraction solaire la plus élevée possible, l'objectif étant d'arriver à une autonomie de chauffage en été pour arrêter de mai à septembre le chauffage traditionnel (chaudière gaz / fuel) dont les rendements sont très mauvais pour cette période : un appoint électrique est réalisé à l'occasion mais il doit rester limité. En cas de non-ensoleillement pendant plusieurs jours consécutifs, la chaudière doit être remise en marche mais le chauffage de l'habitation peut le nécessiter aussi.

Les utilisateurs des installations de Jambes, Ottignies, Dongelberg, Villers-la-Ville, Bruxelles, Ben-Ahin, Tilff, La Hulpe, Limelette, Pépinster, Warmifontaine, Eupen, Nannine, Bruxelles, Harnoncourt, Sorinne-la-Longue, Lasnes ont eu cet objectif et ils y sont arrivés avec des fortunes diverses sous notre climat.

- Certains principes sont à respecter dans ce cas :

- adopter $V / S \leq 50 \text{ l/m}^2$ pour favoriser un fonctionnement à haute température; $V / S = 25 \text{ l/m}^2$ tend à assurer le meilleur confort de l'eau chaude obtenue. Une valeur minimale doit être imposée pour éviter une valeur trop élevée en permanence au niveau des capteurs, responsable alors de surchauffe si le puisage n'est pas suffisant ! Aucun dégât dû à des surchauffes n'a été signalé actuellement;
- les utilisateurs doivent adapter leur puisage aux conditions d'ensoleillement : cela demande une utilisation d'eau chaude fort restreinte les jours non ensoleillés.

leillés pour éviter le fonctionnement intempestif de l'appoint électrique (un enclenchement manuel des résistances permet de l'éviter) et l'utilisateur doit se satisfaire certains jours d'eau chaude à plus basse température (35°C).

On ne pourra prendre son bain systématiquement le samedi. Les jours ensoleillés assurent un confort suffisant à l'eau chaude : 75°C ... 55°C.

Un utilisateur non motivé n'y trouvera pas son confort désiré : le rendement des collecteurs étant plus mauvais vu le fonctionnement des capteurs à plus haute température, le rendement d'utilisation étant moins bon également vu les déperditions thermiques plus élevées de la distribution et du stockage.

L'économie réalisée provient moins de l'énergie solaire nette utilisée ($< 300 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$) que de l'économie faite parce qu'on s'est imposé une attitude économique en énergie en diminuant les besoins globaux : en température d'eau chaude °C désirée, 40 ... 45°C max, en consommation d'eau chaude également.

- Les utilisateurs des installations de Ottignies, Dongelberg, Villers-la-Ville, Warmifontaine, Bruxelles, Harnoncourt, Sorinne-la-Longue ont appliqué ces principes de vie et se déclarent satisfaits de leur expérience électro-solaire.
- L'installation de Lasnes, caractérisée par une surface de 40 m² pour un stockage de 500 litres et profitant en été du stockage de 650 litres prévu pour le chauffage des locaux, a permis d'atteindre le confort désiré pour des besoins en eau chaude au moins quatre fois supérieurs à ceux d'une famille normale de quatre personnes. Il s'agit d'un cas particulier.

- A Dongelberg, les utilisateurs se sont contentés d'une consommation d'eau chaude de 85 l / jour, soit le volume du stockage, chauffée par 5 m² de collecteurs solaires. Aucun appoint énergétique n'a été utilisé de mai à septembre. Les utilisateurs se sont contentés d'eau fort tiède les jours non ensoleillés !
- L'installation expérimentale de Limelette instrumentée par le Centre Scientifique et Technique de la Construction, caractérisée par un rapport V / S = 25 l / m² (= 200 l / 8 m²) et un puisage journalier moyen supérieur à la capacité du stockage M / V = 118 % (= 237 l / 200 l) avec puisage maximum le soir, a assuré une fourniture solaire de 228 kWh / m² . an et une fraction solaire simplifiée de 72 % en moyenne sur l'été : en fonction d'une température voulue de 45°C pour l'eau chaude puisée et en considérant les surplus inutiles. Les températures maximum dans le boiler se sont élevées à 75°C. Théoriquement, une résistance électrique d'appoint aurait dû consommer 250 kWh pendant les 5 mois d'été pour assurer l'autonomie.

RAPPEL : Le capteur utilisé était composé d'un absorbeur à faible inertie placé sous des tuiles polyméthacrylate; ΔT de régulation = 2°C.

- L'installation de Jambes instrumentée par l'Unité de recherche, caractérisée par un rapport V / S = 50 l / m² et un puisage journalier moyen de 200 litres égal à la capacité du stockage, a assuré une fourniture solaire de 305 kWh / m² par an et une fraction solaire simplifiée de 50 % en moyenne sur l'été. La valeur annuelle était de 38 %. Les températures maximum dans le boiler se sont élevées à 55°C à 2 reprises.

Vu la faible fraction solaire en été, la résistance électrique a été débranchée (consommation de 179.9 kWh en 42 jours déjà) et la chaudière traditionnelle à gaz a réalisé l'appoint de façon à arriver à un confort suffisant.

- Il est évident que l'application de ces principes poserait beaucoup de problèmes au niveau des immeubles à appartements ou logements sociaux qui doivent satisfaire un grand nombre de personnes aux habitudes fort différentes et qui imposent en outre des températures plus élevées sur les longueurs de conduites plus importantes. On préfèrera pour ces applications maximiser le rendement d'utilisation de l'énergie solaire comme dit au point II.3.2.2..
- Il est évident aussi qu'on peut toujours arriver à augmenter la fraction solaire de l'installation en augmentant la surface des capteurs ... mais cela se fera au détriment de toute rentabilité. De plus, les installations visant à maximiser fortement la fraction solaire seront caractérisées par une température plus élevée : des températures en fonctionnement de 85 ... 90°C peuvent se rencontrer ...
Les sécurités adaptées sur l'installation le permettent mais l'impact sur la durée de vie de ces installations doit encore être apprécié : qu'arriverait-il en cas de panne du circulateur par une journée de plein soleil ?
- L'installation solaire de Villers-la-Ville, utilisant le même matériel qu'à Jambes $V/S = 50 \text{ l/m}^2 (= 300 \text{ l/6 m}^2)$, a fait l'objet de relevés de température d'eau chaude et du temps de fonctionnement du circulateur exécutés par le propriétaire chaque jour à 18 heures (voir tableau 3, p. 51). La résistance électrique a consommé 136 kWh (62 heures de fonctionnement) dont 100 kWh pour la période du 19 mai au 31 octobre 1981.

TABLEAU 3

MOIS	COMPTEUR HORAIRE SUR CIRULATEUR (Heure) (valeur mensuelle)	TEMPS MOYEN DE FONCTIONNEMENT (Heure)		TEMPERATURE MOYENNE JOURNA- LIÈRE SORTIE D'EAU CHAUTE (°C)
		(1)	(2)	
Mai 1980 (13 j.)	59	4.6	50	
Juin	89	3.0	42	
Juillet	83	2.7	En vacances (non relevé)	
Août	99	3.0	47	
Septembre	104	3.4	44	
Octobre	71	2.3	35	
Novembre	24	0.8	Non significatif	
Décembre	16	0.5	Non significatif	
Janvier	32	1.0	Non significatif	
Février	58	2.0	Non significatif	
Mars	51	1.63	30	
Avril	115	3.8	32	
Mai 1981	156	5.0	44	

Malheureusement, la consommation d'eau chaude n'a pas été relevée et la fraction solaire ne peut être appréciée. L'installation fera l'objet d'un suivi dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique de la Région Wallonne en 1982-1983, ce qui permettra de mesurer effectivement la consommation d'eau chaude, l'économie nette due à l'énergie solaire tout en mesurant l'impact de rendement

global d'exploitation de la chaudière traditionnelle sur l'économie de mazout perçue par le propriétaire et de la température d'eau chaude suffisante pour assurer le confort des utilisateurs.

REMARQUE

Si l'on se réfère à l'avis du propriétaire qui disait utiliser 700 litres de mazout pour chauffer l'eau sanitaire pour 4 personnes de mai à septembre (moyenne sur 3 ans), il pourra prétendre à une économie de 1 600 F / m² pour la bonne saison.

DETAIL DU CALCUL :

- Prix du gasoil de chauffage 14.7 F / l
(T.V.A. comprise)
- Prix du kWh / jour 4.5 F
(T.V.A. comprise)
Chiffres cités à Spa, SPPS,
1er et 2 juin 1982
- Economie due au mazout 10 290 F.B.
- Coût de l'électricité d'appoint 450 F.B.
- Coût de l'électricité de fonctionnement 250 F.B.
(basé sur le temps de fonctionnement
du circulateur, consommant 80 Wh)
- En conclusion, le choix d'un boiler électrosolaire dont l'objectif est de maintenir la chaudière arrêtée de mai à septembre demande de la part de l'utilisateur une attitude

motivée, économie en énergie au niveau des besoins d'eau chaude en température et quantité de façon à limiter la consommation de la résistance électrique d'appoint à 150 ... 250 kWh pour les 5 mois chauds de l'année pour une famille de 4 personnes.

La solution est d'autant plus intéressante que le chauffage d'appoint traditionnel est constitué d'une chaudière à fuel dont le rendement d'exploitation global est inférieur à 30 %. C'est le cas de beaucoup de chaufferies existant dans les habitations !

Moyennant ces conditions, une économie de 1 500 F / m² capteur peut s'avérer réaliste par l'usage de l'énergie solaire et le bilan en énergie primaire peut s'avérer légèrement meilleur (10 % d'économie) à un chauffage traditionnel.

II.3.2.4. Fiches techniques / 12/.

Les installations solaires reprises dans le tableau 3 ont fait l'objet d'une fiche technique reprenant leurs caractéristiques générales et un commentaire de l'Unité de recherche relatif à leur fiabilité, défauts observés, points particuliers, économie.

II.3.2.4.1.

- Il apparaît que les résultats aussi médiocres que 100 ... 200 kWh / m² d'absorbeur nets économisés, associés à un COP inférieur à 3, n'ont pas été rares. Plus grave : les utilisateurs se sont déclarés insatisfaits à plusieurs reprises.
L'expérience de Genval (30 m²) mérite d'être suivie pour un caractère particulier : un COP de 8 a été réa-

lisé malgré un système de vidange automatique de l'installation, un échangeur à plaque extérieur au stockage nécessitant deux circulateurs, malgré des conditions de puisage peu favorables à un bon rendement d'utilisation du stockage ($M/V = 50\%$).

Cela implique un calcul précis des pertes de charge de l'installation et le choix d'une consommation des auxiliaires de fonctionnement et de la régulation raisonnable.

- En général, il n'y a pas de problèmes pour les journées ensoleillées et dégagées où l'utilisateur est toujours satisfait : $40^{\circ}\text{C} \dots 55^{\circ}\text{C}$, si dimensionnement adéquat. Malheureusement, dans notre climat, même en été, ce cas favorable n'est pas assez fréquent.

II.3.2.4.2. Erreur_d'utilisation_et_de_dimensionnement.

- Les principes à adapter selon que l'on veuille maximiser le rendement de captage et d'utilisation de l'énergie solaire ou la fraction solaire de l'installation ont été énoncés aux points II.3.2.2. et II.3.2.3.. Beaucoup d'utilisateurs et installateurs les ignoraient; cela explique certains déboires.
- Les consommations d'eau chaude relevées se situent généralement autour de $25 \dots 30$ litres par jour par personne au lieu de $50 \text{ l/jour/personne}$ considérées dans les études.
L'installation de Genval démontre que la norme NBN 345 contribue également à surestimer largement les besoins.

- Nous suggérons que le régulateur différentiel soit réglé à une température de consigne de 2 ... 5°C de façon à rendre l'installation apte à tirer profit du moindre ensoleillement tout en gardant un coefficient de performance favorable.

Pour ce faire, il convient :

- d'adapter un absorbeur à faible capacité de fluide ($< 0.8 \text{ J/m}^2$), performant (1 vitrage, surface noire sélective) :

$$\eta_o = 0.7 \text{ à } 0.85$$

$$U_M = 3 \text{ à } 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

où η_o et U_M sont les paramètres de l'équation linéarisée du comportement stationnaire

$$\eta = \eta_o - U_M \frac{T_m - T_a}{G} \quad \text{des principaux collecteurs commercialisés de qualité ;}$$

- d'adapter une isolation minimum du circuit primaire (2 cm, $\lambda = 0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), tout en veillant à minimiser la longueur et la capacité du circuit primaire. Pour des installations inférieures à 15 m^2 de surface collecteur, on devrait tendre vers un coefficient de déperdition des tuyauteries voisin de $1.5 \text{ W}/^\circ\text{C}$ à $2 \text{ W}/^\circ\text{C}$ maximum ;

- d'adapter un échangeur tubulaire intégré au stockage ou séparé du stockage (plaque, tubulaire en cuivre) performant à faible gradient thermique : une efficacité de 0.7 devrait être minime et doit être calculée pour les débits de fluide caloporteur réels ($40 \dots 60 \text{ l/h.m}^2$); la perte de charge y afférente doit être admissible : voir le coefficient de performance obtenu ;

- le fluide caloporteur propylène glycol 30 / 35 % a été le plus souvent adapté et a permis d'atteindre de bons résultats à Jambes.

Pour minimiser la perte de charge du circuit primaire, l'installateur doit être à même d'effectuer le réglage du débit avec précision lors de la mise en route;

- d'adapter une position correcte des sondes de température et représentative du point à mesurer (bon contact thermique, isolation si nécessaire) :

- sonde capteur à la sortie des capteurs au point haut ou de contact sur l'absorbeur;
- sonde stockage en bas du stockage.

A l'heure actuelle, il semble qu'il n'existe pas de consensus commun quant à la position de la sonde de température placée dans le stockage solaire.

Différentes positions sont rencontrées, variant selon les fournisseurs et représentées sur le schéma suivant :

*Pas reçu de schéma
p. 56) de T. Cassin*

Il apparaît évident que cette position influence le différentiel de température de consigne du régulateur ainsi que les performances de l'échangeur.

Il est à signaler que le modèle de simulation des chauffe-eau établi en annexe I ne tient pas compte de la régulation réelle d'une installation; il la considère comme idéale.

Des différentiels de 6 ... 7°C ont été rencontrés; ils nous paraissent engendrer une inertie trop importante dans notre climat.

- Il n'a été rencontré aucun cas dont le stockage était isolé par moins de 5 cm de mousse synthétique. Le stockage doit être placé de préférence dans un endroit maintenu à 10°C ... 15°C. Le placement du stockage à l'étage et au voisinage des pièces chauffées paraît idéal. L'augmentation de l'isolation du stockage est toujours bienvenue car les déperditions d'un stockage isolé de la sorte n'est pas négligeable : 0.13°C ... 0.5°C ... 1°C par heure.

II.3.2.4.3. Erreurs d'installations.

- Bris de vitre des capteurs placés durant les mois chauds de l'été alors que la mise sous fluide n'est pas faite : problème lié à des dilatations thermiques (fréquent).
- Problèmes de fuite : raccords, soudures mal exécutées, etc. (fréquent).
- Difficulté à évacuer l'air des conduites (fréquent).
- Oubli du clapet anti-retour : fonctionnement nocturne par thermosiphon qui refroidit le stockage (une fois).

- Isolation nulle ou insuffisante du circuit primaire (parfois).
- Problèmes avec la régulation et le contrôle (souvent) :
 - méconnaissance du principe et du différentiel de température de consigne à adopter : pas d'optimisation en fonction de l'installation;
 - période de réglage nécessaire avec tâtonnements laborieux;
 - mauvaise position et fixation des sondes de températures, parfois placées en haut du stockage (sonde stockage) ou situées 3 mètres derrière les capteurs ! (sonde capteur).

En résumé, beaucoup de problèmes rencontrés par certains installateurs !

REMARQUE

Les installations utilisant le système de vidange automatique ou un échangeur extérieur au stockage doivent encore être considérées comme expérimentales et mériteraient un effort de suivi comparable à celui effectué à Genval et à Forest, afin d'en tirer le maximum d'enseignement.

II.3.2.4.4. Fiabilité, vieillissement des installations solaires visitées.

A. Les installations solaires visitées sont encore jeunes pour la plupart (1 an ou 2 ans de fonctionnement), notamment celles qui utilisent le cuivre comme matériau

de l'absorbeur : constatons pour celles-ci une bonne fiabilité après deux ans de fonctionnement.

Par contre, l'installation de La Hulpe (1977) avec absorbeur en aluminium " Roll Bond " parcouru par un fluide PKL 90 a connu une fuite à l'absorbeur après 4 ans de fonctionnement.

L'installation de Harnoncourt (1976-1977) livrée sans vitres, placées par l'installateur, présente un état de corrosion fort avancé ainsi qu'une décoloration importante de la surface de l'absorbeur. Ce dernier était en acier traité par galvanoplastie parcouru par de l'eau.

L'installation de Marloie, panneau livré en 1979 et placé en 1980, panneau d'acier embouti " diamant ", présente également une piqûration importante à sa surface, avec écaillage parfois.

- La majorité des capteurs présentent une condensation à l'intérieur du vitrage qui ne s'élimine pas ...
- Trop de capteurs présentent une mauvaise étanchéité à l'eau de ruissellement (pluie).
- La peinture noire se ternit.
- La poussière sur la surface est présente sur tous les capteurs : un arrosage de temps en temps peut être le bienvenu. Les répercussions sur les performances semblent malgré tout faibles.

- Quelques ruptures de vitre ont eu lieu : verre mal découpé, problème de dilatation.
- Corrosion de l'enveloppe et des attaches : oui, là où l'acier est employé.
- Fuite à des raccords et connections (assez fréquent) détectée par des chutes de pression.
- Problème avec la présence d'air dans les conduites (fréquent). Dans les grosses installations, le débit ne se répartit pas bien dans certains capteurs : mauvais équilibrage ou obstruction par des particules de soudure.
- Ennuis de pompe (à 3 ou 4 reprises).
- Problème avec la régulation et le contrôle (à la mise en route souvent); quand il y a malfaçon de l'installateur : mauvaise position des sondes, mauvaise fixation.
- Le gel a endommagé les raccords d'installations fonctionnant à l'eau sans antigel.
- ...

REMARQUES

- Il est encore trop tôt pour dégager un capteur fiable à long terme.
Il est symptomatique de constater que certains fabricants de capteurs ont déjà produit en quatre ans, trois versions de leur capteur; les améliora-

tions apportées étant déduites des premières expériences faites sur le terrain.

Les expériences antérieures à 1979 constituent une première génération de capteurs dont les performances peuvent être considérées comme catastrophiques sur le plan des performances et de l'état des capteurs mais qui ont permis de tirer des enseignements aptes à rendre plus fiables les capteurs installés en 1981 et 1982.

Le suivi du vieillissement des installations solaires mérite d'être poursuivi pour vérifier le comportement des matériaux et dégager des types de capteurs fiables à long terme.

- Certains comportements à long terme n'ont pu être vérifiés et mériteraient une attention spéciale également :
 - le contact thermique entre le tube et la tôle des absorbeurs;
 - les ponts thermiques des collecteurs dans les conditions extérieures de notre climat;
 - la dégradation à long terme du fluide caloporteur et ses implications.

B. Systèmes de protection contre le gel, la surchauffe, la surpression, la corrosion :

GEL : Toutes les installations ayant l'usage d'un fluide caloporteur ou d'un système de vidange automatique n'ont pas connu d'ennuis de ce côté.

Par contre, certaines installations prévues pour fonctionner en été et mi-saison avec de l'eau uniquement (ex. : Dongelberg, Harnoncourt) ont connu des ruptures de raccords.

SURCHAUFFE : Toutes les installations ont résisté à la surchauffe. Les absorbeurs peuvent en effet résister à des températures de marche à vide de 120°C à 200°C suivant les cas. Ces cas ne se sont jamais présentés en pratique.

Par contre, les bris de vitre rencontrés sont liés à des dilatations thermiques ...

Il convient également de vérifier l'aptitude du circulateur à supporter des températures de 100°C environ.

SUPPRESSION : Aucun ennui constaté.

Le circuit est toujours muni d'un vase d'expansion (pression de gonflage : azote), soupape et manomètre de sécurité, purgeur automatique au point haut. Les absorbeurs sont testés à des pressions nettement supérieures à la pression de service.

CORROSION : Toutes les installations sont pourvues, selon leur fournisseur, de système de protection. Il est repris ici trois types d'installation pour lesquels, après deux ans de fonctionnement, l'état apparent restait bon. Ces exemples ne sont cependant pas limitatifs :

1° Absorbeur en cuivre / circuit en cuivre.

Fluide thermique neutre exempt d'ion chlore, anticorrosif, propylène glycol (30-35 %).

Pas de contact électrique entre métaux dissemblables dans le collecteur solaire.

N.B. : Le circuit extérieur ne doit comporter ni acier galvanisé, ni aluminium.

2° Absorbeur en aluminium, couche noire anodisée avec tube sinusoïdal en acier inox austénitique.

Fluide solaire spécial de la firme avec additif contre le vieillissement et la corrosion.

Cadre extérieur des collecteurs en aluminium recouvert de zinc.

Ne pas utiliser de tube en acier galvanisé pour les conduites.

3° Absorbeur profilé en tôle d'acier.

Revêtement noir mat résistant à la corrosion.

Conduites en cuivre ou tuyau souple de plastique entre le capteur et l'échangeur en cuivre, collier de serrage en acier inox, raccord laiton.

Fluide : PKL 90.

Cadre du collecteur en aluminium.

II.4. CONCLUSIONS.

- Les installations à collecteurs fortement chargés, dimensionnées pour le préchauffage solaire, fournissent une économie nette supérieure à 300 kWh / m² . an et les résultats futurs devraient tendre vers 350 ... 400 kWh / m² . an.
Il est encore trop tôt pour se prononcer sur la durée de vie des capteurs : 10 ans est le minimum à assurer.
L'objectif des années futures serait d'arriver à une diminution des coûts d'investissements du surcoût solaire tout en continuant à améliorer ses performances : les prix pratiqués (tout compris), soit 15 000 F / m² ... 20 000 F / m², devraient être réduits et tendre vers 10 000 F / m².

- Le chauffe-eau électrosolaire n'offre de perspectives intéressantes que pour l'utilisateur économise dans ses besoins et disposant normalement d'un chauffage traditionnel au fuel dont le rendement d'exploitation est faible : 30 %.
- D'autres instrumentations d'installations solaires du même type ont été soigneusement préparées (voir chapitre IV) afin de disposer d'un échantillon plus large permettant d'apprécier la technologie de manière statistique.
- La rentabilité / 16 / ne peut être assurée que par une conjoncture favorable : prix des énergies, taux de croissance des énergies, taux d'actualisation.

Par comparaison à un chauffe-eau traditionnel au fuel disposant d'un mauvais rendement d'exploitation, le chauffe-eau solaire et électrosolaire peut atteindre son seuil de rentabilité dans certaines conditions / 16 /.

Par comparaison à un chauffe-eau au gaz, aucune installation solaire ne peut être rentabilisée à l'heure actuelle.

IV.

III. CHAUFFAGE SOLAIRE DE L'HABITAT : ETAT ACTUEL EN WALLONIE.

III.1. GENERALITES.

- Le chauffage solaire de l'habitat représente une technique qui en est toujours à ses balbutiements ainsi qu'en témoigne la grande diversité des schémas de principe présentés, non optimalisés, le plus souvent l'œuvre des propriétaires eux-mêmes, souvent sophistiqués.
- Le chauffage solaire avec collecteurs, parcouru par de l'eau glycolée, est le plus souvent utilisé mais quelques systèmes à air sont également présents.
- Il n'a été possible de recenser de manière significative les différentes tendances représentatives du solaire en chauffage de l'habitat en Wallonie qu'à partir de l'année 1981.
La publicité faite par la revue "*Je vais construire*" en août 1980 pour les toitures solaires intégrées et quelques architectes en quête de nouveau sont à l'origine des premières réalisations que l'on peut encore qualifier de " prototypes ".
- Le Concours pour l'Habitat Thermique de la Région Wallonne a permis de recenser quelques installations solaires en fonctionnement dans la partie wallonne du pays. Les projets lauréats d'une première sélection en février 1981 feront l'objet de mesures dans le cadre du Concours à partir de septembre 1982, visant à établir un bilan thermique global *normalisé*, réalisé par des équipes de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise, la Faculté Polytechnique de Mons, l'Université de Liège et l'Université de Louvain.

Les dossiers les mieux étudiés à l'heure actuelle sont ceux retenus dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique.

L'Unité de recherche a voulu éviter de faire double emploi avec l'instrumentation à réaliser dans le cadre du Concours et a axé sa tâche à la préparation des bilans thermiques par la définition de l'équipement de mesure nécessaire : compteurs de chaleur, compteurs électriques, compteurs horaires, compteur gaz, compteur fuel ...

En outre, le chapitre IV décrit les suivis de la maison solaire de Grez-Doiceau et d'un logement de la SORELOBO à Colfontaine dont l'équipement de mesure a été placé.

- De la sorte, les premiers résultats relatifs à une saison de chauffe devraient être obtenus en fin d'année 1983 et pourront être confrontés au programme de simulation SYS5-CHAUFFPAC / 15 / établi à la Faculté Polytechnique de Mons, qui devrait permettre de reprendre pratiquement tous les cas. Il tient compte :
 - d'une boucle de conversion de l'énergie solaire (collecteurs, tuyauteries de transfert, échangeur);
 - d'un réservoir de stockage de la chaleur solaire;
 - d'un réservoir de stockage d'appoint;
 - d'une source d'appoint directe ou par pompe à chaleur;
 - d'une boucle de transfert entre les stockages;
 - d'un réservoir sanitaire;
 - d'un circuit de distribution de l'eau sanitaire;
 - d'un circuit de distribution de chauffage des locaux.

Les résultats pourront être évalués en regard de systèmes étudiés en détail dans différentes universités et qui ont connu par ailleurs

certains retards dans leur mise en oeuvre :

- maison solaire de Mons (Faculté Polytechnique de Mons);
 - bâtiment solaire de la F.U.L. (Fondation Universitaire Luxembourgeoise);
 - maison solaire de Plainevaux (Association des Ingénieurs de Liège).
- Le présent chapitre vise à présenter de façon générale quelques projets solaires significatifs des tendances rencontrées sur le marché. Il s'agit toujours de constructions neuves. Des dossiers basés sur les formulaires CEE / AIE ont été élaborés pour certains d'entre eux grâce à la bonne coopération des propriétaires.
- A titre exemplatif, le programme de simulation SYS5-CHAUPAC donne les résultats suivants pour un cas moyen dans notre climat :

HYPOTHESE :

- 10 kW nominal de déperdition de l'habitat par - 10°C extérieur
- 50 m² de collecteurs, orientés sud, dont $\eta_o = 0.75$ et le coefficient de perte thermique vaut : 4 W / m² . K
- réservoir de stockage d'eau : 22 m³
- perte du stockage : 10 W / K
- surcoût solaire : 400 000 F.B. approximativement

RESULTATS :

- Besoins de chauffage : 16 946 kWh
- Energie solaire incidente : 44 862 kWh

- Energie solaire collectée : 10 932 kWh

$$(= 218 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an})$$

d'où un rendement des collecteurs de 24.4 %
- Apport solaire annuel utilisé : 7 202 kWh

$$(= 144 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an})$$

d'où un rendement interne (perte stockage, canalisation, etc.) de 65.9 %

un rendement d'utilisation de l'énergie solaire de 16 %
- Fraction solaire : 42.4 %

III.2. SYSTEMES SOLAIRES ACTIFS A "EAU".

III.2.1. Principes de base.

III.2.1.1. Contraintes.

- A l'heure actuelle, le chauffage solaire reste une technique coûteuse dont le surcoût dû au solaire s'avère important : ± 10 000 F.B. / m² de capteur (prix global de l'installation ramené à un m²), prix influencé par la contribution en main-d'œuvre de l'utilisateur ou par des prix de faveur rencontrés.
- En Belgique, les 3/4 de l'énergie solaire sont captés pendant le semestre d'été. Corrélativement, les besoins de chaleur se concentrent sur la période de novembre à février pendant laquelle la disponibilité d'énergie solaire n'est que de 15 % du total annuel. En hiver, on ne dispose que de 6 heures de soleil alors que les besoins de chaleur se répartissent sur les 24 heures de façon assez constante. La nécessité d'un stockage apparaît im-

médiatement : c'est précisément un problème qui n'est pas résolu. Le stockage est limité par son coût et ses pertes. Toutes les installations rencontrées ont eu recours à l'eau comme moyen de stockage mais le volume de stockage rencontré a varié largement de 0.65 m³ à 70 m³.

- Les meilleurs rendements sont obtenus par une réduction des pertes du système de captage, de stockage et de chauffage en travaillant à une température basse.

Le système de distribution le plus utilisé est le chauffage par rayonnement à basse température, dans lequel de l'eau parcourt des tubes placés dans les planchers et chapes des pièces.

Parfois, des radiateurs surdimensionnés ou des ventiloconvecteurs ont été utilisés, le plus souvent à l'étage dans les chambres vu leur moindre inertie.

L'ajout d'une pompe à chaleur a été rencontré également; il présente l'avantage de pouvoir refroidir l'eau jusque 5°C, ce qui augmente la durée d'utilisation des capteurs. On en arrive cependant à un équipement luxueux. Dans ces cas là, le stockage a été également constitué par le sol dans les fondations ou dans le jardin.

Certains concepteurs ont cependant profité de l'emploi de la pompe à chaleur pour sélectionner des capteurs meilleur marché, moins performants mais fonctionnant avec des rendements équivalents vu les basses températures dans les collecteurs (< 20°C en fonctionnement).

Les systèmes dits "capteurs nus sans vitrage = toiture énergétique", associés à la pompe à chaleur, ont vu leur apparition et sont testés par les sociétés électriques (Laborelec, Hoeilaart) depuis plus d'un an.

III.2.1.2. Premières expériences (capteurs caissons).

- A Antoing, un architecte réalisait en 1978 une première application solaire à partir d'une maison de style traditionnel, non

conçue en fonction du solaire, ni par ses formes extérieures, ni par son isolation, représentant 500 m² de surface habitable :

- 60 m² de capteurs caissons sur la toiture;
 - stockage des calories par circulation d'eau dans des tuyaux en polyéthylène placés dans le sol;
 - une pompe à chaleur eau / eau repompe les calories; commande par thermostat d'ambiance;
 - distribution :
 - chauffage par rayonnement par le sol pour les pièces occupées quotidiennement;
 - ventilo-convector pour les locaux occupés par intermittence;
- température de l'eau : 26 - 34°C

INCONVENIENTS

Gros coûts : 1 200 000 F.B.

Inconfort ressenti car l'habitat n'a pas été conçu en fonction du solaire.

- A Rixensart, la Société M.C.I. Idéal - Home a installé sa première maison traditionnelle équipée d'un système de chauffage solaire :
 - 28 m² de capteurs par panneaux verticaux, installés sur le mur " sud ";
 - stockage des calories dans un volume principal alimentant un plancher chauffant avec régulation thermostatique;
température de l'eau : 25°C;

- appoint électrique dans un deuxième réservoir situé au-dessus du premier;
- économie espérée : 45 %

Aucune mesure n'a été effectuée sur le système solaire mais l'Unerg a relevé la consommation électrique globale de l'habitat : 176 kWh / m² de plancher chauffé.

La consommation énergétique globale de l'habitat est fort élevée mais l'économie apportée par l'énergie solaire n'est pas évaluée.

Il ressort de ces deux expériences que l'utilisation de l'énergie solaire en chauffage de l'habitat ne s'improvise pas.

III.2.1.3. Capteurs intégrés à la toiture.

La publication du numéro de janvier-février 1980 de la revue "Je vais construire" a contribué à diffuser le concept de toiture solaire intégrée par opposition au capteur caisson utilisé auparavant.

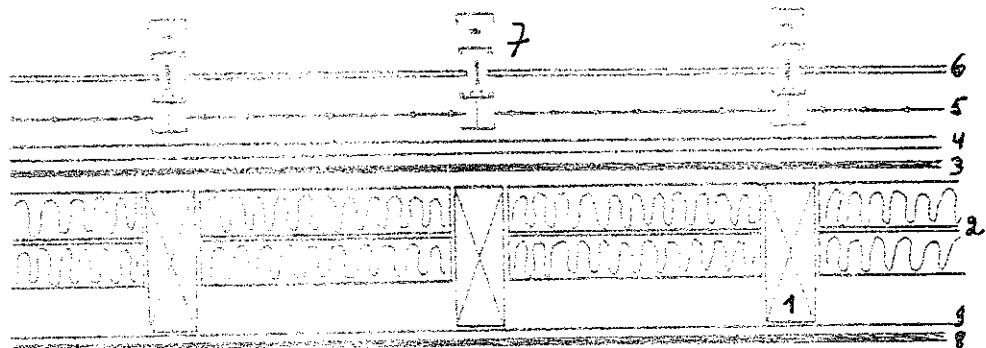
La toiture solaire intégrée réalise la triple fonction de la toiture soit le captage de l'énergie solaire, la couverture d'étanchéité, l'isolation thermique du capteur et de l'habitat en toiture. Cette technique est employée dans un souci d'intégration parfaite à une toiture prévue, de meilleur prix, de pose facile et peu onéreuse, d'inertie faible de l'absorbeur, de fiabilité (absorbeur en cuivre), d'esthétique.

Elle permet de décompter du surcoût solaire, le coût de revêtement traditionnel de la toiture (tuile, ardoise).

A. Système le plus utilisé : association d'un vitrage en verre, d'un absorbeur en cuivre et à faible inertie 0,3 ... 0,8 l / m² (Hebco ou SIS), de profilés Alu Portal qui jouissent d'un monopole à l'heure actuelle, à l'exception de la maison de

Chaumont-Gistoux, où des profilés en bois ont été choisis par le propriétaire.

La figure 13 montre un exemple de toiture solaire intégrée.



COUPE DE LA TOITURE SOLAIRE

1. Charpente en 8/23, espace entre axe : 50 cm
2. Laine de roche : 2 x 7,5 cm
3. Contreplaqué " marin ", 10 mm d'épaisseur
4. Deux feuilles " Kraft aluminium "
5. Absorbeur
6. Verre " Sunpane ", 4 mm d'épaisseur
7. Profilé " Portal "
8. Planchette
9. Feuille " Kraft aluminium "

FIGURE 13

Le tableau 4 ci-après reprend huit projets réalisés.

TABLEAU 4

CAPTEUR	STOCKAGE EAU	BESOIN DE CHALEUR				PRIX GLOBAL DE L'HABITAT
		Surface de chauffage (m^2)	Isolation (cm)	Chaudière (m 3)	Volume (m^3)	
LASNES	40 27 4 Siège	15 0.65 0.35 + 0.15	sol	fuel 37.1 kW	440 1 120	56 000 127 440 000 -- --
CHAUMONT-GISTOUX	52 60 4 15 30 0.65	radiateurs surdimensionnés.	fuel (9.3 kW) (2)	193 453	11 699 (244 W/K)	60.6 440 000 3 520 000 18 238
BEAINECHAIN	51 52 6 Trémie	15 10 0.5	sol	fuel (25.6 kW)	320 900	21 700 (670 W/K) 67.8 300 000 (3) 5 000 000 15 625
CHAIN	43 53 10 15 4 0.2	sol + conv. étage	fuel + feu ouvert	175 437.5	8 730 (292 W/K)	49.9 400 000 4 800 000 27 400
RHODE ST GENÈSE	40 22 -- 18 5.5 0.3	sol	gaz	216	-- -- --	3 750 000 17 361
LILLOIS	19 -- -- 20 1 0.3	sol	fuel (30.7 kW) + feu ouvert	277	-- -- --	292 000 5 585 400 20 164
THUIN	80 30 -- 20 1.60 --	poêle à bois (800 m crt)	230 600	21 715 (358 W/K)	94.4 700 000 4 210 000 18 304	
COLFONTAINE	13 60 4 Trémie (1)	13 -- 0.29 --	radiateurs classiques	85 220	-- -- 130 000 -- --	

(1) Il s'agit d'un des 18 logements sociaux de la Cité solaire de la Sorelbo à Colfontaine.
 (2) Équipé d'une chaudière " Viessmann ", basse température et haute performance, dont la puissance du brûleur est adaptée à 9.3 kW
 (3) Contribution totale du propriétaire à l'ouvrage

D'autres projets très récents sont cités dans une liste d'installations réalisées par la Firme Portal / 17 /.

Constatons que les bâtiments " F.U.L. - 1ère phase " utilisent la même conception de toiture solaire intégrée : 380 m², verre 4 mm trempé, absorbeur en cuivre, profilés Alu Portal.

Des dossiers techniques ont été élaborés pour les installations de Lasnes / 8 /, Beauvechain / 21 /, Beauvechain et Ohain étant instrumentés dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique pendant la saison de chauffe 1982-1983.

L'instrumentation de l'installation de Colfontaine a été préparée par l'Unité de recherche (voir chapitre IV).

Quelques schémas de principe et détails de coûts sont repris dans le rapport technique / 19 /.

CONSTAT

- *Fiabilité* de la toiture constatée après trois ans de fonctionnement à Lasnes et à Chaumont-Gistoux.
- Un *surcoût* solaire de 10 000 F.B. / m² exige une participation très active du propriétaire.
- Le système de *distribution* par le sol à basse température 35 ... 40°C est le plus répandu : grâce à la grande surface d'échange, il permet une température de distribution la plus basse. Toutefois, son inertie est plus importante.
- La majorité des installations font pratiquement fi de la notion du *stockage* afin d'en limiter le surcoût et les pertes

thermiques, estimant qu'en regard de la charge thermique à assurer, un stockage de 30 à 50 m³ n'assurerait pas une autonomie de chauffage supérieure à 1 mois d'hiver pour un coût minimum du stockage de 200 000 à 300 000 F.B..

Par le choix d'un petit stockage, ces installations visent à tirer parti directement du moindre rayonnement solaire au cours de l'hiver, dans l'entre-saison, ainsi qu'en été, lors de journées fraîches mais ensoleillées.

En regard des mesures effectuées sur les chauffe-eau solaires, leurs performances " solaires " dans notre climat devraient s'avérer médiocres (<< 100 kWh / m². an d'énergie utile économisée). L'apparition du stockage dit " Calobloc " 1 000 litres - 1 500 litres, à faible déperdition, a certainement contribué à ce choix.

Des températures élevées (85°C - 95°C) peuvent être générées : la grande surface de capteur déployée en regard du volume de stockage choisi assure en belle saison l'entièreté des besoins sanitaires avec un très bon confort.

La rentabilité de ces installations peut être améliorée par des besoins d'eau chaude sanitaire nettement supérieurs à ceux d'un ménage moyen.

— La maison de Chaumont-Gistoux constitue un cas déjà extrême au niveau du stockage d'eau :

- maison bioclimatique (1978), fort isolée (200 000 F.B. d'isolation);
- surface solaire : 52 m² d'absorbeur en cuivre, noir, non sélectif;
- volume de stockage : 30 m³ d'eau dans une citerne enterrée, revêtue de 37,5 cm d'isolant sur toute la moitié supérieure et de 22,5 cm d'isolant sur toute la partie inférieure. Deux échangeurs en cuivre ont été placés à l'intérieur de la cuve (diamètre = 22 mm; 125 mètres au total);

- stockage sanitaire de 650 litres, muni de deux échangeurs en cuivre (un de 12 mètres et un de 15 mètres);
- radiateurs largement dimensionnés : 44 m^2 (2 faces) d'absorbeur en cuivre permettant une température de distribution basse; 25°C sont possibles par 0°C à l'extérieur !
- chauffage d'appoint : chaudière VIESSMANN Riello 17.4 ... 20.9 kW avec brûleur approprié de 9.28 kW;
- principe de fonctionnement : voir figure 14, p. 77.

En attendant les mesures de la saison de chauffe 1982-1983 opérées dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique, le propriétaire a constaté l'usage du stockage à eau pour assurer les besoins de chauffage de septembre à fin novembre 1980 : l'eau du stockage est abaissée de 80°C à 25°C . La cuve reste épuisée pendant deux mois. En mars 1981, le stockage a été à nouveau réutilisé.

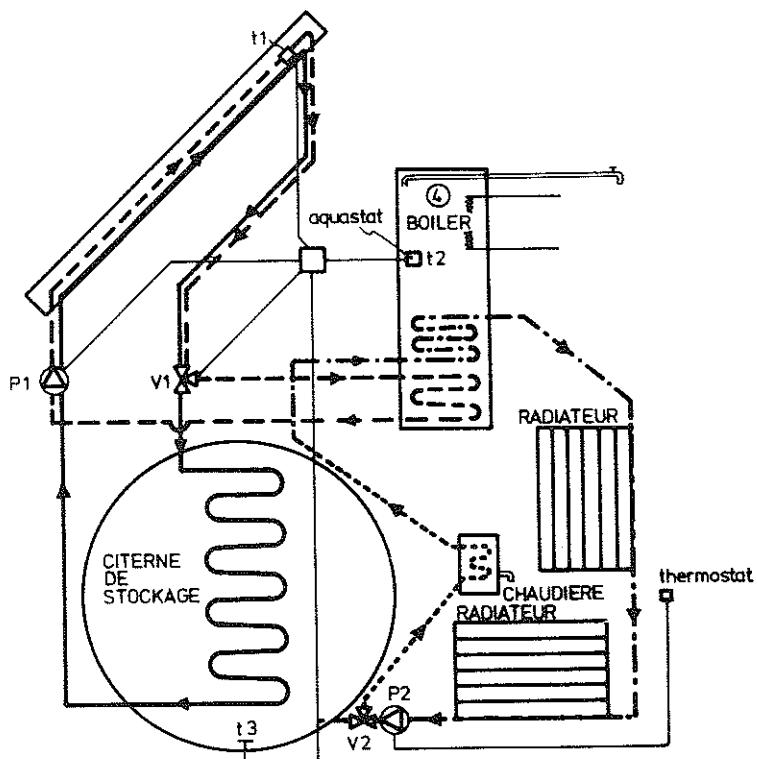
Dans cette habitation, l'objectif visé par l'usage de l'énergie solaire est de réaliser une économie de 80 % sur les besoins d'eau chaude sanitaire, soit 1 200 litres de mazout et une économie de 45 % sur les besoins de chauffage, soit 415 litres de mazout. La consommation de mazout serait abaissée de 800 litres par an contre 7 400 litres pour la même maison sans isolation et sans " solaire ".

B. Autres cas de toiture solaire intégrée.

B.1. TOURNAI.

Toiture solaire intégrée de 57 m^2 , de fabrication artisanale, alimentant une cuve de stockage à eau de 70 m^3 intégrée à l'habitation; il s'agit d'un stockage en béton, étudié du

FIGURE 14



Dès que { $t_1 > t_2 + 4^\circ\text{C}$ }

ou { $t_1 > t_3 + 4^\circ\text{C}$ } alors P1 est enclenchée

----- Si l'aquastat enregistre une demande de calories en ④ , la vanne à 3 voies V1 s'ouvre en direction du boîtier.

----- Si la température enregistrée par l'aquastat est suffisante, l'eau venant des capteurs est dirigée directement vers le double échangeur de la citerne de stockage.

CHAUFFAGE DE LA MAISON

----- A partir de 17 heures, lorsque le thermostat enregistre une demande de chaleur, le circulateur P2 est enclenché et de l'eau chaude est prélevée dans le haut de la citerne, passe par le boîtier et suit le circuit des radiateurs pour revenir à la citerne.

----- Dans un deuxième temps, lorsque la température de la citerne n'est pas suffisante, la vanne à 3 voies V2 s'inverse et de l'eau venant des radiateurs passe par la chaudière d'appoint.

Remarque : Le chauffage de base n'est pas intégré au circuit " solaire ".
Les radiateurs sont munis de vannes thermos-tatiques.

point de vue étanchéité et isolation, placé sous le living de l'habitat.

Isolation du stockage :

- 10 cm de polyuréthane sur les murs et le fond;
- 20 cm de polystyrène expansé au plafond.

Cette maison, visitée en 1981, sera suivie dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique pendant l'année 1982-1983.

Caractéristiques essentielles :

- Coût de l'installation solaire : 550 000 F.B., soit un surcoût de 400 000 F.B.. Les travaux d'isolation ont été réalisés par le propriétaire.
- Surface chauffée : 157.7 m²
Volume : 391.8 m³
- Déperdition thermique annuelle : 7 390 kWh estimés;
maison très isolée.
- Distribution de la chaleur : sol à basse température.
- Appoint : convecteurs électriques et feu de bois.
- Bilan thermique de l'installation solaire évalué suivant le programme " CHAUF.2 " établi à la Faculté Polytechnique de Mons (méthode simplifiée) :

Deux hypothèses, soit

PREMIERE HYPOTHESE

Rendement des collecteurs : médiocre

- Energie solaire collectée :

$$8\ 846 \text{ kWh / an} \equiv 157 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an}$$

d'où un rendement des collecteurs de 16 %

- Energie solaire utilisée :

$$2\ 511 \text{ kWh / an} \equiv 44 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an}$$

d'où une perte de stockage égale à 72 % de l'énergie collectée

- Contribution électrique d'appoint :

$$4\ 884 \text{ kWh / an}$$

soit 66 % de la charge thermique totale

DEUXIEME HYPOTHESE

Rendement des collecteurs : faible

- Energie solaire collectée :

$$16\ 791 \text{ kWh / an} \equiv 294 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an}$$

d'où un rendement des collecteurs de 30 %

- Energie solaire utilisée :

$$4\ 835 \text{ kWh / an} \equiv 85 \text{ kWh / m}^2 \cdot \text{an}$$

d'où une perte de stockage égale à 71 % de l'énergie collectée

- Contribution électrique d'appoint :

$$2\ 560 \text{ kWh / an}$$

soit 35 % de la charge thermique totale

Le schéma de principe est repris dans le rapport technique
/ 19 /.

B.2. GREZ-DOICEAU, BIERGES, WATERLOO.

M. GILLET, Ingénieur conseil résidant à Grez-Doiceau, a fait réaliser quatre habitations utilisant " au mieux " les énergies solaires et géothermiques, gérées par une pompe à chaleur.

La réalisation de ces maisons vise à :

- situer l'investissement de la solution innovante à 3 000 ... 3 500 F.B. / m^2 de plancher chauffant (hors T.V.A.) et toutes composantes comprises;
- réaliser une soumission de l'installation à peine 30 % supérieure au prix de revient moyen d'une installation de chauffage pour une maison unifamiliale.

Ainsi, il espère obtenir une consommation saisonnière de l'ordre de 50 kWh / m^2 de plancher chauffant et une économie financière par rapport à la consommation de mazout de l'ordre de 50 % pour un COP saisonnier moyen de 3,12.

Principes généraux de base du chauffage solaire :

1. Orienter la maison et tirer parti des apports solaires passifs pour assurer une partie des besoins.
2. Isoler pour réduire les besoins de l'habitat jusqu'à une limite raisonnable ($K_{moyen} = 0.7 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$).
3. Réduire les pertes du système de captage, de stockage et de chauffage en travaillant à une température basse (inférieure à 20°C).

4. Prévoir, dès le plan préliminaire, un volume tampon (construit ou naturel) pour assurer cette condition de basse température à tout moment.
5. Utiliser les possibilités de la pompe à chaleur pour assurer le chauffage indépendamment de la variabilité des aléas climatiques immédiats et relever ainsi à volonté le niveau énergétique jusqu'aux 35°C considérés comme un maximum pour le chauffage par rayonnement par le sol.

Basse température de captage et de stockage et pompe à chaleur sont les clés technologiques du système.

Le plancher des pièces habitées constitue l'émetteur pour le chauffage de la maison. Il limite la température du fluide caloporteur à un bas niveau et impose que les déperditions thermiques du bâtiment soient limitées à la capacité d'émission du plancher.

A l'heure actuelle, les coûts raisonnables sont obtenus par :

- le choix d'un capteur solaire particulier, bon marché;
- le prix réduit de la pompe à chaleur assemblée sur place par un frigoriste;
- le prix de la main-d'œuvre : conditions de faveur.

Ces installations offrent cependant encore l'aspect d'un bricolage de qualité fort moyenne.

Nous reprenons, ci-après, la description de trois maisons solaires.

■ Maison " GILLET " à Grez-Doiceau / 22 /.

— Conception bioclimatique.

Présence d'une serre et de baies vitrées.

— Surface de plancher chauffée : 156 m²

Volume : 506 m³

— Besoins annuels de chauffage (LPB3) ... 20 900 kWh

Coefficient global de perte 380.6 W / K

Degrés-jours équivalents 2 288

— Le chauffage basse température est composé par :

→ *Un capteur solaire intégré (85 m²),*

mixte (air et eau), constitué :

- de radiateurs en tôle du commerce, calés entre les chevrons de charpente sur l'isolation de la toiture;
- d'une feuille de cuivre dendritique ("Coppersun" de la firme Coppertron à Tournai) qui recouvre l'ensemble;
- de panneaux cloisonnés en polycarbonate translucide assurant l'effet de serre.

La couche d'air entourant les radiateurs est en communication avec le volume de l'habitat et peut y circuler par thermosiphon.

Le capteur solaire est placé entre la poutraison en Orégon 8/24 (garnie intérieurement d'une feuille de contre-plaquée de parement, d'une épaisseur de 8 mm).

Il comporte en détail, de l'intérieur vers l'extérieur,

- 18 cm de laine de verre bakélisée, garnie d'un pare-vapeur en aluminium réfléchissant vers l'intérieur du logement;
- 1 cm environ d'air;

- un radiateur en tôle TMT, avec ou sans ailettes soudées, d'une épaisseur d'environ 4 cm dans le premier cas;
- 1 cm d'air environ;
- une feuille de cuivre dendritique " Coppersun ", agrafée transversalement sur les poutres, d'une épaisseur d'environ 0,07 mm;
- une feuille de polycarbonate cloisonnée à double paroi, d'une épaisseur de 6 mm; elle est maintenue sur les poutres, contre la précédente, à l'aide de languettes d'aluminium vissées.

→ Une cuve, tampon thermique et réservoir (65 m^3), simple cave sous la maison, étanchéisée soigneusement, dont le contenu peut circuler dans un réseau géothermique (450 m^3).

→ Un réseau géothermique (450 m^3), enterré à 1,5 mètre de profondeur dans le jardin entourant la maison.

D'après les essais effectués en 1977, le sol du jardin peut jouer à la fois le rôle de capteur solaire et celui de réservoir tampon de chaleur.

La température varie de 4°C à 16°C suivant les saisons et les différentes compositions du sol, avec un minimum limité par le flux géothermique naturel.

Puissance disponible estimée : 20 à 30 W / m^2 d'échangeur enterré.

→ La cuve est réchauffée en outre par un échangeur de 200 m^2 où circule le liquide caloporteur (eau glycolée avec inhibiteur de corrosion) en boucle avec le capteur.

→ Le chauffage est assuré, en l'absence d'insolation, par une pompe à chaleur eau-eau, dont l'échangeur " source froide "

est plongé directement dans la cuve, tandis que l'échangeur " source d'eau chaude " alimente à 35°C le réseau de planchers chauffants (99 m²).

- Le réseau de *planchers chauffants* (99 m²) couvre tout le rez-de-chaussée et la salle de bains à l'étage, avec régulation décentralisée pièce par pièce. L'ensemble assure une température de confort moyenne de 20°C environ pour une température ambiante moyenne de 18°C environ. Les réseaux capteurs et planchers chauffants sont en outre interconnectés de façon à permettre également le chauffage solaire direct, sans intervention de la pompe à chaleur.
- La régulation de l'ensemble est assurée par un système à microprocesseur susceptible d'enregistrer les différents paramètres de fonctionnement. L'équilibre thermique de l'habitat est assuré par une *isolation* poussée (K moyen = 0,67 W / m². °C).

N.B. : Appoint éventuel supplémentaire par un feu ouvert avec circulation d'air.

Toutefois, le propriétaire n'achètera pas de bois pour ce feu ouvert.

PARTICULARITES A AJOUTER :

- 1° Le réseau géothermique d'échange dans le jardin récupère également les calories sur les eaux usées.
- 2° *By-pass* par stratification thermique sur l'eau de pluie dans la cuve.

Caractéristiques de la pompe à chaleur

Puissance compresseur	3,3 kW
Source froide	20°C à 2°C
Source chaude	35°C à 25°C

- Coûts

1/ Coût total de l'habitation

environ 3 900 000 F.B.

2/ Coût de la solution innovante choisie pour assurer
le confort thermique et l'expérimentation

905 000 F.B. se décomposant comme suit :

- SERRE	110 000.-
ou 3 460 F.B. / m ² vitré	
- CAPTEUR SOLAIRE	138 000.-
ou 1 630 F.B. / m ² exposé	
- CUVE DE STOCKAGE	360 000.-
ou 5 540 F.B. / m ³	
- ECHANGEURS (y compris planchers)	174 000.-
- POMPE A CHALEUR	87 000.-
ou 8 700 F.B. / kW nominal fourni	
- REGULATION	36 000.-
TOTAL	905 000.-
ou 7 340 F.B. / m ²	
de surface habitable	

On remarquera :

- l'incidence très lourde de la cuve de stockage, manifestement disproportionnée sur ce prix de revient;
- le caractère expérimental de la réalisation justifiant le coût élevé du poste échangeur;
- le coût modéré du reste de l'installation dû à un choix judicieux des matériaux et au fait que le montage a été réalisé par l'utilisateur.

Exemples : Pour la pompe à chaleur, assemblage par le frigoriste sur place.

Prix du capteur solaire bon marché.

- Bilan thermique prévisionnel (établi par le propriétaire)
 - Déperditions à couvrir 11 551 kWh
 - Energie solaire captée 28 081 kWh
 - Energie solaire utilisée 6 812 kWh (59 %)
 - Apports jardin 1 858 kWh (16 %)
 - Consommation électrique
 - pompe à chaleur 2 881 kWh (25 %)
 - auxiliaires 636 kWh
 - Coefficient d'exploitation nécessaire 3,28
- Le suivi scientifique a été préparé par l'Unité de recherche (voir chapitre IV.4.).
Il sera mené pendant la saison de chauffe 1982-1983 dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique.

Les besoins annuels de chauffage établis par le propriétaire ne sont pas en accord avec ceux calculés par le programme " LPB 3 ", ce qui laisserait craindre un sous-dimensionnement de la pompe à chaleur (à vérifier !).

- Le schéma de principe est repris au chapitre IV.4..

■ Maison " THOMAS " à Bierges / 23/.

La différence essentielle par rapport au cas de la maison de Grez-Doiceau réside dans l'abandon de la cuve de stockage dont l'incidence sur le prix de revient était très lourde ainsi que dans le choix du sous-sol de la maison comme système tampon entre le capteur de la toiture et la pompe à chaleur chargée de gérer l'énergie recueillie.

- Conception bioclimatique.
- Surface de plancher chauffée : 220 m²
Volume : 740 m³
- Besoins annuels de chauffage (LPB 3) ... 25 299 kWh
Coefficient global de perte 482.2 W / K
Degrés-jours équivalents 2 186
- Le chauffage solaire basse température est composé par :
 - Une toiture solaire intégrée (50 m²),
(toiture sud-est, sud, sud-ouest) composée d'un réseau de tuyaux en polyéthylène haute densité, placé :
 - pour une partie de la toiture entre les ardoises " Eternit " et l'isolation (32,5 m²);
 - pour le reste, entre une couverture en polycarbonate double transparente et l'isolation (27,5 m²).

Isolation de la toiture : 18 cm de laine de roche

- *Le stockage est assuré par le sous-sol même de la maison.*
En effet, l'énergie solaire captée par la toiture s'ajoute, à travers le sol, à celle provenant du jardin et s'accumule éventuellement. Dans ce cas, la terre fait office de tampon diurne - nocturne et empêche toute surcharge momentanée de la source froide de la pompe.
 - La source froide de la pompe à chaleur est assurée par le circuit jardin, soit un réseau géothermique (600 mètres courant) enterré à 1,5 mètre de profondeur.
Puissance compresseur : 5 à 6 kW
- N.B. : La puissance thermique de la pompe à chaleur tient compte d'une charge supplémentaire, liée à la production d'eau chaude sanitaire par échangeur. Ce dernier est placé entre le compresseur et le condenseur et utilise la désurchauffe du fréon.
- La pompe à chaleur porte à la température voulue l'eau circulant dans les planchers.
 - Une interconnection entre la toiture et le plancher était prévue pour le chauffage solaire direct de l'habitation.

Tout le système, à l'exception du circulateur et de la pompe à chaleur, est réalisé en matière synthétique : polyéthylène haute densité pour les tuyauteries; chlorure de polyvinyle pour les raccords et les collecteurs.

En appoint également est prévu un feu ouvert pour lequel, dans le cadre du suivi, sera demandé un fonctionnement minimum.

— Coût de l'installation innovante :

- Pompe à chaleur et accessoires	
(+ boiler de 150 litres)	174 000.-
- Régulation et réseaux	185 000.-
- Surcoût de la toiture translucide	19 000.-

TOTAL (T.V.A. comprise)	368 000.-
	=====

Le coût d'une installation traditionnelle au mazout, pour les mêmes besoins à couvrir, reviendrait à 300 000 F.B. (T.V.A. comprise), y compris la création de la cheminée.

Surcoût de la solution innovante : 68 000 F.B.

— Bilan thermique prévisionnel :

- Energie solaire collectée	14 836 kWh
- Energie solaire utilisée	8 220 kWh
- Apports jardin	8 944 kWh
- Consommation électrique	
Pompe à chaleur	8 140 kWh
Auxiliaires	3 110 kWh
- Coefficient d'exploitation nécessaire	2,25

N.B. : Une installation traditionnelle au mazout consommerait 3 900 litres de mazout, ce qui permettrait d'amortir le surcoût de la solution innovante en 5 ans !

- Le suivi sera réalisé dans le cadre du Concours pour l'Habitat Thermique (1982-1983).
- Le schéma de principe est repris dans le rapport technique 19.

■ Maison " CHED " à Waterloo.

Deux maisons solaires ont été réalisées par l'Architecte Limbosch à Waterloo.

Nous avons visité la maison " CHED " décrite sommairement ci-après :

- Conception bioclimatique.
- Surface de plancher chauffée : 180 m²
Volume : 480 m³
- Besoins annuels de chauffage 16 845 kWh ?
Coefficient global de perte 478 W / K
- Le chauffage solaire est composé de :
 - *Un capteur solaire intégré de 48 m², réalisé par :*
 - pose d'une feuille de " Guttagena " T 60 mat sur les chevrons 7/15, formant bac de réception (± 3 cm) des eaux de condensation du capteur solaire (température d'utilisation : 150°C);
 - pose du capteur solaire réalisée par la pose entre les chevrons de la toiture, de tubes de cuivre (Ø 0.012 m) espacés de 0.10 mètre, reliés haut et bas à un collecteur (fixé sur attaches souples) par des joints bicônes.

Entre les tubes sont clipsées des tôles de cuivre de 0.003 m d'épaisseur et 0.10 m de large.

Surface de l'absorbeur : 42 m². Orientation : 55°.

Le profil est fabriqué par " Cuivre et Zinc " et peut être extrudé en usine; les tubes à ailettes ont reçu un traitement chimique de Cu / Zn;

- pose tous les 1,20 m d'un profil Alu " Raydy "
- type 40 H;
- couverture par des panneaux de polycarbonate " Sparlux "
- type PIO.

→ Une citerne d'eau de pluie de 12,4 m³ qui constitue un volume de stockage basse température. Elle est placée sous l'habitation.

Echangeur : 4 tuyaux (Ø 25 mm) de 50 m en parallèle (polyéthylène haute densité).

→ Le sol du jardin est équipé de 750 m de polyéthylène haute densité, placés à 1,5 m de profondeur.

→ Emission de la chaleur par le plancher : 900 mètres.

→ La pompe à chaleur eau - eau glycolée, électrique, assure la liaison entre les différents composants.

Puissance compresseur : 5 kW max.

- Coût de la solution innovante :

Par m² de plancher chauffant 3 300 F.B.

- Bilan thermique prévisionnel :

- Besoins thermiques 16 845 kWh
(apport passif déduit)

- Energie solaire utilisée 5 357 kWh

- Apport jardin	6 264 kWh
- Consommation électrique	
Pompe à chaleur	5 224 kWh
Auxiliaires	1 934 kWh

III.3. SYSTEMES SOLAIRES ACTIFS A L'AIR.

En matière de chauffage solaire à air, trois réalisations ont été répertoriées :

1. Maison " DELAHAYE " à Waterloo.
2. Maison " MAMBOUR " à Metzert (Arlon).
3. Maison à Waltzing (Arlon), par la Société SOLETRA.

III.3.1. Waterloo.

Le système est commercialisé par Keyser Mackay.

L'installation est suivie par l'équipe du Professeur DUTRÉ de la K.U.L. (S.P.P.S.). Elle est également reprise dans le suivi du Concours pour l'Habitat Thermique.

Le système solaire actif comprend une installation de 50 m² de collecteurs à air, à surface sélective, intégrés au toit avec deux réservoirs de stockage sur lit de roche de 8,5 m³ chacun (soit ± 1,5 m² x 5,6 m).

Ce système alimente le circuit de chauffage par air pulsé. Il est prévu des gaînes de pulsion et de reprise. L'appoint est réalisé par la chaudière à gaz.

Caractéristiques du bâtiment

Surface chauffée	205 m ²
Volume chauffé	644 m ³
Déperdition	23 900 kWh
Optimisé pour ce qui concerne le chauffage solaire passif	

Gain attendu par l'énergie solaire à air

36 000 MJ / an

Avantages attendus d'un système à air

- Faible niveau de température du caloporteur présentant peu d'inertie.
- Suppression des problèmes de gel, fuite de liquide, sur-chauffe, corrosion, liés aux systèmes liquides.

Coût

- Capteurs solaires à air (50 m ²) :	
fourniture	426 822.-
pose	52 500.-

- Suppléments pour gaîne, régulation, clapets, etc.	107 200.-

- Gros oeuvre et stockage de chaleur	110 342.-

TOTAL (hors T.V.A.)	696 864.-
	=====

N.B. : Les capteurs ont été importés
des U.S.A. !

Le schéma de principe est repris au rapport technique / 19/.

III.3.2. Maison " Mambour " à Arlon.

L'installation est reprise également dans les suivis du Concours pour l'Habitat Thermique.

Le système de chauffage comprend plusieurs sous-systèmes :

- Une toiture en verre trempé (6 mm) de 143 m², orientée Sud. Elle comprend des collecteurs à air, en aluminium peint, de conception simple et modulaire.
Isolation de la toiture : 10 cm de laine de verre.
Inclinaison : 50° ; orientation : Sud.
Le capteur " prototype " a été réalisé par un industriel d'Arlon.
- Une pompe à chaleur air / air dont l'évaporateur peut être alimenté par le circuit des collecteurs.
Performances annoncées :
 - 13.3 kW (condenseur)
 - 4.51 kW (compresseur) par - 5°C à l'extérieur
- Un stockage constitué d'un volume de béton armé, d'environ 1 500 briques réfractaires.
- Distribution par air pulsé.
- Un ensemble de circuits permettant l'échange d'énergie entre les sous-systèmes.
- Autres apponts : convecteurs électriques à accumulation (6 kW) et feu ouvert.

Le système est prévu pour transférer l'énergie solaire collectée en toiture soit vers la maison elle-même,
soit vers le stockage,
soit vers l'évaporateur de la pompe à chaleur.

La pompe à chaleur pourra également utiliser l'air préalablement réchauffé par le stockage. Ce stockage peut également être chargé par la chaleur récupérée dans le bâtiment.

Les performances du capteur ont été calculées dans des conditions nominales / 23/ :

- $G = 800 \text{ W/m}^2$

(pas de vent et une température extérieure de 10°C).

- Rendement de captage moyen du capteur : 40 %

{ $\eta_o = 0.552$

{ $U_L = 11.15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

{ $U_M = F' \cdot U_L = 7.86 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

- Energie utile transmise à l'air : 342.7 W/m^2

48 000 W pour la toiture
d'où un réchauffement de $5\ 433 \text{ m}^3$ par heure
de 10°C à 36.1°C

Le couplage " collecteur solaire / pompe à chaleur " a été rendu opérationnel pendant le printemps 1982.

Caractéristiques du bâtiment

- Surface chauffée 145 m^2

- Volume chauffé 370 m^3

Coût

- Pompe à chaleur 300 000 F.B.

- Toiture énergétique 280 000 F.B.

Le surcoût est estimé à 250 000 F.B.

A titre informatif

La consommation électrique totale
(chauffage + eau chaude sanitaire + divers)
pendant la période du 2 août 1980 au 3 juillet 1981
est de 14 019 kWh.

Le schéma de principe est repris dans le rapport technique / 19 /.

III.3.3. Maison " prototype " de la Société SOLETRA à Waltzing / 44 /.

Le système solaire actif comprend :

- 18 m² de *capteurs solaires à air*, dont 16 m² d'*absorbeurs " Panairsun "* pourvus d'un vitrage simple en " Makrolon ", placé verticalement dans la façade Sud, entre les deux baies vitrées qui vont du sol à la corniche;
- un *stockage vertical* de 8 m³ (enveloppe en béton + gravier);
- les capteurs et le stockage sont raccordés aux différentes pièces de l'habitat par des *gaines de pulsion d'air chaud*;
- *régulation très simple + 2 ventilateurs* :
 - régulation automatique comprenant des sondes de température dans le capteur et dans le stockage; régulation dont la seule partie visible pour l'usager est le *thermostat central*;
 - un ventilateur pour véhiculer l'air dans les capteurs;
 - un ventilateur d'extraction de l'air du stockage.
- *appoint électrique* : 6 convecteurs électriques;
puissance totale de 4.4 kW.

Caractéristiques du bâtiment

- Surface chauffée 156 m²
- Coefficient de déperdition 200 W / °C
 - pour : 20°C à l'intérieur, soit 7 kW
 - 15°C à l'extérieur
- Maison lourde à inertie thermique exceptionnelle.
- Grandes baies vitrées au Sud.
Maison fermée au Nord.
- Forte isolation :
 - $k = 0.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pour le mur extérieur
 - $k = 0.24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pour la toiture (avec 20 cm de béton et 26 cm de laine de verre)
 - $k = 0.37 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ pour les murs enterrés

Véritable maison " thermo " (chiffres mesurés par le propriétaire) :

- chauffage coupé une nuit (12 heures) par - 10°C donne une baisse de la température intérieure de 1°C;
- oscillation de la température des parois, du 1er septembre 81 au 28 février 82, entre 17°C et 21°C !

On obtient un confort thermique équivalent pour une température d'air plus basse que dans une maison traditionnelle.

Coût

Pas de détail du système de chauffage.

Coût du bâtiment 4 000 000 F.B. environ
soit 23 000 F.B. / m² de plancher net (180 m²)

Rendement

La maison a été louée pour 6 000 F.B. par mois à un couple avec deux enfants en bas âge.

1/ Consommation électrique sur 368 jours, exprimée en kWh
(du 10 novembre 1980 au 13 novembre 1981) :

	Relevé du 10.11.80	Relevé du 13.11.81	Consommation annuelle
kWh jour	1 514	10 390	8 876
kWh nuit	808	4 750	3 942
JOUR + NUIT	2 322	15 140	12 818
Chauffage	1 127	7 900	6 773
Eau chaude sanitaire	165	2 007	1 842
Eclairage + électro-ménagers	1 030	5 233	4 203

2/ Répartition du montant annuel de la facture d'électricité :

— Chauffage :

$$5\ 409 \text{ kWh jour} \times 4,619 \text{ F} = 24\ 989 \text{ F}$$

$$1\ 364 \text{ kWh nuit} \times 2,718 \text{ F} = \underline{3\ 707 \text{ F}}$$

— Eau chaude sanitaire :

1 842 kWh nuit x 2,718 F = 5 007 F

- Eclairage + électro-ménagers :

$$\begin{array}{rcl} 3\,467 \text{ kWh jour} \times 4,619 \text{ F} & = & 16\,014 \text{ F} \\ 736 \text{ kWh nuit} \times 2,718 \text{ F} & = & \underline{\underline{2\,000 \text{ F}}} \\ & & 18\,014 \text{ F} \end{array}$$

FACTURE TOTALE 51 717 F
=====

Le montant de 28 700 F.B. prévu pour le chauffage représente :

94 % de la consommation, liée aux convecteurs électriques;

6 % de la consommation, liée à la régulation.

La consommation annuelle de chauffage vaut $56.5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$ (1980-1981).

Les chiffres relevés pour la période 1981-1982 fourniraient une consommation de $50 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$.

Economie estimée :

4 000 kWh par l'apport solaire passif

2 000 kWh par l'apport solaire actif

REMARQUE

SOLETRA construira 14 maisons du même type suite à l'intérêt porté par la S.D.R.W. (Société de Développement Régional Wallon).

Le schéma de principe est repris dans un rapport technique 19.

III.4. CONCLUSIONS.

- Il ressort de notre analyse que l'énergie solaire en chauffage de l'habitat reste un produit coûteux, loin d'être optimalisé, dont les expériences en cours fourniront de précieux enseignements. Au vu des surfaces de capteurs déployées (40 à 60 m^2 par maison unifamiliale en moyenne) et du stockage à court terme utilisé, les performances attendues dans notre climat doivent se révéler nettement inférieures aux installations solaires de production d'eau chaude.

— De façon à

- maximiser la fraction solaire du chauffage,
- augmenter la période de puisage utile dans le stockage,
- diminuer l'investissement lié au dimensionnement de l'appoint traditionnel tout en favorisant son rendement énergétique,
- favoriser une température du fluide de distribution la plus faible possible pour un confort équivalent,

la plupart des concepteurs actuels de maisons solaires ont veillé à réduire d'abord au maximum les besoins thermiques de l'habitat par une conception bioclimatique :

- bonne orientation, bon facteur de forme de l'habitat;
- bonne implantation vis-à-vis du terrain environnant;
- tirer le meilleur parti des apports solaires passifs pour assurer une partie des besoins : baies vitrées au Sud, maison fermée au Nord, matériau absorbant, ...

Plus que sa rentabilité, l'énergie solaire contribue à assurer une maison à basse consommation énergétique pour un prix de revient global de l'habitat satisfaisant (prix ramené à un m² de plancher chauffé). Paradoxalement, la conception bioclimatique de l'habitat peut aboutir à ce que les besoins sanitaires se révèlent supérieurs aux besoins de chauffage de l'habitat; si bien qu'ils contribuent pour l'essentiel à l'essai de rentabilisation de l'installation solaire.

IV.

IV. MESURES " IN SITU " ENTREPRISSES PAR L'UNITE DE RECHERCHE.

IV.1. PRINCIPE DE MESURE ADOPTÉ.

IV.1.1. Objectifs.

Idéalement, l'instrumentation d'installations solaires en fonctionnement requiert :

1° Les bilans thermiques de l'installation solaire en partant de l'évaluation des bilans thermiques de chacun des sous-systèmes qui la composent / 5 /.

L'équation qui régit le gain (ou la perte) calorifique Q des fluides en mouvement à travers chaque composant du système solaire global entre les temps t_1 et t_2 , s'écrit :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot cp (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) dt$$

m = débit massique

c = chaleur spécifique

T_{out} = température du fluide à la sortie

T_{in} = température du fluide à l'entrée

- La nature transitoire et aléatoire de la demande de chaleur,
 - les différences de température parfois très faibles à mesurer,
 - les débits relativement bas et le large domaine de variation de certains débits,
 - l'usage d'eau glycolée au lieu d'eau,
- font en sorte que cette opération du comptage requiert beaucoup

d'attention et qu'elle doit s'exécuter en continu ou à grande fréquence sur des périodes de temps très importantes : le mois, la saison de chauffe, l'année.

En complétant l'aperçu par la connaissance des énergies d'appoint auxiliaires (fuel, électricité, gaz), on peut évaluer l'économie d'énergie et la rentabilité globale d'une installation solaire.

2° La connaissance permanente du système en ses points stratégiques par la mesure, avec une précision limitée et définie, de :

- la température,
- du débit,
- la puissance calorifique et électrique à intégrer pour obtenir les énergies,
- l'ensoleillement,
- du temps de fonctionnement d'appareils.

Ces mesures, bien organisées, permettent en outre le calcul de l'efficience de chacun des sous-systèmes ou composants solaires (collecteurs, stockage, échangeur, unité de chauffage auxiliaire, etc.). Elles permettent également d'évaluer la connection de ces sous-systèmes dans le dessin global en veillant à s'assurer du rôle et de l'efficience du système de contrôle et de régulation qui régit les interactions entre sous-systèmes. Cela permet de détecter les défauts et permet les recommandations au niveau des dimensions et du fonctionnement des composants solaires et de leur interaction.

IV.1.2.

Après une analyse détaillée des systèmes d'acquisition existant sur le marché / 18 / en 1979-1980 (permettant de centraliser les données, de les stocker sur un support magnétique lui-même capable d'être relu par la suite pour un traitement des données), notre constat a

été le suivant :

- Utilisation d'un système d'acquisition *avec prétraitement de données sur site.*

Coût : 1 000 000 F.B. environ

- Utilisation d'un système d'acquisition *sans prétraitement de données sur site mais qui doit être suivi d'une unité informatique de stockage importante.*

La réduction et l'interprétation d'un grand nombre d'installations peuvent être réalisées par un simple calculateur central (éloigné du site). Cela permet d'économiser du temps et d'assurer un traitement uniforme des informations et de les stocker sur un support standardisé (type " Cartouche " DC 308 A).

Coût : 400 000 F.B. environ, sur le site.

N.B. : Matériel coûteux,

non adapté à la mesure de débit et de puissance électrique délivrant des impulsions à totaliser,
comportant un degré de sophistication inutile pour notre application (langage de programmation évolué, vitesse de transmission, diskette, ...).

Coût du calculateur central et de ses périphériques :

350 000 F.B., T.V.A. comprise

Ce dernier poste a fait l'objet d'une demande d'achat aux S.P.P.S. à laquelle il n'a pas été donné de suite !

En outre, ces budgets n'incluent pas encore l'achat des sondes (= capteurs de mesure) nécessaires à l'instrumentation d'un site, de façon détaillée.

Par ces méthodes, les coûts de l'instrumentation s'avèrent " hors de prix ", surtout si l'on poursuit l'objectif d'évaluer de façon statistique le potentiel de la technologie pour

différents systèmes solaires,

différents types de bâtiments,

différentes régions géographiques,

différents types d'utilisateurs,

différents constructeurs et installateurs.

IV.1.3.

L'Unité de recherche a dès lors opté pour des analyses à l'aide d'une instrumentation limitée, de coût modéré, couplée à une analyse soignée et continue, utilisant / 5 / :

1° *Des compteurs de chaleur décentralisés*, étalonnés en laboratoire (chapitre I), dont la valeur de débit d'eau totalisée et d'énergie totalisée est relevée une fois par jour, par lecture visuelle (le couplage d'un enregistrement automatique n'étant pas encore bon marché).

Ces compteurs de chaleur permettent d'avoir une connaissance journalière, mensuelle, annuelle, de :

- l'énergie solaire issue des collecteurs solaires entrant dans le(s) stockage(s);
- l'énergie solaire extraite du stockage :
 - a) énergie solaire contribuant au chauffage du bâtiment;
 - b) énergie solaire contribuant au chauffage de l'eau chaude sanitaire;
- l'énergie totale fournie du chauffage du bâtiment;
- l'énergie totale fournie du chauffage de l'eau chaude sanitaire.

2° Des compteurs électriques permettant la connaissance :

- de l'énergie ou des énergies électrique(s) d'appoint, c'est-à-dire contribuant à la charge thermique globale;
- de l'énergie ou des énergies électrique(s) de fonctionnement.

3° Divers

- Les autres énergies classiques (fuel et gaz) contribuent à la charge thermique de façon à évaluer, en %, la contribution solaire à la charge thermique globale.
- Compteurs horaires sur circulateur(s), vanne(s), résistance(s) électrique(s), ...

Aucune mesure de température absolue et d'insolation n'est prévue; ce qui ne permet pas de caractériser localement l'état du système (les moyens d'enregistrement y associés sont trop coûteux encore).

Cependant, les compteurs de chaleur à micro-ordinateur choisis permettent, grâce à un appareil de poche, d'effectuer un contrôle des débits, des températures et des puissances instantanées lors de la visite sur site.

Cette méthode permet d'évaluer l'économie d'énergie, la rentabilité globale d'une installation solaire ainsi que certains rendements d'utilisation journaliers, mensuels, annuels, de certains sous-systèmes à un prix abordable :

- 100 000 F.B. pour le suivi d'une installation de production d'eau chaude dans une maison unifamiliale;
- 200 000 F.B. pour le suivi d'une installation de chauffage d'une

habitation unifamiliale et pour de grosses installations de production d'eau chaude sanitaire.

Il est à remarquer que l'Unité de recherche utilise cette technique de mesure pour :

- l'installation de production d'eau chaude dans une maison unifamiliale du Foyer Jambois;
- l'installation de production d'eau chaude à l'école hôtelière de la Ville de Namur (matériel commandé depuis mai 1981 / 7/ et non délivré par les S.P.P.S.) : 100 m² de collecteurs solaires;
- l'installation de production d'eau chaude et d'appoint chauffage dans un logement social de la " cité solaire " de la SORELOBO à Colfontaine (depuis juin 1982) : 13.5 m² de collecteurs solaires.

L'UNERG (Bruxelles) procède de façon équivalente, pour le cas :

- d'une installation de production d'eau chaude pour douches à Genval (depuis mai 1981) : 30 m² de collecteurs solaires;
- d'une installation de production d'eau chaude dans un immeuble à appartements à Forest (depuis mai 1981) : 200 m² de collecteurs solaires.

L'Unité de recherche a établi de très bons contacts avec l'Unerg (Bruxelles), de façon à ce que la collaboration soit fructueuse.

D'autre part, afin de disposer d'un échantillon d'installations instrumentées plus large, d'autres instrumentation ont été soigneusement étudiées et préparées :

- cinq installations d'eau chaude sanitaire dans une maison unifamiliale d'une surface de 8 m², 6 m², 5 m², 4 m², 2 m²;
- l'école hôtelière de la Ville de Namur (pour rappel);
- maison solaire de :
 - M. THOMAS à Bierges (surface : 50 m²) / 20 /
 - M. MONLAERT à Beauvechain (surface : 51 m²) / 21 /
 - M. VAN SINT JAN à Lasnes (surface : 40 m²) / 8 /

IV.2. INSTALLATION DE PRODUCTION D'EAU CHAUX DANS UNE MAISON UNIFAMILIALE DU FOYER JAMBOIS.

Les rapports scientifiques / 9 /, / 10 / et / 11 / développent amplement les considérations émises ici.

IV.2.1. Description de l'installation.

Le Foyer Jambois a fait réaliser, par la Société S.I.S., une installation de deux panneaux solaires alimentant un chauffe-eau électro-solaire de 200 litres dans une maison unifamiliale sise à Jambes, 17 rue du Petit Ry. Il s'agit d'une installation telle que l'on en trouve sur le marché.

Deux possibilités s'offraient pour réaliser l'appoint de la chaleur :

- à l'aide de la résistance électrique d'appoint de 2.3 kW placée en haut du stockage pendant les mois d'été;
- à l'aide du boiler d'une contenance de 100 litres, associé à la chaudière à gaz.

Le chauffe-eau solaire comprend deux circuits complètement indépendants :

1. Le circuit de réchauffage de l'eau par l'énergie solaire.
2. Le circuit de soutirage, avec entrée d'eau froide et sortie d'eau chaude.

Ce chauffe-eau solaire constitue un ensemble complet, réalisé par l'assemblage de trois modules de base :

1. *Le collecteur solaire* :
2 collecteurs de $1,9 \text{ m}^2$ d'absorbeur net,
inclinaison 50° en pignon, direction Sud,
capacité en fluide caloporteur : $0,8 \text{ l/m}^2$.
2. *La centrale de régulation ACEC* - Centrale n° 6100.8202
+ relais + pompe de charge
3. *Le boiler accumulateur de 200 litres*,
isolé par de la laine de verre,
avec échangeur incorporé (échangeur tubulaire en acier
inoxydable).

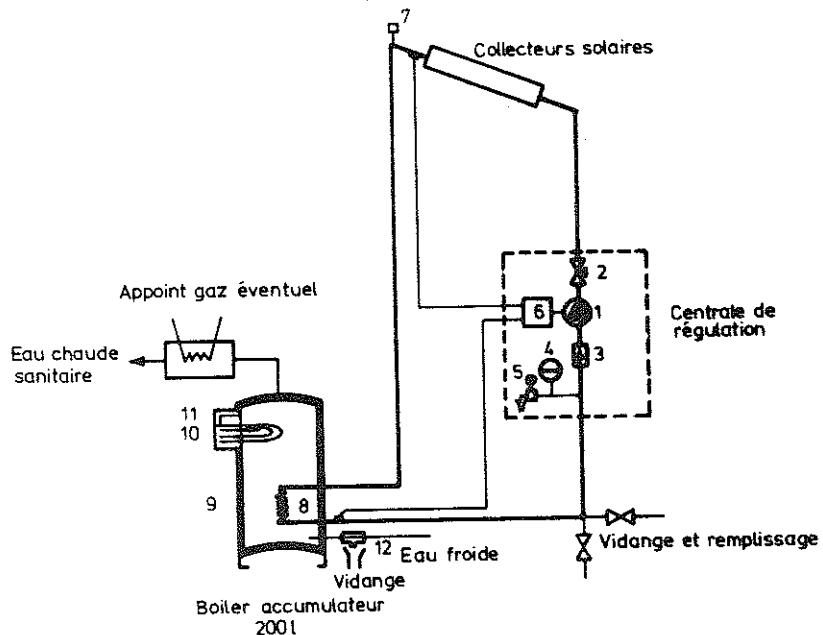
Prix de l'installation

75 400 F.B., T.V.A. comprise, en septembre 1979.

La maison a été louée à une famille de 2 adultes et de 6 enfants.

Le schéma de l'installation est repris à la figure 15 ci-après.

FIGURE 15



La liaison des collecteurs au stockage est en cuivre,
diamètre : 1/2 ", isolé par 15 mm de mousse.

1. Circulateur WILO, type RS 25/2, 220 V, monophasé, 1 400 tours par minute, 250 litres pour 15 m de hauteur manométrique.
2. Té de réglage du débit 3/4, qui permet d'optimaliser le débit (30 à 40 litres par heure et par mètre carré de capteur).
3. Clapet antiretour 3/4, pour éviter le phénomène de thermosiphon quand la pompe est arrêtée.
4. Vase d'expansion à membrane (capacité : 4 litres), pression de gonflage azote : 1,5 bar
5. Soupape de sécurité (tarée 3 bar) et manomètre.
6. Régulateur : thermostat différentiel avec deux sondes pour la commande de la pompe de circulation. Marque "RANCO", type E 38H 5000.
7. Purgeur d'air automatique au plus haut point de l'installation.
8. Echangeur tubulaire en acier inoxydable.
9. Isolation thermique : 5 cm de laine de verre.
10. Élément chauffant électrique : 2 300 W
11. Thermostat de contact avec sécurité.
12. Groupe de sécurité.

Mode de fonctionnement

Un thermostat différentiel avec deux sondes commande le fonctionnement du circulateur solaire.

Lorsque la différence de température entre les deux sondes atteint la valeur choisie, 2°C (réglable cependant de 2°C à 20°C), le système met en marche ou arrête la pompe de circulation du fluide caloporteur :

- mise en marche de la pompe dès que la température de la sonde du capteur est supérieure à celle de la sonde du chauffe-eau d'une valeur égale ou supérieure à celle du point de consigne;
- arrêt de la pompe dès que la température de la sonde du capteur est égale ou inférieure à celle du chauffe-eau.

Les sondes du thermostat différentiel sont placées dans deux gânes avec manchons d'étanchéité.

Il y a deux tés en fonte galvanisée 3/4" pour mise en place des gânes de sondes, directement à la sortie supérieure du capteur solaire et à la sortie inférieure de l'échangeur en bas du chauffe-eau.

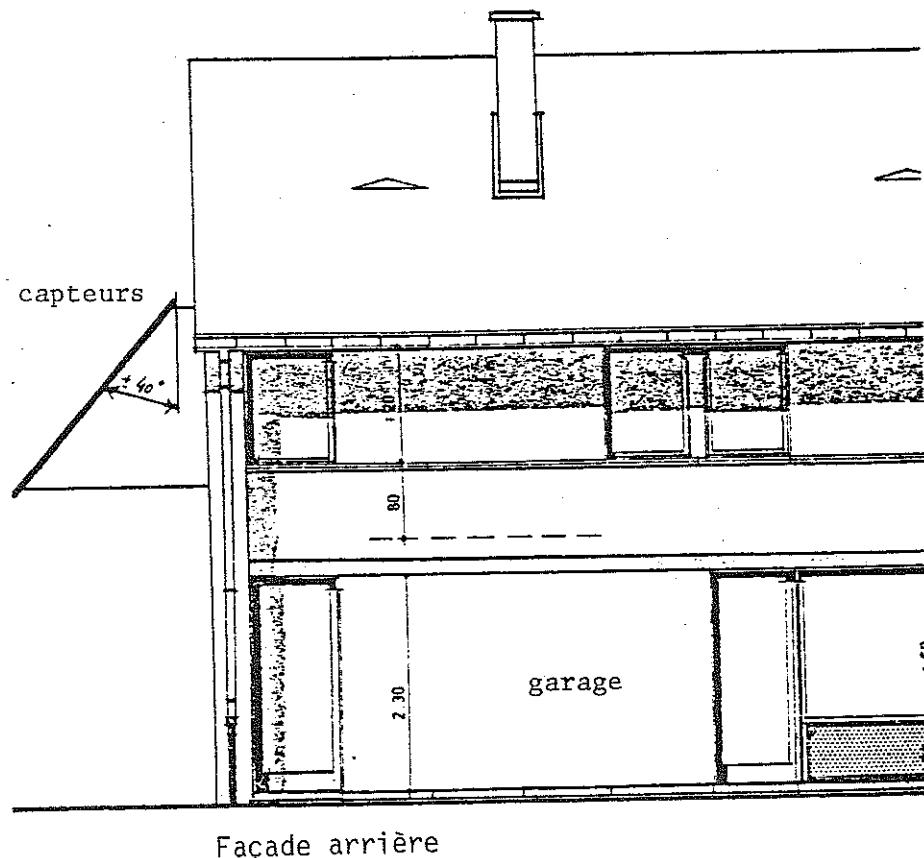
Contrôle de fonctionnement

La centrale de régulation comporte, en façade,

- un voyant rouge de mise sous tension du système de captation de l'énergie solaire;
- un voyant orange indiquant le fonctionnement de la pompe de circulation lorsqu'il y a apport d'énergie au chauffe-eau;
- un manomètre de contrôle de la pression du circuit primaire.

Emplacement des composants solaires

- Les capteurs en pignon.
- La chaufferie dans le garage.



Façade arrière

IV.2.2. Mesures.

Relevés journaliers de :

E_f = Energie électrique de fonctionnement du circulateur solaire et de la régulation (kWh),
par compteur électrique

H_c = Temps de fonctionnement du circulateur solaire (heure),
par compteur horaire

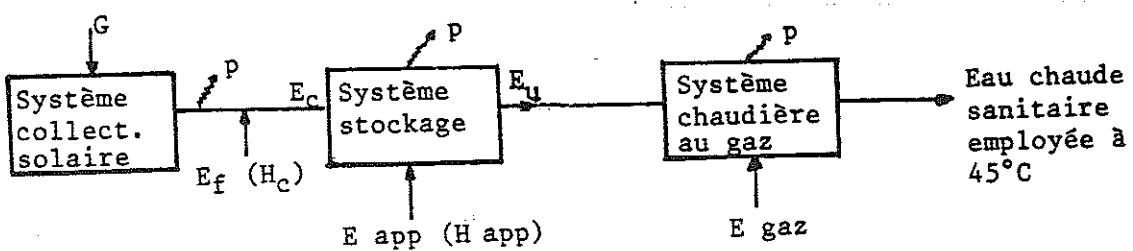
- E_c = Energie solaire cédée au stockage (kWh),
 par compteur de chaleur
- E_u = Energie électrosolaire utilisée (kWh),
 par compteur de chaleur
- E_{app} = Energie électrique d'appoint fournie au stockage (kWh),
 par compteur électrique
- H_{app} = Temps de fonctionnement de la résistance électrique
 (heure), par compteur horaire
- M = Consommation d'eau chaude journalière (litre / jour),
 par débitmètre
- J = Nombre code caractérisant l'état de la journée :
 1. Ciel serein, ensoleillé et sans nuage
 2. Ciel ensoleillé avec peu de nuage
 3. Ciel couvert
 4. Ciel très couvert (brouillard - brume)

Pendant la bonne saison, un solarimètre " KIPP ZONEN CM 6 " + enregistreur " KIPP ZONEN BD 9 " a permis de relever les valeurs d'ensoleillement dans le plan des capteurs.

Un relevé saisonnier de la consommation de gaz de la chaudière d'appoint n'a pas été effectué.

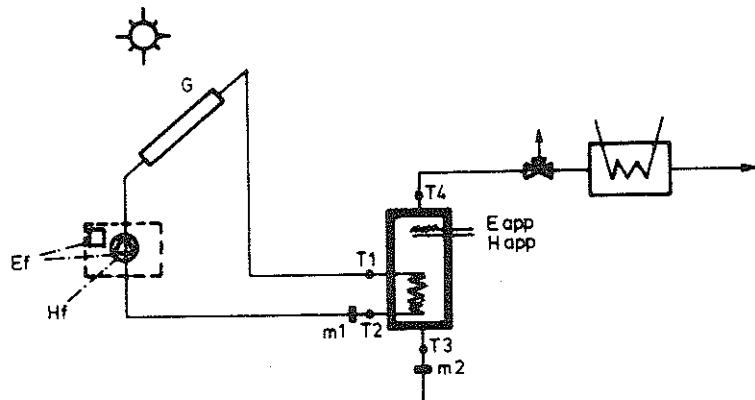
En effet, la part prise par le chauffage de l'eau et celle prise par le chauffage de l'habitat ne peuvent être distinguées.

Diagramme des flux énergétiques



p = pertes thermiques

FIGURE 16



Appoint électrique dans le stockage (régime été)
Appoint au gaz après le stockage (régime hiver)

— m_1 = débitmètre à piston rotatif V2TH - 20 mm

T_1, T_2 = sondes de Pt 100 Ω 0°C

Valeurs_lues

$$E_c = m_1 \cdot C_p (T_1 - T_2) \quad \text{en kWh}$$

m_1 en litres

— m_2 = débitmètre à turbine EMK type aquastar

T_3, T_4 = sondes de Pt 100 Ω 0°C

Valeurs_lues

$$E_u = m_2 \cdot C_p (T_4 - T_3) \quad \text{en kWh}$$

m_2 en litres

— G = solarimètre " Kipp Zonen CM 6 "

— E_f {
 E_{app} { = Compteurs électriques
 H_{app} {
 H_f { = Compteurs horaires

EMPLACEMENT DES POINTS DE MESURE SUR LE SCHEMA DE PRINCIPE

IV.2.3. Tableau des résultats mensuels globaux.

Voir tableau ci-après.

Les quantités E_c , E_u , E_f , H_c ont été définies auparavant.

M = consommation réelle d'eau chaude

$$\text{rendement d'utilisation du stockage : } \eta_s = \frac{E_u}{E_c}$$

COP = coefficient de performance de l'installation solaire

$$\text{COP} = \frac{E_u}{E_f}$$

T_s = température de sortie de l'eau préchauffée dans le boîtier électrosolaire, par le solaire seulement

TEF = température de l'eau froide relevée lors des contrôles sur site (10°C dans les études théoriques)

$$\Delta T_s = T_s - TEF$$

F_{sol} = fraction solaire théorique qui est le rapport entre l'énergie solaire réellement utilisée au préchauffage de l'eau sanitaire et l'énergie théorique à fournir pour porter l'eau de 10°C à 45°C

IV.2.4. Conclusions.

1° Lors de la mise en route de l'installation, il a été constaté un fonctionnement et un montage corrects.

Débit de fluide dans les capteurs solaires : 186 litres par heure soit 49 litres par heure et par m^2 .

TABLEAU 5

	E_C (kWh)	H_C (heure)	E_f (kWh)	E_f/E_C (%)	E_U (kWh)	n_S (%)	COP	M litre	ΔT_S (1/j)	F_{sol} (%)	T_{EF} (°C)	T_S (°C)
Mars 17 j ours	68.67	74.7	5.39	7.8	56.86	82.8	10.54	3 180	(177)	43.9	0	10
Avril	144.64	173.50	12.3	8.5	113.4	78.4	9.22	5 970	(199)	16.3	46.6	0
Mai	193.74	230.60	16.68	8.6	145.3	75	8.71	7 000	(225.8)	17.85	51.0	0
Juin	146.62	205.40	15.42	10.5	121.7	83	7.89	6 540	(218)	16	45.7	35.7
Juillet	172.72	236.10	17.30	10.0	134.2	77.7	7.75	6 740	(217.4)	17.1	48.91	1.22
Août	179.87	255.80	18.55	10.3	143.08	79.5	7.71	5 910	(190.6)	20.8	59.5	20.2
Septembre	177.53	207.02	14.98	8.43	150.5	84.8	10.05	8 020	(267.3)	16.13	46.1	0
Octobre	72.08	89.04	6.58	9.1	58.09	80.6	8.82	7 220	(240)	6.92	19.8	0
Novembre	42.04	57.4	4.15	9.9	35.7	84.9	8.60	5 780	(186.4)	5.31	15.1	0
Décembre	10.53	16.4	1.23	11.7	7.50	71.2	6.10	3 330	(107.4)	1.94	5.5	0
Janvier	57.02	62.7	4.56	8.0	43.62	76.4	9.56	4 100	(132.25)	9.15	26.1	0
Février	104.06	102.0	7.29	7.0	82.68	79.4	11.34	5 760	(205.7)	12.34	35.2	0
Mars 16 j ours	79.81	61.7	4.80	6.0	65.5	82.1	13.6	3 930	(245.6)	14.33	40.9	0
<hr/>												
<u>ANNEE</u>												
Valeur totale	1 449.33	1 772.36	129.23	8.9	1 158.13	79.9	8.96	73 480	(199.7)	13.55	38.7	13.5
Valeur moyenne					304.7							27.05
Valeur par m^2	381.4											
<u>ETE (04 - 09)</u>												
Valeur totale	1 015.12	1 308.42	95.23	9.4	808.18	79.6	8.49	40 180	(219.5)	17.30	49.4	8.8
Valeur moyenne					212.68							
Valeur par m^2	267.1											
<u>HIVER (10 - 03)</u>												
Valeur totale	434.21	463.94	34.00	7.8	349.95	80.5	10.2	33 300	(182.0)	9.03	25.82	0
Valeur moyenne					92.09							
Valeur par m^2	114.3											

L'installation s'est révélée tout à fait fiable pendant la première année de mesures et n'a nécessité aucune maintenance. L'échangeur tubulaire, placé en bas du stockage, possède un rendement d'échange insuffisant.

- 2° L'énergie solaire fournie au stockage par les capteurs solaires a été de $1\ 449.3\ kWh/an$, soit $381.4\ kWh/m^2.an$. La période d'été (d'avril à septembre) a fourni $267.1\ kWh/m^2$, soit 70 % de la valeur annuelle. Le circulateur a fonctionné 1 772 heures. La consommation électrique du circulateur et de la régulation a été de $129.2\ kWh$, soit 8,9 % en moyenne de l'énergie collectée. Le rendement de captage des collecteurs solaires vaut 40 à 41 % en moyenne.
- 3° L'énergie solaire réellement utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire a été de $1\ 158\ kWh/an$, soit $305\ kWh/m^2.an$.
- 4° Le rendement d'utilisation du stockage s'est avéré égal à 79.9 % en moyenne. La différence relevée entre la période estivale et la période hivernale s'est avérée fort faible. Dès lors, le rendement d'utilisation de l'énergie solaire incidente se situe entre 31 à 32 % en moyenne.
- 5° Le coefficient de performance spécifique à l'utilisation de l'énergie solaire a été calculé : COP = 8.96 en moyenne.
- 6° Le puisage d'eau chaude journalier moyen s'est avéré égal à la capacité du stockage : 199.9 litres par jour, soit 25 litres par jour et par personne. La consommation moyenne a été supérieure de 10 % en période estivale et inférieure de 10 % en période hivernale. Les mesures démontrent également l'influence primordiale de la consommation d'eau chaude sur les performances d'un chauffe-eau solaire : impact défavorable d'une faible consommation sur le rendement d'utilisation du stockage.

SERVICES DE PROGRAMMATION DE LA
POLITIQUE SCIENTIFIQUE & FACULTE
POLYTECHNIQUE DE MONS (CRES)

INSTALLATION JAMBES

VERSION 1

DONNEES

capteur

surface 3.6 m²

eta0 0.750

coef global Pertes ... 4.0 W/m²

azimut 0° d

Pente 50° d

tuyauterie

puis circulateur 73 W

coef Pertes 3.0 W/C

eff echangeur 70

stockage

volume 200 m³

coef conduct isolant .040 W/mC

charge

consommation 200 l/jour

PERFORMANCES ANNUELLES

fractions

mesuré

F solaire 416

F auxiliaire 060

F apport 548

F solaire simplifiee 392 .387

quantites d'énergie

rayonnement recu ... 3589. kWh

charge 2967. kWh

solaire stockee ... 1366. kWh 1449 kWh

auxiliaire 196. kWh

apport 1803. kWh

Pertes du stockage 124. kWh

apport solaire 1164. kWh

apport solaire /m² 306. kWh/m² 305 kWh/m²

7° En regard des conditions de l'installation et de son utilisation, l'élévation moyenne de l'eau froide a été de 13.55 °C grâce à l'énergie solaire, avec la distinction suivante :

- période hivernale 9.03°C
- période estivale 17.3°C

En régime été, on a relevé 58 jours pour lesquels la température de l'eau chaude fournie était supérieure à 45°C.

8° La fraction solaire théorique a été de 38.7 % en moyenne sur l'année.

Pour la période estivale, elle a été de 49.4 %
($S = 4 \text{ m}^2$; $M = 210 \text{ l/j}$).

Ces valeurs sont relativement faibles : la contribution de l'énergie solaire était réduite. Par ailleurs, la puissance d'appoint (électrique) est également faible (2.3 kW).

En conséquence, la chaudière à gaz a dû fonctionner pendant la saison d'été afin d'assurer à l'eau une qualité thermique suffisante. Cela permet d'expliquer que l'appoint électrique n'a apporté que 4.8 % de l'énergie théorique nécessaire.

Cette fraction réduite correspond en fait à une période d'arrêt de la chaudière (42 jours).

9° La comparaison entre les " mesures "
et le " modèle de simulation SYS5-CHAUEAU "
s'est avérée bonne.

IV.3. INSTALLATION DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE + APPONT CHAUFFAGE
DANS UN LOGEMENT DE LA SORELOBO A COLFONTAINE.

IV.3.1. Généralités.

— La Société SO.RE.LO.BO décidaient, en 1978, l'implantation d'une " Cité solaire " regroupant un complexe de 18 logements sociaux pour lesquels l'énergie solaire assurerait en priorité le chauffage de l'eau sanitaire.

En demi-saison, l'excès d'énergie serait utilisé pour le chauffage des locaux.

Le principe de la toiture solaire intégrée est adopté.

Le cahier des charges est rédigé en février 1979 par le bureau d'études C.T.E.S..

L'installation solaire est réalisée en février - mars 1982 et mise en fonctionnement en mai 1982.

Plusieurs types de logements sont à distinguer :

Type A Appartement à un niveau sur garage
 1 chambre

Type B'C' Appartement à deux niveaux sur garage
 2 chambres

Type B D Appartement à deux niveaux à rue
 3 chambres

Les logements sont bien isolés et le calcul des déperditions répond à la norme DIN 4701.

Les principes de chauffage des locaux et de l'eau sanitaire sont identiques pour chaque type de logement :

	BOILER SOLAIRE ACV (1)	SURFACE ABSORBEUR (m ²)	DEBIT CIRCUIT CHAUFFAGE (3/4 ") (m ³ / h)
Type A	170	5.52	0.2
Type B'C'	230	7.36	0.36
Type B D	290	12.88	0.41

Les corps de chauffe sont des radiateurs en acier à panneaux, non surdimensionnés, dont les émissions calorifiques suivent la norme NBN 236.

Dans tous les appartements, la production d'eau chaude sanitaire sera assurée par un échangeur instantané, placé en aval du stockage solaire et alimenté par l'eau de la chaudière à gaz.

Cette dernière assure le chauffage des locaux. Sa puissance utile est de 17.4 kW pour un régime variant de 30°C à 90°C.

- En avril 1982, l'Unité de recherche réalise le projet d'instrumentation d'un des logements.

Le logement retenu (type B D) pour l'expérimentation, est situé à rue, à l'extrême droite, faisant le coin avec la rue voisine.

L'instrumentation est placée en mai - juin 1982.

IV.3.2. Description de l'installation.

Caractéristiques du logement

- Surface de plancher chauffée 85 m²
- Volume 220 m³

- Coefficient de perte thermique 370 W / K
soit une déperdition maximale de 10.36 kW
d'après la norme DIN 4701
- Bonne isolation du logement.
- Ce dernier a été loué à 4 personnes.

Caractéristiques des capteurs

- Absorbeurs en cuivre, sélectifs
- Placés en toiture
- Simple vitrage " Sécurit " 4 mm
- Profils en aluminium " Portal " faisant partie intégrante du bâtiment
- Isolation de la toiture par de la laine de roche d'une épaisseur de 13 cm
- Surface : 12.88 m²

Le fluide glycolé parcourant les absorbeurs alimente :

- la première enveloppe d'un stockage ACV 290 litres à triple enveloppe, qui assure le préchauffage solaire de l'eau sanitaire (partie centrale du stockage);
- l'eau de circuit du chauffage (enveloppe concentrique à la partie centrale).

D'autre part,

la production d'eau chaude est assurée en appoint par un échangeur de faible dimension, alimenté par l'eau de la chaudière.

Une vanne thermostatique avec bypass de l'eau primaire maintient la température de l'échangeur à 60°C.

Le débit de puisage est limité à 5 litres par minute. Lors du puisage de l'eau sanitaire, un flow switch réglé à 2 litres par minute coupe le circulateur du circuit de chauffage et met en marche le circulateur de l'échangeur.

Le régulateur différentiel commande la mise en marche du circulateur du circuit solaire, puis de la vanne solénoïde aussi longtemps que la différence entre la température des capteurs et celle du réservoir de stockage est supérieure à 5°C.

On a pu constater que la sonde du stockage (Sia) a été déplacée de la position 1 à la position 2 (voir schéma de principe, figure 17), soit sur la sortie de l'eau chaude sanitaire (ce qui est fort peu adéquat !!!).

Régulation du chauffage solaire d'appoint

En demi-saison, l'excès d'énergie accumulé dans l'échangeur - accumulateur sera utilisé pour le chauffage des locaux.

L'échangeur - accumulateur possède, à sa partie supérieure, une sonde de température T_{as} . La température du retour de l'eau de chauffage est mesurée par une sonde T_R .

- Lorsque $T_{as} > T_R + 15^\circ C$

la vanne 3 voies sur le retour du chauffage provoque un *bypass* de l'eau de chauffage via l'échangeur - accumulateur.

- Lorsque $T_{as} < T_R + 15^\circ C$

la vanne 3 voies se ferme; le cycle initial est repris par l'eau de chauffage.

Constatons que le choix d'une différence $T_{as} - T_R$ élevée ($= 15^\circ C$)

et l'usage de radiateurs non surdimensionnés imposent une température élevée à la distribution et dans le stockage. Celle-ci est favorisée par le rapport V / S choisi, inférieur à 50 litres par m^2 , au détriment cependant du rendement intrinsèque des capteurs solaires.

IV.3.3. Mesures.

Relevés hebdomadaires au moins de :

E_c (compteur de chaleur) = énergie issue des collecteurs solaires cédée au stockage de 290 litres

E_u (compteur de chaleur) = énergie solaire utile contribuant au (pré)chauffage de l'eau sanitaire

E_{uc} (compteur de chaleur) = énergie solaire utile contribuant au chauffage de l'habitat

E_a (compteur de chaleur) = énergie utile fournie par la chaudière à l'eau sanitaire via l'échangeur

E_{ag} (compteur de chaleur) = énergie utile fournie par la chaudière globalement pour les besoins de chauffage de l'habitat et de l'eau sanitaire

Les débits d'eau circulant dans chacun de ces circuits sont également relevés : m_c , m_u , m_{uc} , m_a , m_{ag}

E_f (compteur électrique) = énergie électrique consommée par le circulateur solaire P_3

Les compteurs horaires de temps de fonctionnement suivants ont été placés :

H_1 = temps de fonctionnement de la pompe P_1

H_2 = temps de fonctionnement de la pompe P_2

H_3 = temps de fonctionnement de la pompe P_3

H_4 = temps de fonctionnement du brûleur de la chaudière

H_5 = temps de fonctionnement de la vanne 3 voies en ouverture vers le boîtier solaire

La consommation globale de gaz de l'habitat est mesurée : C gaz.
 Un thermomètre indicateur représentatif de l'eau chaude sanitaire en sortie de l'accumulateur est relevé.

Points de mesure

Voir emplacement sur la figure 17.

— m_c = débitmètre à turbine
 type PMW - NH 15 mm avec une précision de 2 %

T_1, T_2 = sondes de Pt 100 Ω 0°C
 précision : 0.05°C

Valeurs lues

$$E_c = m_c \cdot C_p (T_1 - T_2) \quad \text{en kWh}$$

m_c en litres

— m_u { débitmètres à turbine
 m_{uc} { type EMW - RH 15 mm
 avec une précision de :
 m_a { - 2 % de 150 à 3 000 litres par heure
 m_{ag} { - 5 % de 30 à 150 litres par heure

— T_3 à T_{10} = sondes de Pt 100 Ω 0°C
 précision : 0.05°C

Valeurs lues

$$E_u = m_u \cdot C_p (T_3 - T_4) \quad \text{en kWh}$$

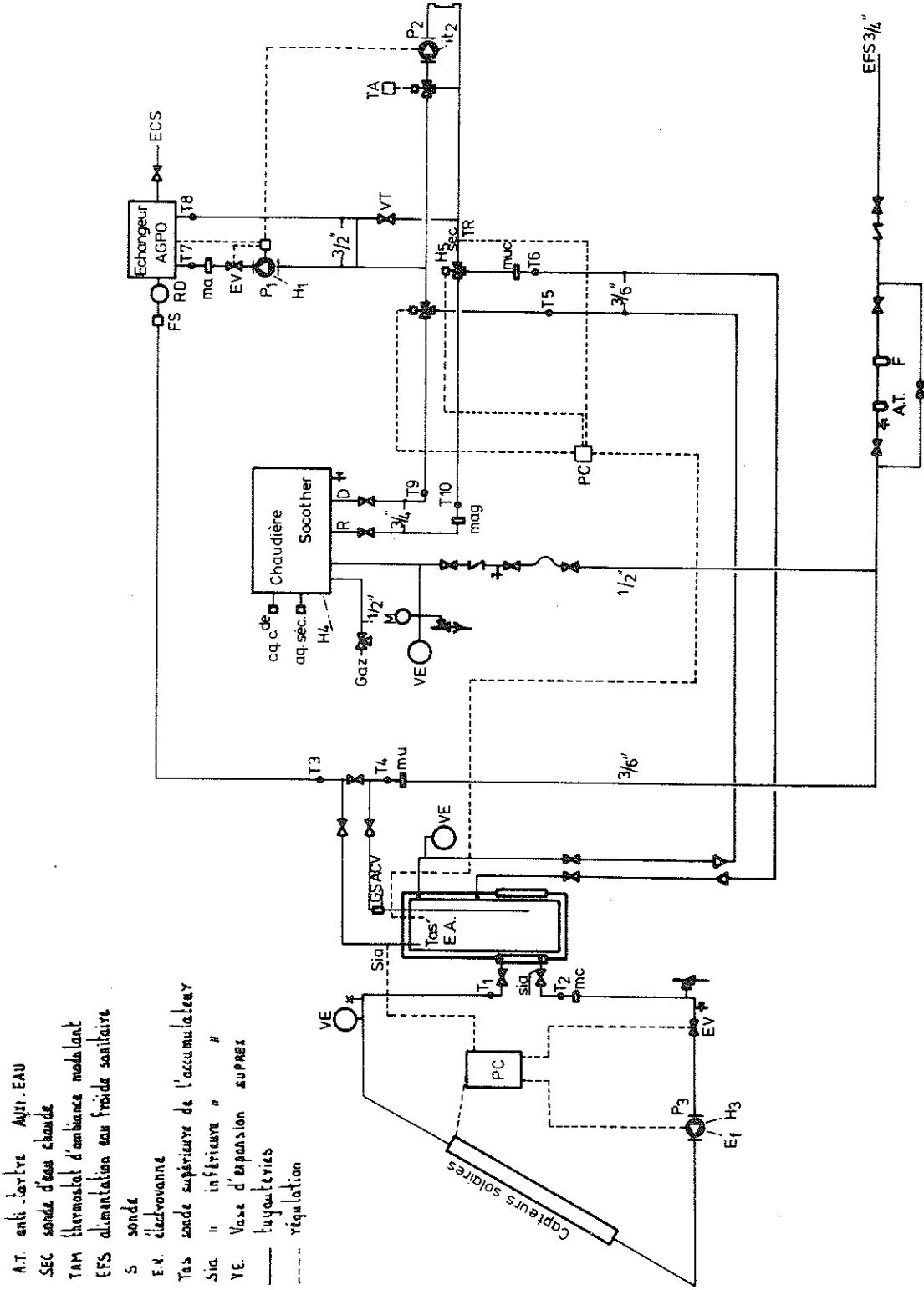
$$E_{uc} = m_{uc} \cdot C_p (T_5 - T_6) \quad \text{en kWh}$$

$$E_a = m_a \cdot C_p (T_7 - T_8) \quad \text{en kWh}$$

$$E_{ag} = m_{ag} \cdot C_p (T_9 - T_{10}) \quad \text{en kWh}$$

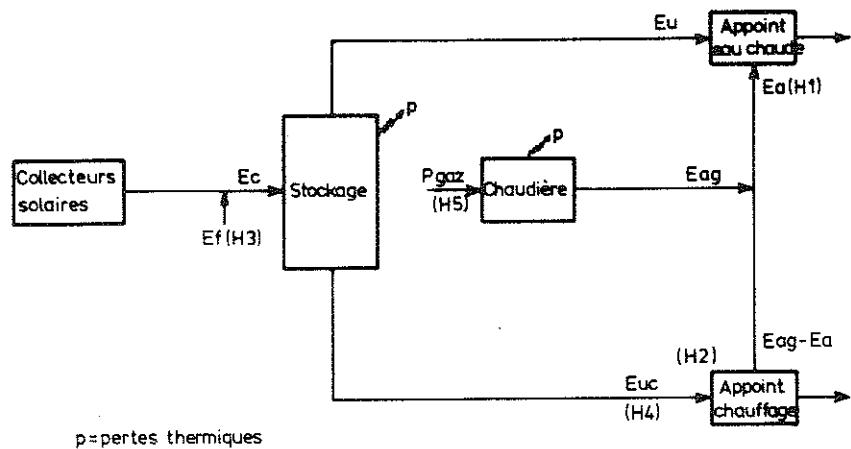
Lecture des débits respectifs sur chaque débitmètre

FIGURE 17



IV.3.4. Analyse des mesures.

Le diagramme des flux énergétiques est repris ci-après :



Valeurs calculables sur une base hebdomadaire et mensuelle au moins de :

- E_c , E_f , E_u , E_a , E_{ag} , E_{uc} , E_{ag-uc} , P_{gaz}
avec $P_{gaz} = \text{Valeur énergétique de la consommation du gaz}$

- Rendement d'utilisation du stockage : $\frac{E_u + E_{uc}}{E_c}$

$$p(\text{stockage}) = E_c - E_u - E_{uc}$$

- Charge thermique eau chaude : $E_u + E_a$

$$\text{fraction solaire} = \frac{E_u}{E_u + E_a}$$

- Charge thermique chauffage habitat : $E_{uc} + E_{ag} - E_a$

$$\text{fraction solaire} = \frac{E_{uc}}{E_{uc} + E_{ag} - E_a}$$

- Rendement global de la chaudière : $\frac{E_{ag}}{P_{gaz}}$

- Coefficient de performance de l'énergie solaire utilisée :

$$\frac{E_{uc} + E_u}{E_f}$$

N.B. : Avec d'autres moyens financiers, l'étude pourrait être complétée par :

- la connaissance des températures en plusieurs points stratégiques du circuit (circuit solaire, stockage, radiateur, eau chaude ...);
- la mesure de la température extérieure et de l'insolation dans le plan des capteurs;
- la mesure de la température intérieure, pièce par pièce, ce qui permettrait de définir l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exigée.

Ces mesures permettraient :

- d'évaluer le rendement d'utilisation de l'énergie solaire incidente (le calcul peut cependant être exécuté en regard de la valeur IRM ou de l'année type de référence);
- de détecter les défauts de fonctionnement éventuels;
- de calculer les degrés-jours équivalents de l'habitat.

IV.4. MAISON " GILLET " À GREZ-DOICEAU / 22 /.

IV.4.1. Principe du suivi scientifique adopté.

Le suivi est basé sur la collaboration la meilleure entre l'Unité de recherche et le propriétaire, de façon à réduire les coûts d'instrumentation par l'Unité de recherche à moins de 200 000 F.B..

Le micro-ordinateur TRS 80 (16 K de mémoire), dont le propriétaire dispose pour la régulation, sera utilisé pour l'acquisition des données avec les modalités suivantes :

- a) Ajout d'une imprimante pour l'enregistrement des valeurs horaires (moyennes intégrées, bilans calorifiques, ...), aux frais des S.P.P.S..
- b) Choix, achat, interfaçage au micro-ordinateur des débitmètres et des compteurs électriques par l'Unité de recherche.
- c) Considérer comme un acquis les sondes déjà placées par le propriétaire, en vérifiant leur précision :
 - 2 solarimètres " Light Dependent Resistor "
 - 1 anémomètre
 - 9 températures (T_1 à T_9) " LM 3911 "
 - 5 thermostats " LM 3911 "
- d) Ajout de sondes supplémentaires nécessaires au bilan thermique de la maison et ce, conformément à l'optique de l'Unité de recherche qui spécifiera le programme d'acquisition à exécuter et les rapports horaires et journaliers à afficher.

Il s'est avéré que les sondes de température déjà placées par le propriétaire n'offraient pas la précision demandée par l'Unité de recherche. Celle-ci a repensé elle-même le problème.

Le suivi est opérationnel pour la saison de chauffe 1982-1983.

IV.4.2. Présentation de l'installation.

IV.4.2.1. Généralités.

L'installation a été construite entre novembre 1979 et décembre 1980.

Localisation

66, rue du Centry à 5980 - GREZ DOICEAU

Régime d'occupation

- En semaine : rarement
- En week-end : toujours

Disposition des locaux

Voir figures 18 et 19 ci-après.

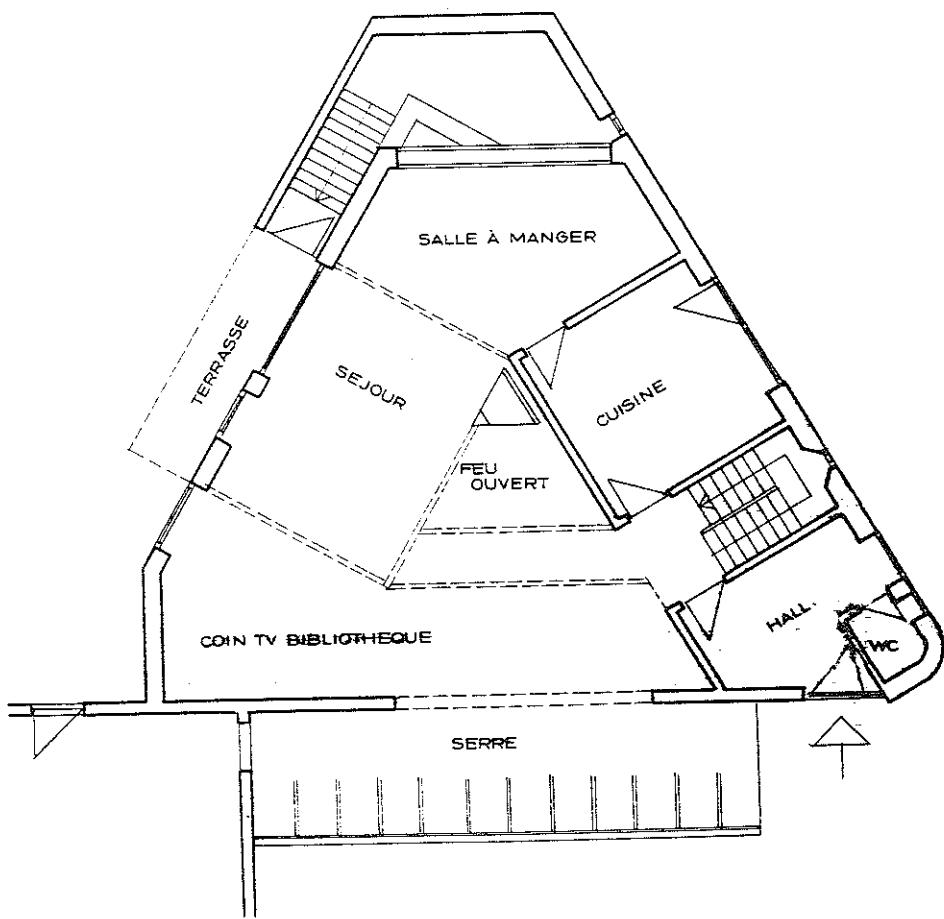
Le réseau des planchers chauffants couvre toutes les pièces du rez-de-chaussée et de la salle de bains à l'étage.

Une serre de 9 mètres de long, est isolée du bâtiment en été. Elle joue son rôle en mi-saison et les soirées fraîches d'été.

Caractéristiques

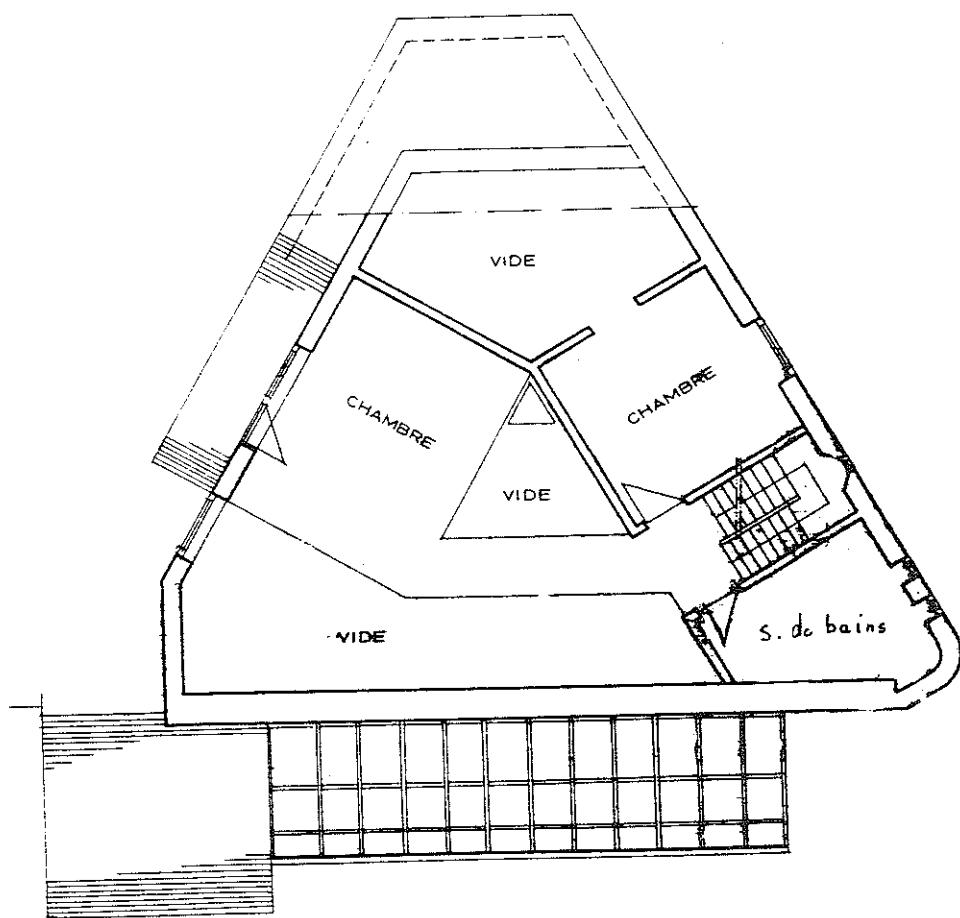
- Conception bioclimatique : ouverte au Sud fermée au Nord
- Très bonne isolation du bâtiment
 K moyen = $0.67 \text{ W/m}^2 \cdot {}^\circ\text{C}$

FIGURE 18



REZ - DE - CHAUSSEE

FIGURE 19

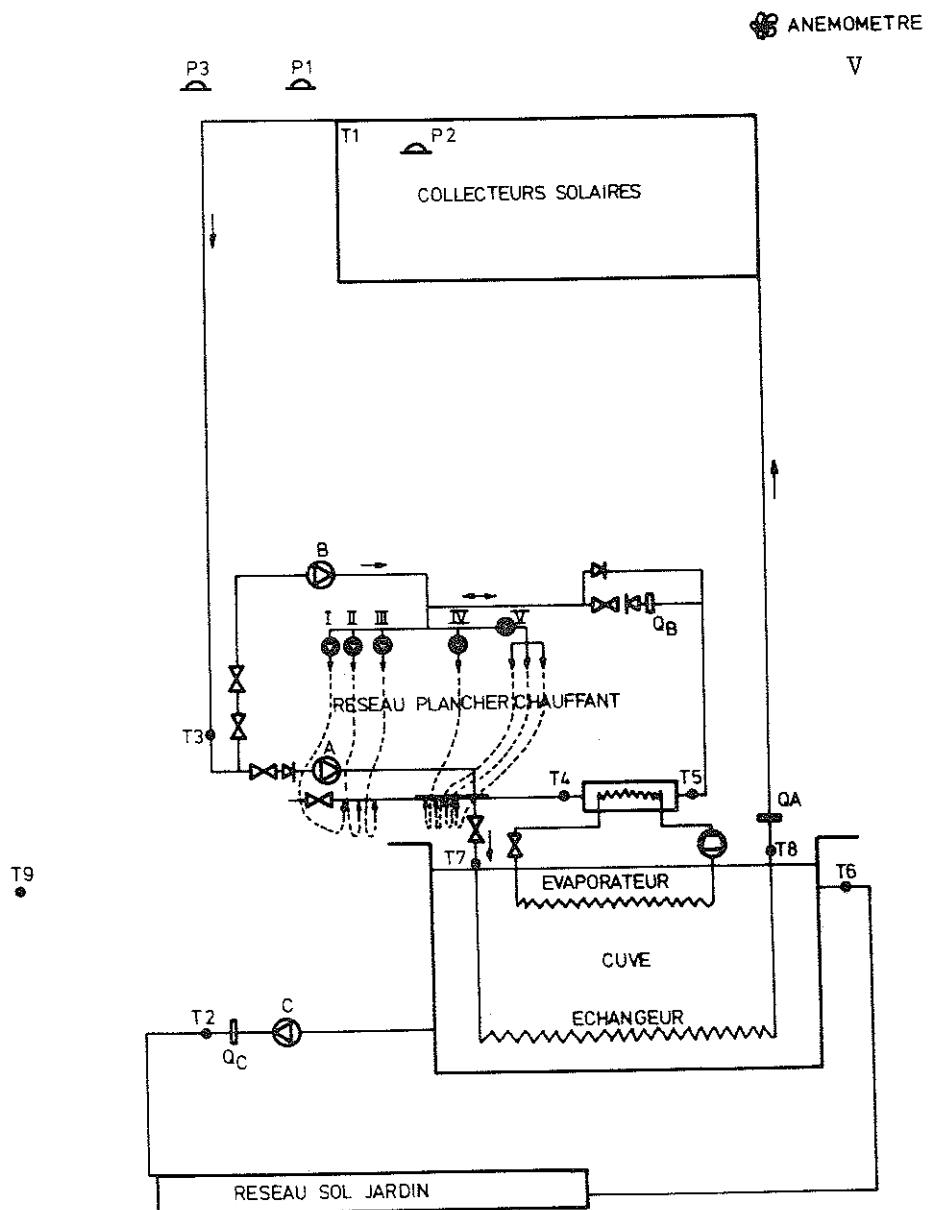


ETAGE

IV.4.2.2. Chauffage solaire " basse température ".

- a) Déjà présenté au chapitre III.2.1.3. B.2., le schéma de principe est représenté par la figure 20 ci-après :

FIGURE 20



N.B.

Circuit collecteur

- de 200 à 3 000 litres par heure
- fluide : propylène glycol (30 % en poids)
- pompes A et B : 5 vitesses, 220 V, monophasé
- en général, fonctionnement à la vitesse maximum

Circuit condenseur pompe à chaleur

- de 200 à 3 000 litres par heure
- fluide : propylène glycol (30 % en poids)

Circuit sol jardin

- de 500 à 3 000 litres par heure
- fluide : eau
- pompe C : 5 vitesses, 220 V, monophasé
- en général, fonctionnement à la vitesse maximum

Circuit plancher chauffant

- 5 circulateurs : 5 vitesses
- fluide : propylène glycol (30 % en poids)
- caractéristiques électriques de chaque circulateur : 220 V, monophasé

CIRCULATEUR I

- Prévu pour le chauffage de la salle de bains
- Fonctionnement sur la vitesse 1
- Débit : 200 litres par heure

CIRCULATEUR II

- Prévu pour le chauffage du hall d'entrée et de la cage d'escalier
- Fonctionnement sur la vitesse 1
- Débit : 200 litres par heure

CIRCULATEUR III

- Prévu pour le chauffage de la cuisine et le coin où est placé le processeur
- Fonctionnement sur la vitesse 1
- Débit : 200 litres par heure

CIRCULATEUR IV

- Prévu pour le chauffage de la partie ensoleillée par la baie du living
- Fonctionnement sur la vitesse 1
- Débit : 200 litres par heure

CIRCULATEUR V

- Prévu pour le chauffage de la salle de séjour, partie ouest ensoleillée du living
- Fonctionnement sur la vitesse 3
- Débit : 600 litres par heure

Compresseur pompe à chaleur

220 V, triphasé, 3 kW

Courant de démarrage : 40 A maximum

Principes de la régulation

- Cinq thermostats d'ambiance commandent individuellement les circulateurs I à V et indirectement la pompe à chaleur asservie à son pressostat haut.
Note : Si la température " source chaude " est inférieure à 35°C, la pompe à chaleur fonctionne.
 - Les thermomètres 1, 2 et 3 règlent le fonctionnement du capteur et de l'échangeur jardin, suivant un programme modifiable :
 - Si $t_1 - t_2 > 8^\circ\text{C}$ (*)
le circulateur A fonctionne
(circulation des capteurs solaires vers l'échangeur de la cuve)
 - Si $t_1 - t_2 < 3^\circ\text{C}$ (*) et $t_6 > t_2$
le circulateur C fonctionne
(circulation de la cuve vers le réseau du sol " jardin ")
 - Si 3°C (*) $< t_1 - t_2 < 8^\circ\text{C}$ (*) et $t_6 > t_2$
les circulateurs A et C fonctionnent
(stockage)
 - Si $t_3 > 35^\circ\text{C}$ et une demande des thermostats d'ambiance
le circulateur B remplace le circulateur A
(chauffage solaire direct et la cuve stocke l'excédent)
- (*) ou toutes autres valeurs de consigne

- Bilans thermiques prévus :

$Q_C (t_6 - t_2)$ = énergie reçue du jardin

$Q_C (t_2 - t_6)$ = énergie stockée au jardin (en été)

$Q_A (t_7 - t_8)$ = énergie stockée dans la cuve

$Q_A (t_3 - t_8)$ = énergie solaire captée

$Q_B (t_5 - t_4)$ = énergie fournie par la pompe à chaleur

Solarimètre 1 = rayonnement solaire incident

Solarimètre 2 = rayonnement solaire sous polycarbonate

REMARQUES

- En régime été, le capteur solaire est "ouvert à l'air"; de ce fait, un thermosiphon est créé et une ventilation de la maison est favorisée.
L'échange air / air dans le capteur solaire est privilégié en mi-saison.
- En régime hiver, le capteur solaire est "fermé à l'air"; de ce fait, seul *l'échange air / eau* a lieu dans le capteur.
- La régulation décrite dans le projet est "tout ou rien".
Vu l'inertie importante présentée par le chauffage par rayonnement dans le sol, une régulation plus sophistiquée ne se justifie pas selon le propriétaire.
- Il est prévu, vers la mi-août / début septembre, de relever la température de la cuve jusqu'à 20°C et d'envoyer l'excédent de calories solaires dans le sol (stockage au lieu de puisage).
Dans ce cas, le bilan $Q_C (t_6 - t_2)$ devient négatif.

Pour le dépouillement des mesures, il est indispensable de connaître à quel moment et pendant quelle durée ce bilan a été négatif.

Le propriétaire estime que pour ramener la température de la cuve de 20°C à 2°C, il aura une autonomie de chauffage ("volant thermique") de cinq semaines sans soleil, moyennant l'emploi de la pompe à chaleur sur boucle d'eau.

b) Un bilan thermique prévisionnel a été dressé par le propriétaire.

Voir tableau ci-après.

Nous y remarquerons que :

- les gains solaires passifs représentent 39 % des déperditions moyennes;
- les déperditions à couvrir représentent 61 % des déperditions moyennes;
- les gains solaires actifs utiles représentent 59 % des déperditions à couvrir;
- les apports du jardin représentent 16 % des déperditions à couvrir;
- la consommation de la pompe à chaleur représente 25 % des déperditions à couvrir.

$$\eta_{capteur} = \frac{\text{solaire capté}}{\text{gains totaux}} = 58,9 \%$$

$$\eta_{interne} = \frac{\text{actif utile}}{\text{solaire capté}} = 24,26 \%$$

$$\eta_{utilisation} = \eta_{capteur} \times \eta_{interne} = 14,3 \% \text{ d'énergie solaire}$$

Mois	Déperditions moyennes passifs solaires	Gains solaires	Déperditions à couvrir	Gains totaux	Solaire captée	Actifs utilisés	Appartement jardinier	Consommation à chaleur pompes à chaleur	Consommation auxiliaires	Chaudrage	TOTAL
SEPTEMBRE	1 305	1 282	23	8 415	6 673	23	--	27,4	--	27,4	
OCTOBRE	1 708	1 146	562	7 338	5 247	422	--	140	14,3	24,5	178,8
NOVEMBRE	2 465	623	1 842	4 156	2 215	1 382	--	460	10,4	80,5	550,9
DECEMBRE	3 316	483	2 833	3 241	801	1 324	708	7,0	123,9	838,9	
JANVIER	3 096	591	2 505	3 979	1 345	1 345	534	626	10,0	109,6	745,6
FEVRIER	2 706	711	1 995	4 610	2 098	1 496	--	499	13,5	87,3	599,8
MARS	2 437	1 220	1 217	7 997	4 470	913	--	304	20,8	53,2	37,2
AVRIL	1 878	1 304	574	7 892	5 232	430	--	144	28,7	25,2	197,9
Totaux saiso	18 911	7 360	11 551	47 628	28 081	6 812	1 858	2 881	132,0	504,2	3 511

Le bilan thermique dressé par le propriétaire est basé sur :

- un coefficient de perte thermique global de 268.4 W / K⁻¹, dont
 - 167 W / K⁻¹ par transmission;
 - 101.4 W / K⁻¹ par ventilation;
- un besoin maximal de 10 kW par - 16°C à l'extérieur et + 20°C à l'intérieur.

Le programme LPB 3, faisant intervenir la notion de degré-jour équivalent, a été appliqué au bâtiment. Il fournit :

- un coefficient de perte thermique global de 380.6 W / K⁻¹, dont
 - 251.6 W / K⁻¹ par transmission;
 - 129 W / K⁻¹ par ventilation;
- un besoin annuel de chauffage de 20 900 kWh : voir tableaux 6 et 6 bis ci-après.

IL APPARAÎT QUE LES CALCULS EFFECTUÉS PAR LE PROGRAMME " LPB 3 " NE SONT PAS EN ACCORD AVEC LES PRÉVISIONS DU PROPRIÉTAIRE QUI A SOUS-ESTIMÉ LES DÉPERDITIONS À COUVRIR.

De plus, en se basant sur une température de non-chauffage

$$t_{NH} = 18^\circ C$$

une température extérieure inférieure à - 8°C ne devrait pas assurer le confort exigé.

OUTLINE PROPOSALS : ACTIVITIES N° 12 AND 13
 CALCULATION OF THE RECUPERATING FACTOR R
 AND OF THE ANNUAL HEATING ENERGY NEEDS E AND E'

$h_o = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $t_{NH} = 18,3 \text{ degC}$

EQUIVALENT RECUPERATING AREA	Slope (deg)	Orientation	Glazing			Opaque			Equivalent recuperating area (m²) (3)=(1)+(2)
			Area Agl (m²)	x S	= (1)	Area Aop (m²)	x Uop (W/m²K)	= α	
90°	S	10.6	0.4	4.24	27.2	0.43	0.65	0.33	4.57
	N.E.	8.8	0.49	4.31	64.2	0.43	0.65	0.78	5.09
	N-O	16.5	0.49	8.09	46.5	0.43	0.65	0.57	8.66
	N	2.1	0.49	1.03					1.03
73°	S				100	0.18	0.92	0.72	0.72
	37°	N			110	0.18	0.92	0.79	0.79

LONGWAVE LOSSES	Slope s (deg)	Glazing			Opaque			(4)+(5)	$\frac{1-\cos s}{2}$	$\frac{100}{h_o}$	Longwave losses (W)	TOTAL LW
		Agl (m²)	x Ugl = (4)	Aop (m²)	x Uop = (5)							
90°	38	125.4	137.9	59.3	184.7	92.35	3.9	360.2				
73°			100	18	18	11.63	3.9	45.4				
37°			110	19.8	19.8	17.81	3.9	69.5				

SOLAR GAINS	Slope (deg)	Orientation	E.R.A. (3)	Solar gains = (3) x solar data											
				Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
90°	S	4.57	813	990	1054	1029	909	835	852	925	1029	1036	846	777	
	N.E.	5.09	98	182	348	525	662	744	709	559	364	207	119	73	
	N-O	8.66	166	340	541	893	1127	1265	1205	950	720	552	193	121	
	N	1.03	19	29	43	68	88	102	96	74	48	33	21	14	
73°	S	0.72	132	166	186	194	184	171	173	179	185	177	139	116	
	37°	N	0.79	15	23	42	99	150	178	166	115	56	26	17	11
TOTAL				(4)	4243	1700	2184	2808	3117	3295	3201	2782	2295	1831	1330
(TOTAL-LW)/K=R (degC)					2.02	3.22	4.49	6.13	6.94	7.41	7.16	6.06	4.78	3.56	2.25

ANNUAL HEATING NEEDS	Eq. Dd. (800 DAT METEO)			441.1	357.8	309.1	171.0	44.9	10.7	2.0	1.6	23.3	158.4	328.9	439
	TOTAL Eq. Dd.	x K	x 0.024= E (kWh)	x 3.6= E (MWh)	TOTAL Eq. Dd.	x K*	x 0.024= E* (kWh)=2	x 3.6= E* (MWh)=2							
	2288	380.6	20900	75238	2288	2.44	134	482							

OUTLINE PROPOSALS : ACTIVITIES N° 6 TO 10 CALCULATION OF THE HEAT LOSS COEFFICIENTS K AND K'					Heated floor area $A_{fh} = 156 \text{ (m}^2\text{)}$		
OPAQUE FABRIC	Envelope elements	Area (m ²)	\times U-value (W/m ² K)	\times Coeff. of temperature reduction	= Opaque fabric heat loss coeff. (W/K)		
	Mur extér. vert.	138	0.43	1	59.34		
	Toiture	210	0.18	1	37.8		
	Plancher sur cave	39	0.51	0.3	4.9		
	Plancher sur enrochement	79	0.51	0.6	24.47		
TOTAL		459 (1)			126.9 (2)		
FABRIC LOSSES	Type of window	Area (m ²)	\times U-value (W/m ² K)	\times Window heat loss coeff. (W/K)			
	Fenêtre (chassis PVC)	38	3.3		125.4		
	TOTAL	38 (3)			125.4 (4)		
TOTAL	Opaque fabric heat loss (2)	+ Window heat loss coeff:cient (4)		= Fabric heat loss coefficient (W/K)			
	126.9	125.4		251.6	(5)		
MEAN GLOB. FACTORS	Mean U-value of opaque envelope $U_{op} = (2)/(1)$	Mean U-value of glazings $U_{gl} = (4)/(3)$	Glazing factor $F_{gl} = (3)/A_{fh}$	Shading factor $F_s = [(1)+(3)]/A_{fh}$			
	0.27 (W/m ² K)	3.3 (W/m ² K)	0.24	3.49			
VENTILATION LOSSES	Nbr of air change n (ac/h)	\times house volume V (m ³)	$\times \rho c/3600$ (W/K)	= Ventilation heat loss coeff. (W/K)			
	1 winter 0.75 2 summer 3	506	0.34	129 (6)			
TOTAL	Fabric loss (5)	+ Vent. loss (6) or (7)	=	\times Wind correction factor	= Glob heat loss coeff. K (W/K)	A _{fh} (m ²)	= K [*] (W/m ² K)
	251.6	(6) 129 (7) 516	380.6	1 (8) (9)	380.6 767.6	156	2.44 (8) 4.9 (9)

IV.4.3. But des mesures.

Valeurs horaires, journalières, mensuelles, annuelles :

- de l'énergie solaire incidente sur les capteurs solaires (une mesure de température extérieure est associée);
- de l'énergie solaire captée par les capteurs solaires;
- de l'énergie solaire stockée dans la cuve;
- des énergies puisées et stockées dans le sol (jardin);
- de l'énergie utile au chauffage qui est fournie par la pompe à chaleur;
- de l'énergie globale utile au chauffage;
- des énergies électriques de fonctionnement consommées par les pompes A, B, C et les circulateurs I à V (plus éventuellement les compteurs horaires de temps de fonctionnement);
- de l'énergie électrique d'appoint consommée par le compresseur de la pompe à chaleur (plus le compteur horaire de temps de fonctionnement);
- de l'énergie d'appoint fournie par le feu ouvert;
- des températures enregistrées dans cinq pièces de l'habitat;
- de la mesure de stratification des températures dans la cuve;
- de la mesure d'une température à 1,5 mètre de profondeur dans le sol (jardin).

L'instrumentation ne comprend pas :

- la mesure du thermosiphon créé par le capteur solaire en mi-saison; toutefois, les températures enregistrées dans cinq pièces de l'habitat et la température extérieure sont mesurées et permettent d'apprécier le niveau de confort (idem pour le régime été);
- la mesure de la stratification thermique sur l'eau de pluie dans la cuve qui crée un *bypass* et qui peut influencer fortement la température du stockage;
- la mesure détaillée de la récupération des calories sur eau usée.

N.B. : Le propriétaire a décidé de produire son eau chaude sanitaire dans un ballon de 200 litres. Ce ballon est entouré d'un serpentin parcouru par le fréon en déviation de la pompe à chaleur.

Un compteur de chaleur sur l'eau sanitaire utilisée permet d'apprécier l'impact de ce poste sur le bilan de la pompe à chaleur.

IV.4.4. Sondes de mesure utilisées.

La figure 20, p. 132, montre la localisation de ces sondes.

Paramètres climatiques

- Anémomètre V
- Température de l'air ambiant T_9
- Température de l'air sous "Coppersun" T_1
- Solarimètre L.D.R. P_1

- Solarimètre L.D.R. sous polycarbonate P₂
- Solarimètre Kipp & Zonen CM 5 P₃

Système collecteur solaire

- Température de l'eau à la sortie du capteur (sur tube) T₃
- Température de l'eau à la sortie de la cuve ou température à l'entrée du capteur (sur tube) T₈
- Débitmètre Q_A
- Temps de fonctionnement des pompes A et B fourni par le microprocesseur CH_A et CH_B

Système stockage cuve

- Température à l'entrée de la cuve (sur tube) T₇
- Déjà repris ci-avant T₈ et Q_A
- Température de l'eau à la sortie du jardin (dans l'eau) T₆
- Température de l'eau à l'entrée du jardin (sur tube) T₂
- Débitmètre Q_C
- Quatre températures dans l'eau de la cuve pour mesurer la stratification thermique (de haut en bas) T₁₆ à T₁₉

Système sol jardin

- Déjà repris ci-avant $T_6 \quad T_2 \quad Q_C$
- Temps de fonctionnement de la pompe C
fourni par le microprocesseur CH_C
- Température à 1,5 mètre de profondeur
(dans le sol) T_{21}

Système pompe à chaleur

- Température de l'eau à la sortie du condenseur
(sur tube) T_5
- Température de l'eau à l'entrée du condenseur
(sur tube) T_4
- Débitmètre Q_B
- Compteur électrique mesurant la consommation
électrique du compresseur de la pompe à chaleur CE_3
- Temps de fonctionnement de la pompe à chaleur
fourni par le microprocesseur CH_{PC}

Système habitat - chauffage

- Cinq températures d'ambiance de pièce :
 - ambiance living (ouest) T_{11}
 - ambiance living (sud) T_{12}
 - ambiance cuisine T_{13}
 - ambiance hall T_{14}
 - ambiance salle de bains T_{15}

- Une température dans la serre T_{10}
- Une température ambiance au thermosiphon T_{20}
- Un relevé saisonnier de la consommation de bois
du feu ouvert d'appoint

D'autre part,

un compteur électrique mesurera la consommation électrique
globale : $CE_1 + CE_2 + CE_G$

où CE_1 = consommation des pompes A et B

CE_2 = consommation de la pompe C

CE_G = consommation des circulateurs I à V

Toutefois, le microprocesseur pourrait recalculer chacune des
composantes CE_1 , CE_2 , CE_G grâce aux éléments suivants :

- connaissance des séquences d'enclenchement de chacune des pompes;
- indication du moment où leur vitesse est changée;
- mesure du temps de fonctionnement de chacune de ces pompes.

IV.4.5. Présentation des résultats.

Le micro-ordinateur Tandy TRS 80 utilisé par le propriétaire a été relié à une imprimante EPSON MX 80 type II, achetée par les S.P.P.S..

Les rapports (ou *listings*) délivrés par l'imprimante fourniront :

- l'impression de la date : le jour, l'heure, la minute;

- les moyennes semi-horaires et journalières
 - des températures
 $T_1 \text{ à } T_{21} \dots \dots \dots \text{ en } ^\circ\text{C}$
 - de la vitesse du vent en m / sec
- les valeurs cumulées horaires et journalières
 - des consommations électriques
 $CE_1, CE_2, CE_3, CE_G \dots \dots \dots \text{ en kWh}$
 - des rayonnements solaires globaux
 $P_1, P_2, P_3 \dots \dots \dots \text{ en kWh/m}^2$
 ceux-ci seront le résultat d'une intégration
 continue ou discrète (un pas de 15 secondes
 à 1 minute est admissible)
 - du temps de fonctionnement CH_{PC}
 - des temps de fonctionnement CH_A, CH_B, CH_C ;
 éventuellement de CH_I à CH_V
 - des débits
 $Q_A, Q_B, Q_C \dots \dots \dots \text{ en l/h}$
- les valeurs horaires et journalières
 - de l'énergie solaire captée par les capteurs solaires :

$$En_1 = Q_A \cdot C_p (T_3 - T_8)$$
 - de l'énergie solaire stockée dans la cuve :

$$En_2 = Q_A \cdot C_p (T_7 - T_8)$$

- de l'énergie solaire puisée ou stockée dans le sol :

$$En_3 = Q_C \cdot C_p (T_6 - T_2)$$

$$En_3 > 0 \quad \text{ou} \quad En_3 < 0$$

suivant le puisage ou le stockage

- de l'énergie utile au chauffage fournie par la pompe à chaleur :

$$En_4 = Q_B \cdot C_p (T_5 - T_4)$$

- de l'énergie stockée qui est calculée à partir des tranches d'eau associées à chacune des températures T_{16} à T_{19}

- les valeurs journalières cumulées

- de l'énergie solaire incidente dans le plan des capteurs, rapportée à la toiture entière de surface S :

$$P_{1G} = P_1 \cdot S$$

$$P_{2G} = P_2 \cdot S$$

$$P_{3G} = P_3 \cdot S$$

- de l'énergie électrique totale consommée :

$$CE_{GG} = CE_1 + CE_2 + CE_3 + CE_G \dots \dots \dots \text{en kWh}$$

- de l'énergie électrique de fonctionnement de la partie captage :

$$CE_{FC} = CE_1 + CE_2 \dots \dots \dots \text{en kWh}$$

- de l'énergie thermique puisée à l'évaporateur de la pompe à chaleur :

$$E_e = En_4 - CE_3 \dots \dots \dots \text{en kWh}$$

- de l'énergie solaire directement utilisée :

$$E_{sd} = En_1 - En_2 \dots \text{en kWh}$$

sans inclure

- a) les pertes de distribution (qui sont comptabilisées comme une énergie utile dans E_{sd})
- b) l'énergie apportée au fluide par les pompes A et B

- de l'énergie thermique totale fournie :

$$E_{tf} = En_1 + En_3 + CE_3 \dots \text{en kWh}$$

- de l'énergie totale utilisée :

$$E_{tu} = E_{sd} + En_4$$

avec

- a) la contribution solaire directe en %, soit

$$C_{us} = E_{sd} / E_{tu}$$

- b) la contribution électrique en %, soit

$$C_{ue} = CE_3 / E_{tu}$$

- c) la contribution du stockage en %, soit

$$C_{ust} = E_e / E_{tu}$$

Cette dernière est décomposable en 2 parties :

1° La contribution du sol du jardin, soit

$$\frac{\eta_{st} \cdot En_3}{E_{tu}}$$

2° La contribution solaire indirecte, soit

$$\frac{\eta_{st} \cdot En_2}{E_{tu}}$$

- de l'énergie thermique économisée :

$$E_{ec} = E_{tu} - CE_3$$

- de l'énergie thermique économisée
(énergie de fonctionnement déduite) :

$$E_{ecg} = E_{tu} - CE_{GG}$$

- du coefficient de performance de la pompe à chaleur :

$$COP_{PC} = En_4 / CE_3$$

- du coefficient de performance global de l'installation :

$$COP_{global} = E_{tu} / CE_{GG}$$

(aussi appelé " coefficient d'exploitation " de l'installation : COE)

- du rendement du capteur solaire :

$$\eta_C = En_1 / P_{3G}$$

D'autres rendements peuvent encore être calculés de façon journalière mais ils n'auront leur pleine signification qu'à l'échelle mensuelle :

- Rendement de stockage :

$$\eta_{st} = \frac{E_e}{En_2 + En_3}$$

Ce rendement mesuré est affecté par le " bypass " thermique sur eau de pluie qui n'est pas évalué.
En effet, le bilan thermique du stockage est représenté par

la relation :

$$E_{bp} + En_3 + En_2 = p + E_e + E_{st}$$

où E_{bp} = énergie stockée grâce au " bypass " par stratification thermique sur eau de pluie

E_{st} = énergie stockée dans le stockage, calculée à partir de T_{10} à T_{13} et des tranches d'eau associées

En_3 = énergie puisée du sol; elle inclut la récupération thermique sur eaux usées

— Rendement du stockage + pompe à chaleur :

$$\eta_{st} + PC = \frac{En_4}{En_2 + En_3 + CE_3}$$

(même remarque que ci-avant)

— Rendement interne global de distribution de l'énergie :

$$\eta_{id} = \frac{E_{tu}}{E_{tf}}$$

(en réalité, la valeur est encore inférieure car les pertes de distribution des flux thermiques E_{sd} et En_2 ne sont pas décomptées de E_{tu})

— Rendement interne global de distribution de l'énergie en tenant compte des énergies de fonctionnement :

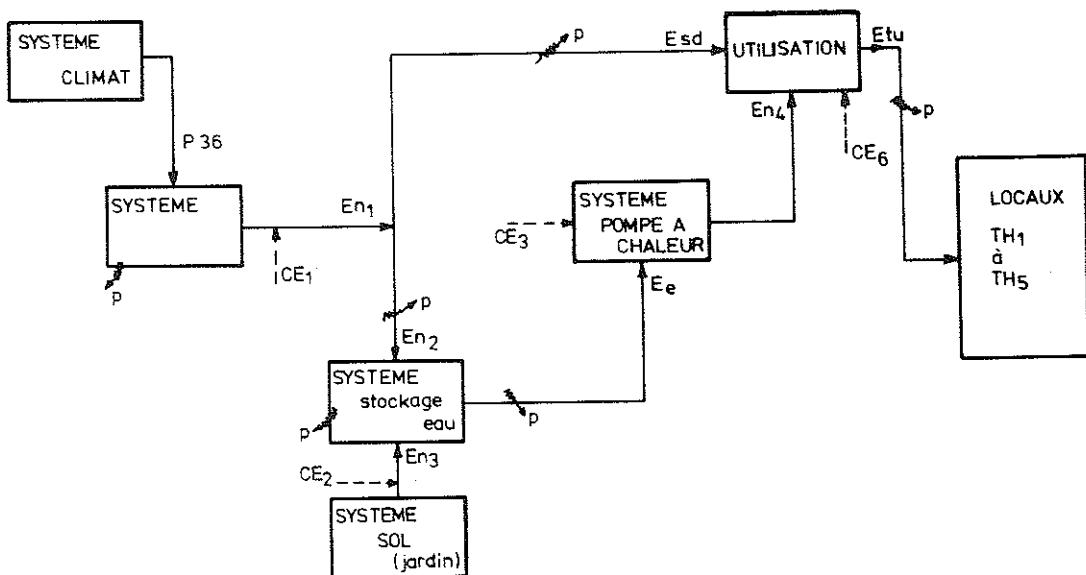
$$\eta_{idf} = \frac{E_{tu}}{E_{tf} + CE_1 + CE_2}$$

— Rendement interne d'utilisation de l'énergie solaire :

$$\eta_{ids} = \frac{E_{sd} + \eta_{st} \cdot E_{n_2}}{E_{n_1}}$$

en faisant l'hypothèse que le rendement du stockage est le même, quelle que soit l'origine de l'énergie : le solaire ou le sol du jardin.

Le schéma suivant explicite les flux thermiques :



p = perte thermique de distribution

ou

perte thermique d'un système par déperdition

FIGURE 21

Contraintes

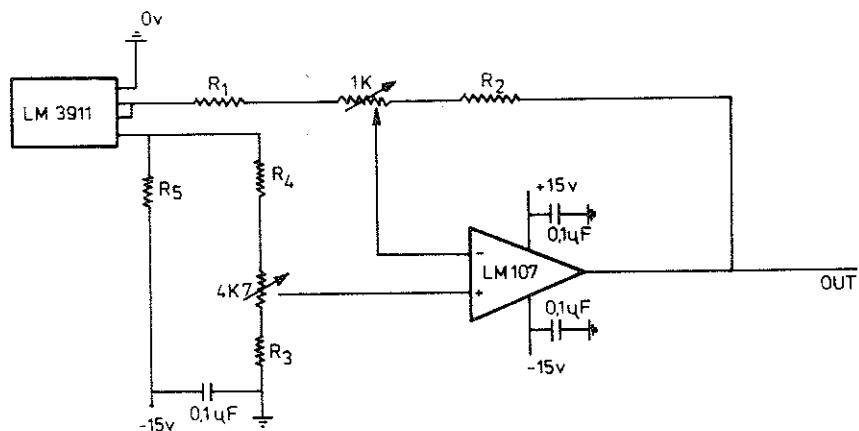
- La précision demandée est de 0,1 % sur les mesures et les résultats de calcul.
- Il est très utile, pour aider au dépouillement des mesures, que soient connus les états de fonctionnement par lesquels le système est passé ainsi que leur durée.
Ces états sont signalés soit par le microprocesseur, soit par le propriétaire.
Toute alarme ou coupure de courant devra être signalée, si possible par le microprocesseur.
- Il a été demandé au propriétaire de ne pas modifier l'installation de chauffage pendant plusieurs mois au moins.

IV.4.6. Sondes et appareils de mesures fournis par l'Unité de recherche.

- Vingt et une sondes de température électroniques LM 3911 délivrant un signal de 10 mV / °C, très linéaires et reproductibles, ont été préparées, conditionnées (voir figure 22) et calibrées par l'Unité de recherche pour fournir un signal analogique 0 - 5 volts après amplification (précision 0,05°C) :

TYPES	NUMERO DES SONDES	T° extrêmes correspondant à	
		0 VOLT	5 VOLTS
Dans l'air	T ₁ , T ₉ , T ₁₀ T ₁₁ → T ₁₅ , T ₂₀	- 20°C 0	+ 80°C + 50°C
Sur tube	T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₇ , T ₈	0	+ 50°C
Dans l'eau	T ₆ , T ₁₆ → T ₁₉ , T ₂₁	0	+ 50°C

FIGURE 22



Premier cas

$$(-20^\circ\text{C} \dots +80^\circ\text{C}) \quad R_1 = 4.75 \text{ k } \Omega$$

$$R_2 = 24.3 \text{ k } \Omega$$

$$R_3 = 27.4 \text{ k } \Omega$$

Deuxième cas

$$(0^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C}) \quad R_1 = 4.75 \text{ k } \Omega$$

$$R_2 = 24.3 \text{ k } \Omega$$

$$R_3 = 30.1 \text{ k } \Omega$$

Troisième cas

$$(0^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}) \quad R_1 = 5.62 \text{ k } \Omega$$

$$R_2 = 61.9 \text{ k } \Omega$$

$$R_3 = 33.2 \text{ k } \Omega$$

Dans tous les cas

$$R_4 = 61.9 \text{ k } \Omega$$

$$R_5 = 7.15 \text{ k } \Omega$$

- Un compteur électrique monophasé 220 V
- Un compteur électrique triphasé 220 V
- L'Unité de recherche a équipé les compteurs électriques d'un système photodiode / phototransistor (+ alimentation), de façon à ce qu'ils fournissent des impulsions pour une certaine quantité de kWh délivrés.

- Trois débitmètres à turbine pour la mesure de :

Q_A : PMW - NH 25 mm Topaze

Q_B : PMW - NH 25 mm Topaze

Q_C : PMK - NH 25 mm Topaze

Précision de la mesure : $\pm 2\%$ dans le domaine de mesure

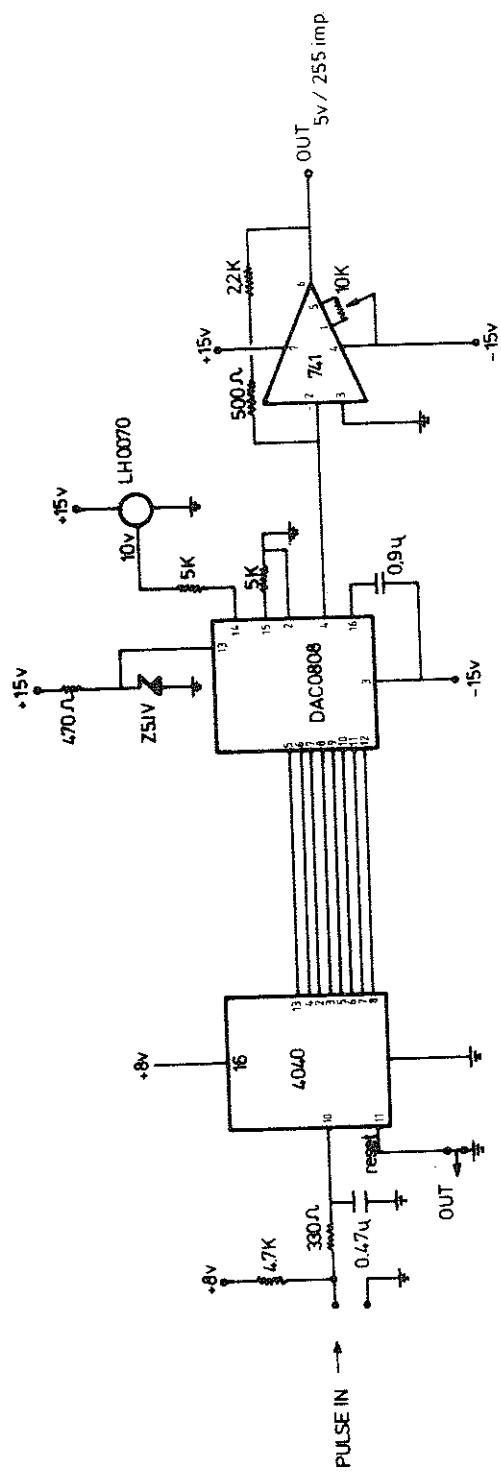
- L'imprimante EPSON MX 80 type II à haute résolution graphique.
- Les impulsions émises par les compteurs électriques et débitmètres ont été converties, après mise en forme et totalisation, en un signal analogique 0 - 5 volts admissible par le microprocesseur.
- Ces interfaces DIA ont été réalisées dans un rack.
- Un schéma du compteur binaire avec sortie analogique est donné par la figure 23, p. 156.

IV.4.7. Résultats.

Le suivi scientifique préparé sera mené pendant la saison de chauffe 1982-1983.

Pendant la première saison de chauffe, grâce aux compteurs électriques placés par l'Unité de recherche, le propriétaire a relevé

FIGURE 23



une consommation électrique de la pompe à chaleur + auxiliaires de 3 700 kWh environ, dont 2/3 sur courant de nuit (charge de 22 heures à 5 heures). Deux stères de bois ont été également consommés.

Le propriétaire a respecté son bilan prévisionnel à 6 % près.

Toutefois, il s'avère que les températures intérieures de plusieurs pièces ont été, à maintes reprises, inférieures à 15°C. Ce qui tend à confirmer un sous-dimensionnement de la pompe à chaleur ...

La température de l'eau du stockage a varié entre 16°C et 4°C.

IV.5. CHAUFFAGE SOLAIRE DE PISCINE.

L'Unité de recherche n'a entrepris aucune mesure *in situ* dans ce domaine, s'en référant aux programmes de suivi lancés par la Communauté Economique Européenne.

A la requête de la DG XVII de la Communauté Européenne, l'Unité a exécuté le rapport suivant / 24 / :

" Solar heated swimming pools. Instrumentation and data acquisitions systems ".

La piscine de Chevetogne (2 200 m³) constitue le fleuron national.

On retiendra, pour l'instant, les chiffres obtenus à la piscine couverte de Jambes faisant état d'une énergie stockée de 300 kWh par mètre carré et par an.

IV.

V. BÂTIMENTS F.U.L. - 1ère PHASE.

V.1. INTRODUCTION.

Le projet solaire de la Fondation Universitaire Luxembourgeoise - phase I d'extension : Laboratoires et Bureaux - a été présenté lors de la journée scientifique organisée le 24 juin 1981 à la F.U.L. : " *Energie solaire et son stockage* ".

Le texte présenté à cette occasion est repris en annexe 2.

Il constitue un préalable nécessaire à la bonne compréhension du présent rapport qui décrit la méthodologie à employer pour évaluer les performances de la partie énergétique innovante, où est générée l'énergie utile au chauffage basse température des bâtiments.

Ces bâtiments ont été construits de 1978 à 1980.

La mise en oeuvre du système de chauffage s'est révélée fort lente, au vu de la complexité du projet et des problèmes rencontrés, liés à son caractère innovateur : problèmes de financement et problèmes techniques :

- fuite dans le stockage en terre (ballons d'eau);
- fuite du fluide caloporteur dans certains raccordements de collecteurs;
- défaillance prolongée du sous-traitant assurant la mise en oeuvre du système automatique de gestion.

Au 31 août 1982, le système de chauffage est opérationnel en mode manuel. Le stockage énergétique, chargé au cours de l'été 1982 (d'ailleurs exceptionnel), n'a pu être valorisé en période de chauffe à la suite des incidents mentionnés ci-dessus.

En conséquence, l'occupation des bâtiments a été reportée au printemps 1983, afin d'éviter un recours important à une énergie d'appoint onéreuse.

Toutefois, étant donné sa complexité, l'ensemble du dispositif de stockage de l'énergie (enterré entre les deux bâtiments) sera davantage étudié dans le cadre d'une *troisième phase* du Programme National R & D, de 1982 à 1986.

V.2. BUTS DE L'INSTRUMENTATION SCIENTIFIQUE.

1. Mesure des quantités d'énergie conventionnelle économisées (fuel / électricité).
2. Mesure de la fraction de l'énergie utile au chauffage fournie par le réseau des collecteurs, les stockages en terre, l'énergie électrique d'appoint direct et l'énergie électrique d'appoint d'entraînement des pompes à chaleur. Bilan pour des périodes mensuelles, saisonnières, annuelles.
3. Mesure des performances thermiques des systèmes, des principaux sous-systèmes et composants et de leur interaction thermique. Bilan et rendement instantané, journalier, mensuel, saisonnier, annuel.
4. Spécialement, évaluation de l'efficacité du système solaire pour convertir les radiations solaires en énergie thermique utile, pour des périodes mensuelles, saisonnières, annuelles.
5. Enregistrement des paramètres climatiques locaux qui peuvent affecter les performances du système pendant la période de démonstration.

6. Mesure de la charge thermique effectivement utilisée pour le chauffage et le rafraîchissement des locaux, et comparaison avec les prédictions des différents modèles de simulation.
7. Détermination du bilan économique de l'opération et généralisation à des projets similaires.

V.3. DIAGRAMME ENERGETIQUE.

V.3.1.

Le diagramme énergétique est représenté par la figure 24, p. 162. Ce diagramme des flux énergétiques montre que plusieurs sous-systèmes énergétiques peuvent être distingués :

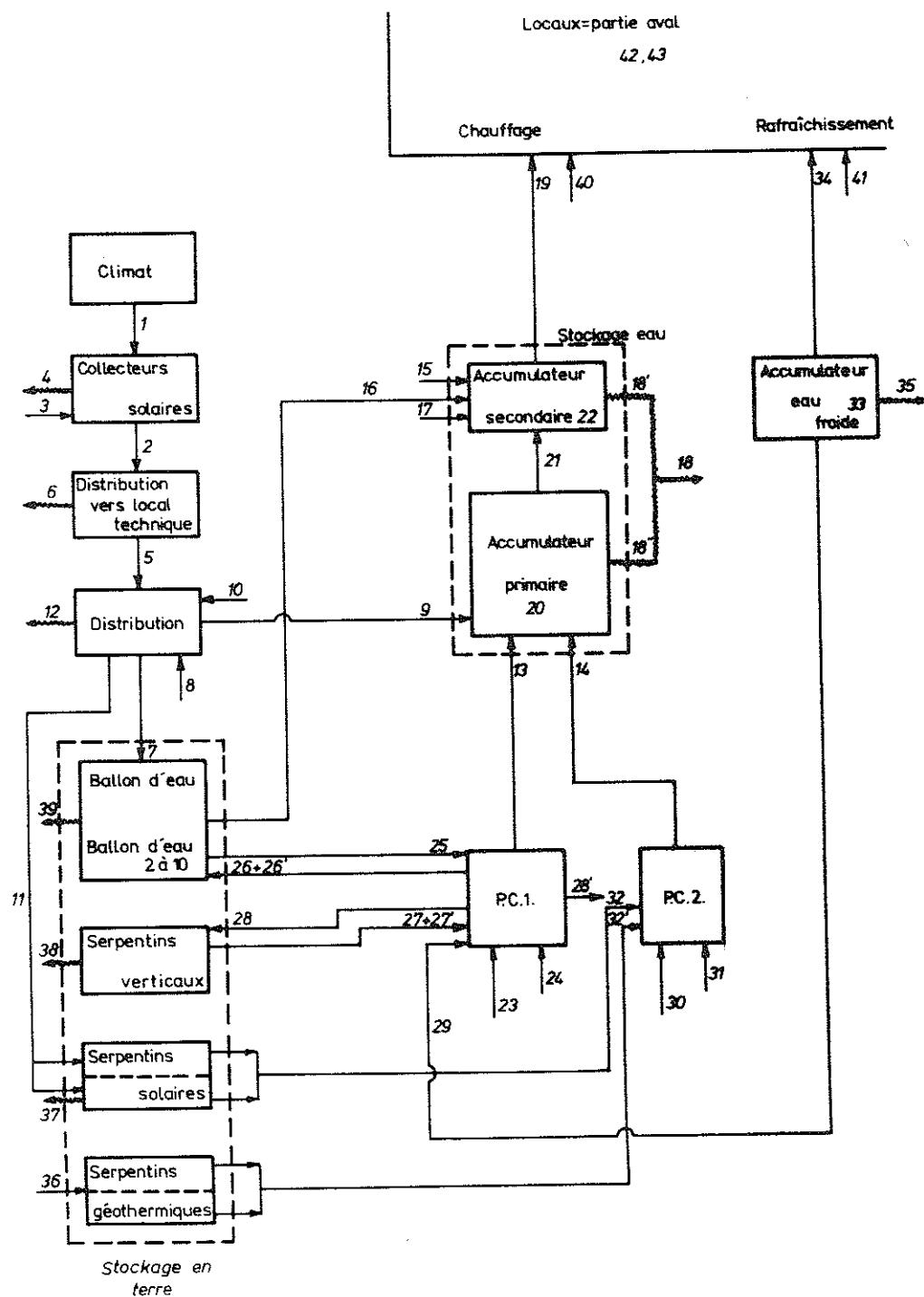
1. Environnement (paramètres climatiques).
2. Collecteurs solaires.
3. Distribution de la chaleur solaire vers les canalisations C_1 , C_2 , C_3 , C_4 .
4. Distribution de la chaleur solaire,
vers l'accumulateur primaire (échangeur),
vers les ballons d'eau en terre (échangeur),
vers les serpentins dits " solaires ".
5. Stockage thermique dans l'eau :
accumulateurs primaire et secondaire.
6. Stockage thermique en terre :
 - a) ballons d'eau ($50 \text{ m}^3 + 450 \text{ m}^3$);
 - b) serpentins solaires et géothermiques, de deux types chaque fois ($> 2\ 500 \text{ m}^3$);
 - c) serpentins verticaux.

7. Pompe à chaleur n° 1 (PC 1).
8. Pompe à chaleur n° 2 (PC 2).
9. Stockage en froid.
10. Utilisation en locaux : chauffage, rafraîchissement, récupération sur air extrait.

REMARQUES

- Le diagramme énergétique a été établi sur base du plan 5873 E 034 de la firme " Confort et Chaleur ", adjudicatrice du lot " chauffage ".
- Les flux du diagramme énergétique, liés au stockage en terre, ont été volontairement limités aux entrées et sorties énergétiques globales quantifiables.
- La récupération des calories sur l'air extrait (batterie de pré-chauffage de l'air frais) n'est pas incluse.
- Les pertes thermiques de distribution entre PC 1, PC 2 et l'accumulateur primaire en eau sont supposées négligeables (distance de transfert courte, bonne isolation thermique des conduites). Il en est de même entre PC 1 et le stockage froid.

FIGURE 24



SIGNIFICATION DES FLUX REPRIS DANS LE DIAGRAMME ENERGETIQUE

- 1 = Energie solaire incidente sur les collecteurs solaires
- 2 = Energie solaire captée au niveau des collecteurs solaires en toiture
- 3 = Energie électrique de fonctionnement pour l'entraînement des pompes P_1 , P_2 , P_3
- 4 = Pertes thermiques du sous-système " collecteur solaire "
- 5 = Energie solaire arrivant en local technique aux canalisations C_1 , C_2 , C_3 , C_4
- 6 = Pertes thermiques lors de la distribution de l'énergie solaire de la toiture vers le local technique
- 7 = Energie solaire fournie aux ballons d'eau en terre
- 8 = Energie électrique de fonctionnement de la pompe P_5
- 9 = Energie solaire fournie directement à l'accumulateur primaire à eau
- 10 = Energie électrique de fonctionnement de la pompe P_4
- 11 = Energie solaire fournie globalement aux serpentins solaires du stockage en terre
- 12 = Pertes thermiques lors de la distribution de l'énergie solaire
- 13 = Energie fournie par la pompe à chaleur n° 1 à l'accumulateur primaire de 100 m³
- 14 = Energie fournie par la pompe à chaleur n° 2 à l'accumulateur primaire de 100 m³
- 15 = Energie électrique d'appoint fournie à l'accumulateur secondaire
- 16 = Energie fournie directement par le ballon d'eau de 50 m³ n° 1 à l'accumulateur secondaire
- 17 = Energie électrique de fonctionnement de la pompe P_7
- 18 = Pertes thermiques du sous-système " eau "
- 19 = Energie fournie au chauffage du bâtiment par l'accumulateur secondaire
- 20 = Energie stockée dans l'accumulateur primaire
- 21 = Energie transmise de l'accumulateur primaire vers l'accumulateur secondaire
- 22 = Energie stockée dans l'accumulateur secondaire
- 23 = Energie électrique du compresseur de la pompe à chaleur n° 1
- 24 = Energie électrique de fonctionnement des pompes P_9 et P_{10} véhiculant les fluides sur l'évaporateur et le condenseur de la pompe à chaleur n° 1
- 25 = Energie puisée hors des ballons d'eau en terre par la pompe à chaleur n° 1

26 { Energie cédée aux ballons d'eau en terre par la
 26' { pompe à chaleur n° 1
 27 { Energie puisée des serpentins verticaux par la pompe à
 27' { chaleur n° 1
 28 = Energie cédée aux serpentins verticaux en terre par la
 pompe à chaleur n° 1
 28' = Energie cédée à l'atmosphère par la pompe à chaleur n° 1
 29 = Energie puisée dans l'accumulateur d'eau froide par la
 pompe à chaleur n° 1
 30 = Energie électrique du compresseur de la pompe à chaleur
 n° 2
 31 = Energie électrique de fonctionnement des pompes P_{11} et P_{12}
 véhiculant les fluides sur l'évaporateur et le
 condenseur de la pompe à chaleur n° 2
 32 = Energie puisée hors des serpentins " solaires " en terre
 par la pompe à chaleur n° 2
 32' = Energie puisée hors des serpentins " géothermiques " en
 terre par la pompe à chaleur n° 2
 33 = Energie stockée dans l'accumulateur d'eau froide
 34 = Energie fournie pour le rafraîchissement du bâtiment
 35 = Pertes thermiques du sous-système " eau froide "
 36 = Energie puisée au sol via les serpentins " géothermiques "
 (= 32')
 37 = Energie dissipée et non récupérée par le stockage
 " serpentins solaires " (à long terme)
 38 = Energie dissipée et non récupérée par le stockage
 " serpentins verticaux " (à long terme)
 39 = Energie dissipée et non récupérée par le stockage
 " ballons enterrés " (à long terme)
 40 = Energie électrique de fonctionnement de la pompe P_6
 41 = Energie électrique de fonctionnement de la pompe P_8
 42 = Energie fournie à l'air frais alimentant les groupes de
 conditionnement d'air GP_1 et GP_2 (batterie de récupéra-
 tion couplée à GE_3)
 43 = Energie perdue par l'air extrait dans GE_3
 et donc récupérée

REMARQUE

A propos des flux " 36 " à " 39 " :

- Une énergie dissipée par un stockage en terre n'est pas nécessairement perdue car elle peut être récupérée par un autre.
- La direction de la dissipation n'est pas appréciée.

V.3.2.

- Le paramètre α , défini comme le rapport entre la charge thermique annuelle et la surface de captation (MJ/m^2), vaut $3\ 000\ MJ/m^2$; ce qui signifie des collecteurs fortement chargés, disposant dès lors d'un haut rendement de conversion de l'énergie solaire (39%).

Remarque : $\alpha = 1\ 000\ MJ/m^2$ pour une maison solaire

- Le paramètre β , défini comme le rapport entre la capacité thermique du stockage et la surface de captation ($MJ/m^2 K$), vaut $7\ MJ/m^2 K$.

Rappel : Maison solaire Faculté Polytechnique de Mons :

$$\beta = 2.6\ MJ/m^2 K$$

Valeur littérature :

$$\beta = 0.2\ MJ/m^2 K$$

soit 50 litres d'eau par mètre carré

- Les courbes établies à la Faculté Polytechnique de Mons lors de la première phase du Programme National démontrent qu'en fonction de ces deux paramètres, un stockage isolé de $600\ m^3$ d'eau conduit à une économie annuelle de $1\ 200\ MJ/m^2$.
De plus, on se situe dans une zone de saturation des courbes, tendant à prouver que tout accroissement du stockage ne procure pas d'économie supplémentaire : l'énergie solaire compense alors les pertes. De ce fait, on est en droit de considérer les stockages supplémentaires essentiellement comme des sources supplémentaires davantage que comme des capacités nouvelles de stockage.

On estime que les besoins de chauffage des bâtiments sont satisfaits à concurrence de

- 38 % par l'énergie solaire,
- 36 % par la contribution du sol,
- 26 % par le solde (énergie d'appoint, onéreuse).

V.3.3. Principe des mesures des flux du diagramme énergétique.

- *L'analyse quantitative des flux énergétiques est basée sur le concept du bilan énergétique.*

Les capteurs de mesure sont placés selon la procédure proposée par E. Streed du National Bureau of Standard / 30 /, de façon à établir le bilan thermique global de l'installation en partant de l'évaluation des bilans thermiques de chacun des sous-systèmes qui la composent.

Pour chaque sous-système, on peut écrire le bilan énergétique suivant :

$$\text{Energie entrant} = \text{Energie sortant} + \text{Energie stockée}$$

Les mesures devront permettre soit une mesure directe des flux énergétiques, soit une estimation par calcul, avec une bonne précision, à partir du bilan énergétique de chacun des sous-systèmes.

Le bilan énergétique de chaque sous-système peut être réécrit de telle façon que les flux énergétiques non mesurés ou incontrôlés apparaissent comme suit :

$$\begin{aligned}\text{Energie entrant} - \text{Energie sortant mesurée} = \\ \text{Energie stockée} + \text{Flux énergétique non mesuré}\end{aligned}$$

Une précision globale meilleure que 10 % devra être atteinte grâce à une instrumentation bien choisie et positionnée.

Pour obtenir une précision globale meilleure que 10 %, les flux non mesurés devront être moindres que 10 %.

Le bilan énergétique de chaque sous-système pourra être contrôlé toutes les trente minutes. Cependant, pour réduire l'influence des pertes thermiques incontrôlées et des stockages thermiques non estimés, le critère d'évaluation des performances du système solaire sera basé sur les bilans énergétiques des principaux sous-systèmes écrits pour une période de temps suffisante, le mois, la saison, l'année.

— *Les contributions des différents flux énergétiques au bilan énergétique, sont obtenues à partir de nombreuses mesures :*

- a) lecture directe d'instruments spéciaux : solarimètre;
- b) variable thermodynamique : température;
- c) paramètre dynamique : vitesse, débit massique;
- d) l'énergie calorifique transportée par un débit massique est calculée à partir de la relation générale :

$$\text{Débit de chaleur} = \text{débit massique} \times \\ \text{différence de température} \times \text{chaleur massique}$$

- e) consommation électrique à partir de wattmètre et compteur à énergie électrique active.

V.4. CAPTEURS DE MESURE.

V.4.1. Type, nombre, localisation.

V.4.1.1. Paramètres climatiques.

- Radiation solaire globale :
 - dans le plan des collecteurs du bâtiment " Laboratoires " P_1 (W / m^2)
 - dans le plan des collecteurs du bâtiment " Bureaux " P_2 (W / m^2)
 - dans le plan des collecteurs du bâtiment " Pompe à chaleur " P_3 (W / m^2)
 - dans le plan horizontal pour comparer aux valeurs fournies par l'I.R.M. P_4 (W / m^2)
- Température extérieure sèche : T_{99} ($^{\circ}\text{C}$)

V.4.1.2. Paramètres collecteurs solaires / distribution de l'énergie vers le local technique (figure 25).

- Températures :
 - circuit collecteurs dans le bâtiment " Bureaux " :
 T_1 , T_2 , T_{15} , T_{18} ($^{\circ}\text{C}$)
 - mesures secondaires : T_3 , T_4 ($^{\circ}\text{C}$)

- circuit collecteurs dans le bâtiment " Laboratoires " :
 - T_5 , T_6 , T_{16} , T_{19} (°C)
 - mesures secondaires : T_7 , T_8 (°C)

- circuit collecteurs dans le bâtiment " Pompe à chaleur " :
 - T_9 , T_{10} , T_{17} , T_{20} (°C)
 - mesures secondaires : T_{13} , T_{14} (°C)

- Débit massique du fluide caloporteur dans les collecteurs solaires relatif aux différents bâtiments :
 - q_1 , q_2 , q_3 (kg / sec)

- La mesure de l'énergie électrique de fonctionnement des pompes P_1 , P_2 , P_3 est prévue dans le compteur électrique d'énergie active (classe 1) n°1 , non relié au système d'acquisition de données qui mesure la consommation électrique des pompes P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 : CE_1 (kWh)

V.4.1.3. Paramètres de distribution de l'énergie solaire (figure 25).

A. Vers les ballons d'eau enterrés

- Températures : T_{31} , T_{32} (°C)
- Débit massique : q_9 (kg / sec)

B. Vers les serpentins " solaires " enterrés

- Températures : T_{23} , T_{24} , T_{25} , T_{26} (°C)
- Débits massiques : q_5 , q_6 (kg / sec)
- L'énergie électrique de fonctionnement de la pompe P_5 est comptabilisée dans le compteur électrique d'énergie active n° 1

C. Vers l'accumulateur primaire de 100 m³

- Températures : T_{21} , T_{22} (°C)
- Débit massique : q_4 (kg / sec)
- L'énergie électrique de fonctionnement de la pompe P_4 est comptabilisée dans le compteur électrique d'énergie active n° 1

V.4.1.4. Paramètres du système " stockage eau " (accumulateurs primaire et secondaire) - figure 26.

A. Transfert de l'accumulateur primaire à l'accumulateur secondaire

- Températures : T_{64} , T_{65} (°C)
- Débit massique : q_{15} (kg / sec)

B. Transfert d'énergie en direct du ballon de 50 m³ (enterré " chaud ") vers l'accumulateur secondaire

- Températures : T_{50} , T_{51} (°C)
- Débit massique : q_{14} (kg / sec)

C. Stratification thermique dans l'accumulateur primaire

- Températures : T_{52} à T_{56} (°C)

D. Stratification thermique dans l'accumulateur secondaire

- Températures : T_{57} à T_{60} (°C)

FIGURE 25

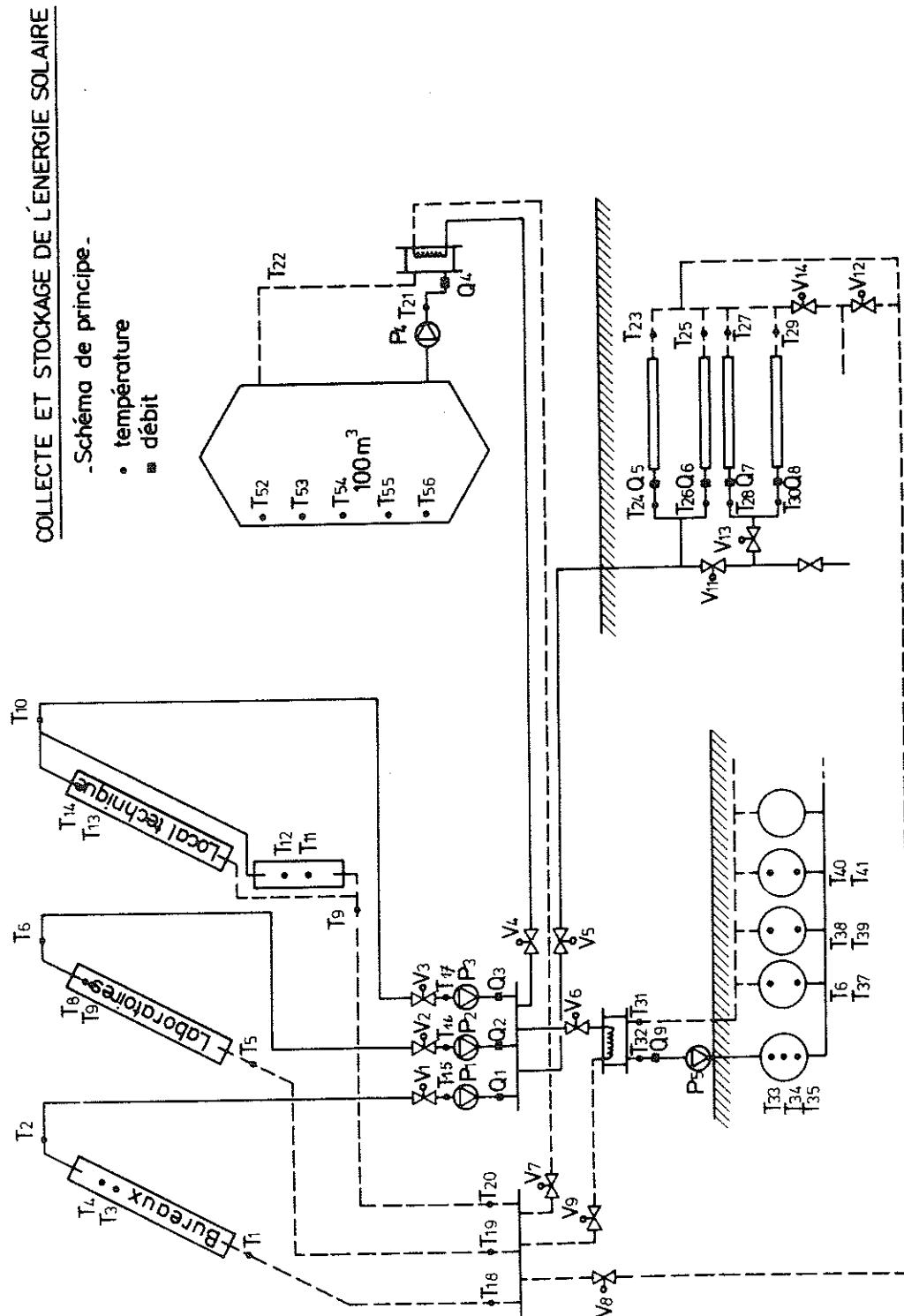
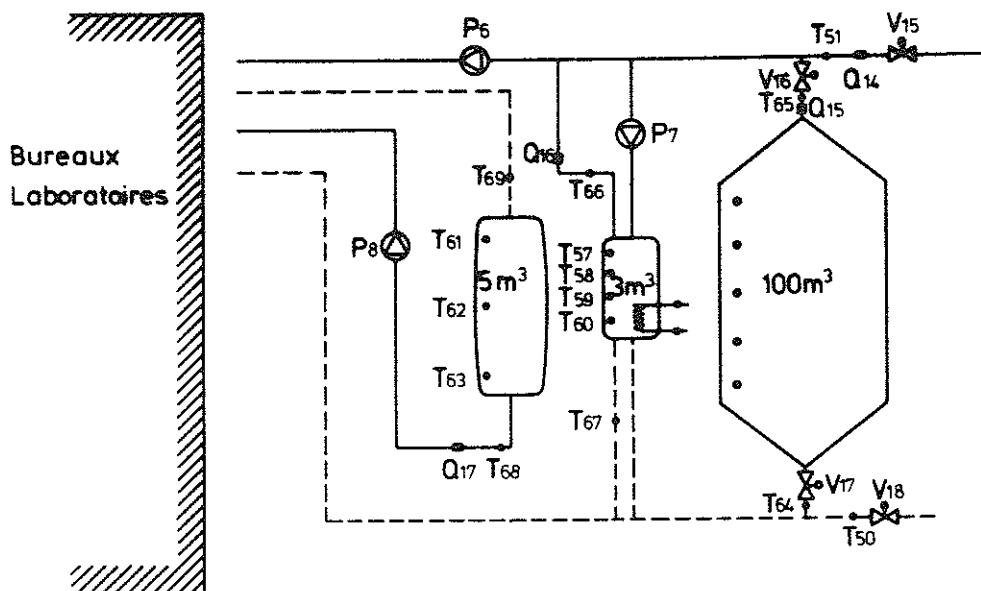


FIGURE 26
DISTRIBUTION D'ENERGIE (chaud - froid.)
Schéma de principe.



E. Appoint électrique dans l'accumulateur secondaire

- Wattmètre n° 3 : W_3 (kW)
- Le compteur électrique à énergie active (classe 1) n° 5, non relié au système d'acquisition de données : CE_5 (kWh)

F. Transfert d'énergie de l'accumulateur secondaire vers la partie "aval" de chauffage du bâtiment

- Températures : T_{66} , T_{67} (°C)
- Débit massique : q_{16} (kg / sec)
- L'énergie électrique de fonctionnement des pompes "out" accumulateurs P_6 , P_7 est prévue par le compteur d'énergie active (classe 1) n° 2, non relié au système d'acquisition de données : CE_2 (kWh)

V.4.1.5. Paramètres du système "pompe à chaleur n° 1" (figure 27).

Le dédoublement de la pompe à chaleur n° 1 n'entraîne pas le dédoublement des capteurs de mesure pour dito qui représenteront une valeur globale :

– Mesures à l'évaporateur

- Températures : T_{42} , T_{43} (°C)
- Débit massique : q_{10} (kg / sec)

– Mesures au condenseur

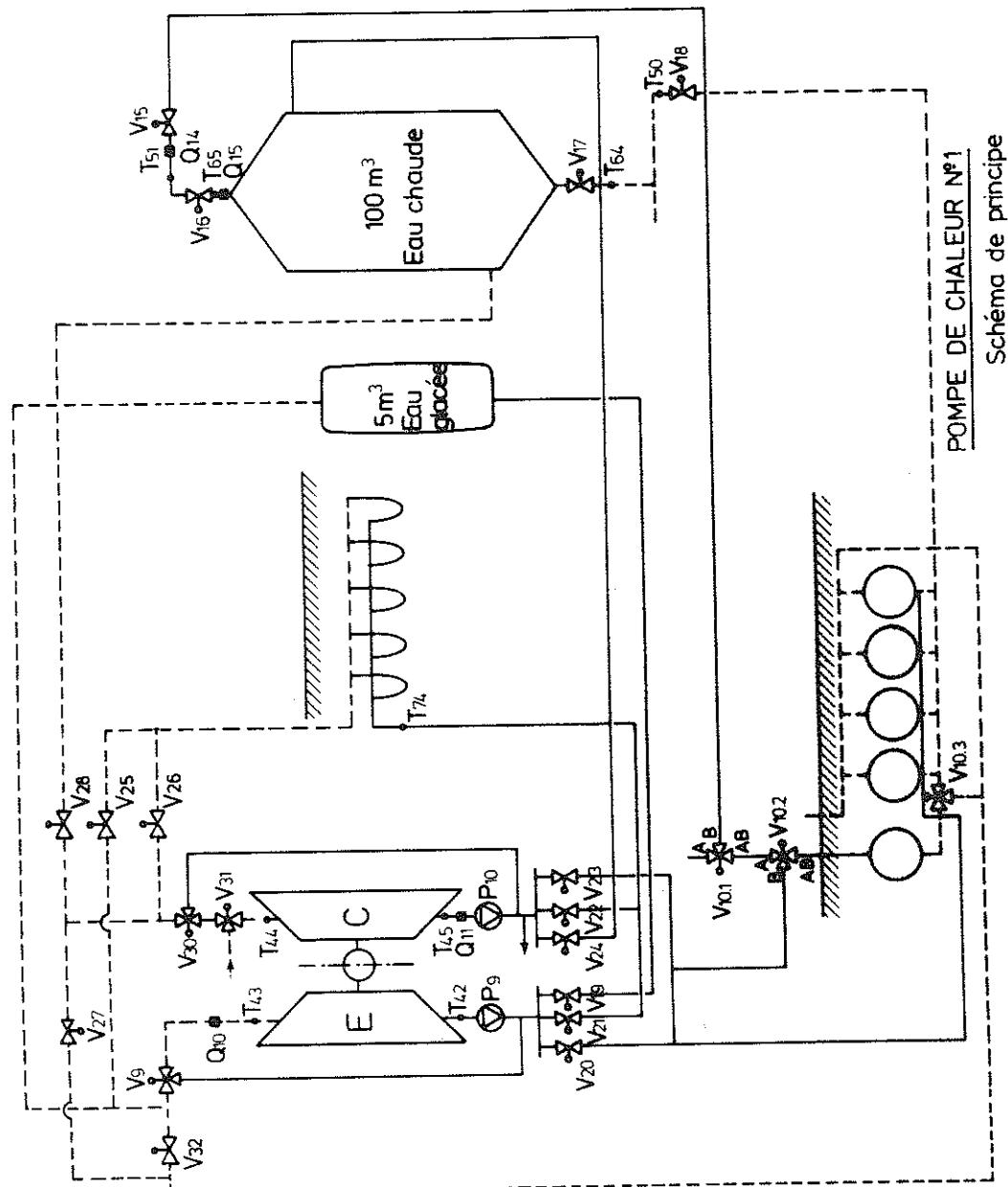
- Températures : T_{44} , T_{45} (°C)
- Débit massique : q_{11} (kg / sec)

– Mesures électriques

- Wattmètre n° 1 : W_1 (kW)
pour la puissance instantanée du compresseur
- Compteur à énergie active (classe 1)
n° 3 : CE_3 (kWh)
pour mesurer la consommation électrique des pompes P_9 , P_{10} et des compresseurs de la pompe à chaleur n° 1 ; il n'est pas relié au système d'acquisition de données

La figure 27 est reprise ci-après.

FIGURE 27



V.4.1.6. Paramètres du système "pompe à chaleur n° 2" (figure 28).

— Mesures à l'évaporateur

- Températures : T_{46} , T_{47} ($^{\circ}\text{C}$)
- Débit massique : q_{12} (kg / sec)

— Mesures au condenseur

- Températures : T_{48} , T_{49} ($^{\circ}\text{C}$)
- Débit massique : q_{13} (kg / sec)

— Mesures électriques

- Wattmètre n° 2 : W_2 (kW)
pour la puissance instantanée du compresseur
- Compteur à énergie active (classe 1)
n° 4 : CE_4 (kWh)
pour mesurer la consommation électriques des
pompes P_{11} , P_{12} et des compresseurs de la
pompe à chaleur n° 2 ; ce compteur n'est pas
rélié au système d'acquisition de données

V.4.1.7. Paramètres du système de "stockage eau glacée" (figure 26).

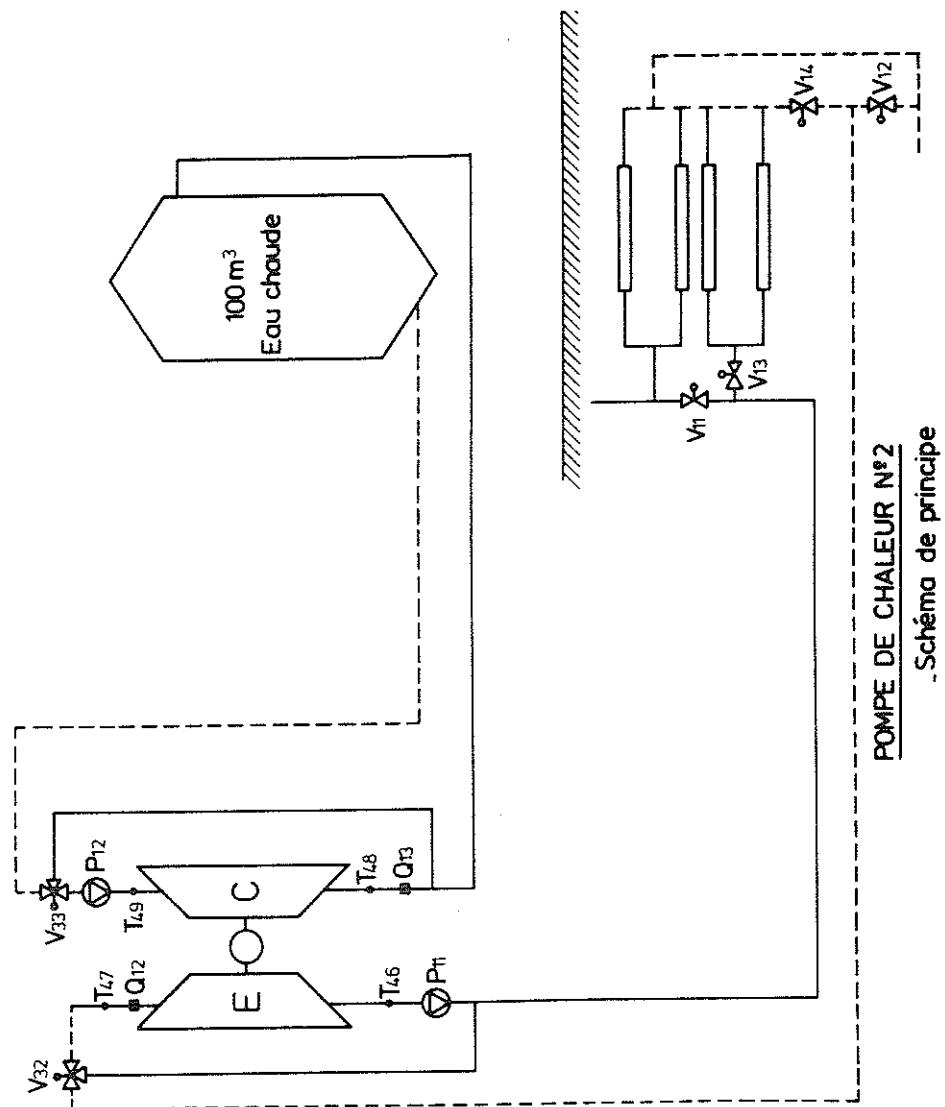
A. Transfert énergétique vers la partie "aval" pour le rafraîchissement des locaux

- Températures : T_{68} , T_{69} ($^{\circ}\text{C}$)
- Débit massique : q_{17} (kg / sec)

B. Stratification dans le stockage

- Températures : $T_{61}, T_{62}, T_{63} \dots \dots \dots$ ($^{\circ}\text{C}$)

FIGURE 28



V.4.1.8. Paramètres du "stockage en terre".

A. Serpentins horizontaux en terre (figure 29)

- Températures en terre pour obtenir la loi de variation horizontale de température :

T₈₅ à T₉₂ (°C)

disposées sur une seule canne horizontale traversant le volume de stockage

- Températures en terre pour obtenir la loi de variation verticale de température :

- T₇₅ à T₇₉ (°C)

disposées sur une première canne verticale traversant le volume de stockage

- T₈₀ à T₈₄ (°C)

disposées sur une deuxième canne verticale traversant le volume à l'extérieur du stockage

- Humidité relative en terre : H_n (%)

disposée sous une coiffe en polyéthylène, au centre de la surface supérieure

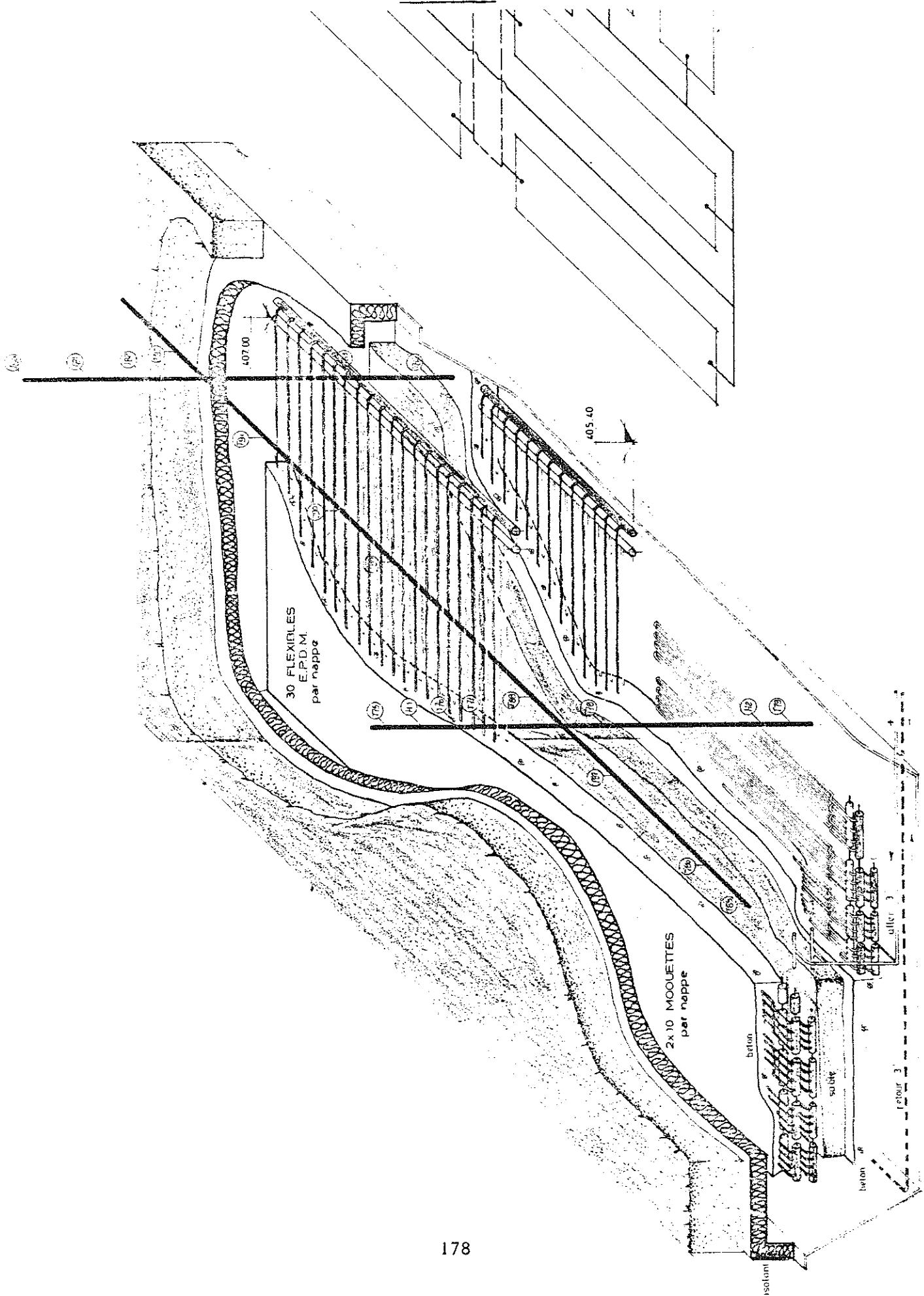
- Comptage de l'eau d'arrosage : CE (1) non relié au système d'acquisition de données

- Energie puisée dans les serpentins géothermiques (figure 25) :

- Températures : T₂₇ à T₃₀ (°C)

- Débits massiques : q₇, q₈ (l / sec)

FIGURE 29



B. Ballons d'eau enterrés (figure 25)

- Températures dans le ballon n° 1 :

T_{33} , T_{34} , T_{35} (°C)

- Six mesures de températures réparties entre

3 citerne voisines : T_{36} à T_{41} (°C)

C. Serpentins verticaux (figure 27)

Température de l'eau à l'entrée : T_{74} (°C)

V.4.1.9. Paramètres du sous-système "utilisation de l'énergie dans les locaux" (partie énergétique "aval").

- Températures sèches (T_i) et humidités relatives (H_{ni}) dans 6 locaux "maîtres" :

	T (°C)	H_n (%)
<u>Local central</u> NIVEAU R - LABOS - façade vers la ville - façade vers " G.B. "	T_{93} T_{94}	$H_{n\ 3}$ $H_{n\ 4}$
<u>Local central</u> NIVEAU R + 2 - LABOS - façade vers la ville - façade vers " G.B. "	T_{95} T_{96}	$H_{n\ 5}$ $H_{n\ 6}$
<u>Local central</u> NIVEAU R + 1 - BUREAUX - façade vers la ville - façade vers " G.B. "	T_{97} T_{98}	$H_{n\ 7}$ $H_{n\ 8}$

- Récupération sur air extrait et préchauffage d'air frais :
 - Températures : T_{70} à T_{73} (°C)
 - Débits massiques : q_{18} , q_{19} (kg / sec)

V.4.1.10. Divers.

- Consommation électrique de la régulation et du contrôle de la phase énergétique " amont " (unité de process et pompes à chaleur y comprises) par le compteur électrique d'énergie active (classe 1) n° 6 : CE_6 (kWh).
- Un dernier paramètre reste à définir : le " rendement global ", par comparaison avec une installation traditionnelle (utilisant le wattmètre W_4).

REMARQUE

Il est évident que certaines mesures permettent d'évaluer des flux énergétiques utilisables pour calculer le bilan énergétique de plusieurs sous-systèmes et constituent des paramètres communs à plusieurs sous-systèmes.

Cette répétition n'apparaît pas dans l'énumération précédente.

V.4.1.11. Résumé.

En résumé, les mesures se présentent comme suit :

	NOMBRE	SIGLES
EAU + CALOPORTEUR		
Température	74	T_1 à T_{74}
Débit massique	19	q_1 à q_{19}
MASSE TERREUSE		
Température	18	T_{75} à T_{92}
Humidité	2	H_{n1} , H_{n2}
Arrosage	1 *)	CE
PIUSSANCE ELECTRIQUE	4	W_1 à W_4
ENERGIE ELECTRIQUE	6 *)	CE ₁ à CE ₆
CONDITIONS CLIMATIQUES		
Solarimètre	4	P_1 à P_4
Température	1	T_{99}
AMBIANCE DES LOCAUX		
Température	6	T_{93} à T_{98}
Humidité	6	H_{n3} à H_{n8}
TOTAL	141	

*) Capteurs non reliés au système d'acquisition de données; au total : 7.

Les autres capteurs de mesure sont reliés au système d'acquisition de données en étant raccordés aux lignes d'entrées analogiques (4 - 20 mA) de l'interface industrielle reliée à l'unité centrale de gestion à microprocesseur.

V.4.2. Caractéristiques.

Pour assurer une précision globale de 10 % , chaque mesure doit répondre aux critères suivants :

V.4.2.1. Précision Standard / 31/.

(Transmetteurs y compris) : voir tableau p. 2 du présent rapport.

V.4.2.2. Recommandations de placement.

Voir : / 32/.

V.4.2.3. Fréquence de scrutation.

Les sondes de mesure seront scrutées à une fréquence τ (inférieure ou égale à 30 minutes) propre à chaque mesure, reprise dans le tableau suivant (p. 183).

Le calcul des valeurs des énergies calorifiques transportées par chaque débit massique, $q \cdot cp \cdot \Delta T$, sera exécuté à la même fréquence τ .

Seront stockés sur support magnétique, chaque demi-heure :

- les valeurs instantanées des sondes de mesure
dont $\tau = 30$ minutes;
- les valeurs intégrées ou moyennées sur la demi-heure des autres sondes de mesure;
- les bilans calorifiques $q \cdot cp \cdot \Delta T$ affectés aux variables relatives aux états de fonctionnement ayant eu cours dans la demi-heure;

- les états de fonctionnement et leur durée de fonctionnement ayant eu cours dans la demi-heure; ils sont liés aux positions des vannes V_1 à V_{31} et à l'état (marche / arrêt, position) des pompes P_1 à P_{12} .

τ (SECONDE ou MINUTE)

P_1 à P_4	Entre 10 SECONDES et 1 MINUTE
T_1 à T_{20}	Entre 10 SECONDES et 1 MINUTE
q_1 à q_3	Entre 10 SECONDES et 1 MINUTE
w_1 à w_4	1 MINUTE
q_4 à q_{19}	1 MINUTE
T_{21} à T_{32}	1 MINUTE
T_{42} à T_{51}	1 MINUTE
T_{64} à T_{74}	1 MINUTE
T_{33} à T_{41}	30 MINUTES
T_{52} à T_{63}	30 MINUTES
T_{75} à T_{99}	30 MINUTES
H_{n1} à H_{n8}	30 MINUTES

V.4.2.4. Revue des capteurs de mesure.

Le cahier des charges / 25 /, établi par le Bureau d'étude LATRAN et tenant compte des avis émis par notre Unité de recherche / 26 / dans l'optique d'une acquisition de données répondant aux critères précédents, reprend de façon détaillée les critères ayant présidé

à la sélection du matériel requis et fourni après adjudication par la Firme VANDER HEYDEN, S.A., de Bruxelles, en sous-traitance de l'adjudicataire, la S.A. " CONFORT & CHALEUR ".

Les prescriptions imposées au matériel placé sont les suivantes :

• A. PYRANOMETRE.

La mesure exacte des radiations solaires est capitale pour l'évaluation correcte des performances du système.

Les pyranomètres à utiliser ont été classifiés par l'Organisation Météorologique Mondiale en 1ère et 2ème classe. Le tableau ci-après reprend les caractéristiques propres à chacune de ces classes.

CHARACTERISTICS	FIRST CLASS	SECOND CLASS
SENSIVITY (W / m ²)	< ± 1	< ± 5
STABILITY (max. % change per year)	± 1	± 2
TEMPERATURE (max. % error due to change of ambient temperature)	± 1	± 2
SELECTIVITY (max. % error due to departure from assumed spectral response)	± 1	± 2
TIME CONSTANT	25 s	1 min
COSINE RESPONSE (max. % deviation)	± 3	± 5 - 7
AZIMUTH RESPONSE (max. % deviation)	± 3	± 5 - 7

La précision jugée acceptable pour la mesure de radiation solaire globale est de $\pm 5\%$. Les données doivent être corrigées par software analytique pour les variations causées par la température ambiante, la vitesse du vent, l'angle de déclinaison, la convection en fonction de l'angle d'inclinaison du solarimètre, ... La calibration du pyranomètre sera faite par un Institut météorologique.

MATERIEL RETENU :

► LAMBRECHT KG solarimètre

Principe : thermopile, DIRMHIRN étoile à 16 branches noires et blanches

Longueur d'onde détectée	0,3 à 3 μm
Sensibilité	1,8 $\text{mV} / \text{J cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$
Résistance interne	25 Ω
Constante de temps	20 s
Convertisseur séparé, délivrant un courant continu	4 ... 20 mA
Séparation galvanique d'origine	
Couvercle hémisphérique en cristal et pieds de réglage	
Résistance aux chocs et à la corrosion	
Prévention contre la condensation intérieure	

• B. TEMPERATURE.

Du type Pt 100 Ω 0°C , associée à un convertisseur séparé, répondant aux tolérances 1/2 DIN 43760,

$$\begin{aligned} &\text{soit } \pm 0,15^\circ\text{C}, \pm 0,05 \Omega \text{ à } 0^\circ\text{C} \\ &\pm 0,3^\circ\text{C}, \pm 0,125 \Omega \text{ à } 100^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Une précision accrue ($0,1^{\circ}\text{C}$) peut être atteinte par des calibrations individuelles de chacune des sondes.

Le temps de réponse est le suivant :

\leq 45 s en exécution nue (terre);

\leq 120 s en exécution protégée (liquide caloporteur ou eau);

\leq 600 s en exécution protégée en cas de plonge dans l'air.

La stabilité est meilleure que $\pm 0,05\%$ après 10 chocs thermiques consécutifs de 0°C à -200°C

ou de 0°C à $+600^{\circ}\text{C}$

MATERIEL RETENU :

► PYRO-CONTROLE

Courant de mesure recommandé de 1 à 5 mA

Courant maximal sans destruction 20 mA

Inductance de valeur moyenne 2 μ H

Capacité par rapport à une enveloppe métallique de valeur moyenne 5 pF

Vibration : essais à 30 G

à une fréquence de 1 000 Hz

Isolement par rapport à une enveloppe métallique :

- supérieur à $10^{14} \Omega$ à 20°C

- supérieur à $20 \text{ M} \Omega$ à 700°C

Le convertisseur délivre un signal linéaire 0 (4) - 20 mA
assure une reproduction $\leq 0,05\%$

La dérive est inférieure à 0,3 % 1'an.

Son degré de protection est :

- IP 20 pour le montage en local technique

- IP 40 dans les autres cas.

En cas de pose en terre, le mât de support lui assure IP 67 .

La séparation galvanique est incorporée.

• C. DEBIT MASSIQUE.

- Les mesures de débit massique de fluide sont nécessaires pour contrôler les bilans en masse mais aussi pour calculer les quantités de chaleur véhiculées par le fluide.

Un grand nombre d'instruments de différents types sont utilisables pour la mesure de débit : débitmètre à piston rotatif, à turbine, à mesure de pression différentielle, magnétique et à ultrasons (coûteux), ...

Ces instruments fournissent une lecture directe et / ou un signal électrique représentatif du débit instantané ou une valeur intégrée. Par des calibrations individuelles et corrections en fonction du débit, une précision variant entre $\pm 2\%$ et $\pm 5\%$ peut être obtenue. La difficulté consiste à maintenir la précision exigée pour des débits très bas, moindres que 50 % du débit nominal.

Lorsque des systèmes volumétriques sont utilisés, la précision peut être maintenue dans la région $\pm 2\%$.

- Le principe de mesure retenu par l'auteur de projet est *la mesure de la pression différentielle au moyen d'un dispositif avec cellule à membrane et convertisseur séparé*, constitué :

- d'un diaphragme à monture, qualité inox, sélectionné en fonction des caractéristiques de débit et de diamètre des canalisations, enfichable par bride selon DIN ;
 - d'un bloc manifold, complet avec purge et robinets d'isolation, le tout directement monté sur le convertisseur ;

- d'un convertisseur-transmetteur, série 200, vendu par HARTMANN et BRAUN AG, constitué par une cellule à membrane (à transformateur différentiel incorporé), par une électronique d'adaptation et par un amplificateur avec bloc de commande.

La cellule à membrane mesure une pression différentielle.

La pression différentielle appliquée agit sur un système de membranes, qui désaccorde le pont inductif en s'opposant à l'action des ressorts calibrés.

Un amplificateur convertit la variation de tension (proportionnelle à la pression différentielle) en un courant continu asservi.

L'alimentation et la sortie sont séparées galvaniquement.

Des potentiomètres et des résistances fixes (réglage fin et pré-réglage) permettent d'ajuster le début et la fin de la mesure dans les limites indiquées.

L'indicateur de zéro et un indicateur (modèle spécial) permettent de contrôler ces ajustages.

PRINCIPALES PROPRIETES		
- SORTIE		
Linéaire	4 ... 20 mA	
Charge admissible	0 ... 750 Ω	
- DEBUT DE LA MESURE		
Ajustable de 0 % à 90 % de l'étendue de mesure		
- FIN DE LA MESURE		
Ajustable de 100 % à 10 % de l'étendue de mesure		
- SURCHARGE ADMISSIBLE		
100 % de la pression nominale sur chaque côté		
- TEMPS DE REPONSE	± 0,3 s	
- EN % DU SIGNAL DE SORTIE MAX. :		
- Ecart de linéarité, y compris hystérésis et reproductibilité (ajustage fixe)	< ± 0,35 %	
- Reproductibilité	< 0,05 %	
- Sensibilité	< 0,01 %	
- Influence de la variation de tension 10 % ... de fréquence 10 % ... de la charge	< 0,01 % < 0,01 % < 0,65 %	
- Influence de la température : 10 K entre - 10°C et + 6°C	< 0,3 %	
- BOITIER EN ALLIAGE LEGER, Vitre de protection, degré de protection		IP 54

• D. CAPTEUR DE PUISSANCE ELECTRIQUE.

Mesure de la puissance active en triphasé 3 x 380 V
 à charges équilibrées suivant la méthode TDM
 (" Time - Division - Multiplication ")
 à modulation de largeur d'impulsions,
 avec convertisseur incorporé.
 Le signal de sortie est un courant continu constraint, proportionnel à la valeur de mesure.

MODELE RETENU :

► SINEAX 1P1 / 1Q1 de marque " Camille BAUER "

CARACTERISTIQUES ET QUALITES	
<u>TRANSFORMATEUR D'INTENSITE</u>	
- Classe de précision	0,5
- Courant nominal I_n	
a) primaire adapté à l'installation	
b) secondaire 5 A	
- Résistance aux courts circuits	$I_{dyn} = 150 I_n$
<u>CAPTEUR - CONVERTISSEUR - TRANSMETTEUR</u>	
- Classe de précision	0,5
- Entrées et sorties séparées galvaniquement	
- Entrée	
- intensité nominale entre 0,5 et 5 A	
- fréquence nominale 50 Hz	
- tension nominale entre 10 V et 500 V	
- influence de la fréquence	
(selon DIN 43780) $\leq 0,1 \%$	
- consommation propre	
a) par circuit d'intensité $< 10^{-2}$ VA	
b) par circuit de tension $U_N \cdot 1 \text{ mA}$	
- sensibilité : $< 0,05 \%$	
de l'étendue de mesure	

- capacité de surcharge
 - a) circuits d'intensité
 - $2 \times I_n$ en permanence
 - $10 \times I_n$ pendant 15 s
 - $40 \times I_n$ pendant 1 s mais max. 200 A
 - b) circuits de tension
 - $1,5 \times U_N$ en permanence
 - $2 \times U_N$ pendant 10 s
 - $4 \times U_N$ pendant 2 s
- Sortie
 - sortie I_A = courant continu contraint
 - possibilité d'ajustage de la valeur finale $\pm 2\%$
 - limitation de courant : I_A max. $\pm 25 \text{ mA}$
 - valeur nominale de I_A $0(4) \dots 20 \text{ mA}$
 - tension de charge $\pm 10 \text{ V}$
 - précision (selon DIN 43780) ... classe 0,5
 - linéarité : $\leq 0.2\%$ de 0 % à 120 % de l'étendue de mesure
 - reproductibilité $\leq 0.1\%$
 - coefficient de température $< 0.5\%$ de -25°C à $+55^\circ\text{C}$
 - influence de la résistance de charge $\leq 0.1\%$ pour ΔR_A max.
 - dérive $< 0.3\% / \text{an}$
 - ondulation résiduelle du courant $< 2\% \text{ p.p.}$
 - temps de réponse $< 0.2 \text{ s}$

PROTECTION DU BOITIER

Protégée IP 40
sauf les bornes en IP 20

• E. CAPTEURS D'HUMIDITE DE SOL / D'HUMIDITE DE L'AIR.

Du type à résistance associé à un convertisseur séparé, à sortie linéaire $0(4) \dots 20 \text{ mA}$.

La sonde est protégée par un fourreau en inox, terminé par une tête de raccordement en compound polyester.

Précision demandée	2,5 %
Temps de réponse	120 s
Courant maximal sans destruction	20 mA
Vibration : essais à 30 G	
	à une fréquence de 1 000 Hz
Isolement par rapport à une enveloppe métallique :	
- supérieur à 10^{14} Ω à 20°C	
Séparation galvanique incorporée	
Degré de protection	IP 40

Matériel retenu

Dans la gamme des capteurs SINA
et transmetteurs d'humidité LAMBRECHT

• F. COMPTEURS ELECTRIQUES A ENERGIE ACTIVE
(non reliés au système d'acquisition de données)

Les compteurs électriques de classe 0,5
s'ils sont en lecture directe,
et de classe 1
s'ils sont munis d'un transformateur d'intensité,
rencontrent les exigences de précision souhaitées.

V.5. MODE DE FONCTIONNEMENT. QUELQUES PRINCIPES.

Le calcul des flux repris dans le diagramme énergétique est élaboré au chapitre V.6.. Il nécessite, au préalable, la connaissance des

principes de fonctionnement et des configurations représentatives des états de fonctionnement possibles.

Il n'est pas fait mention ici de l'organigramme de la régulation (logique, séquences, plage de variation des consignes, sécurité, etc.), établi par l'adjudicataire, définissant les priorités et les exclusivités adéquates qui évitent l'usage irrationnel de toutes les possibilités physiques.

Une série de configurations, décrites de " A " à " M ", peuvent être distinguées :

1° Fonctionnement lié à la pompe à chaleur n° 1 (A → G)
Voir figure 27 ci-avant.

Le tableau ci-après reprend l'état des vannes (ouvertes " O "; fermées " F ") correspondant à chacun des modes.

TABLEAU 7

	v ₁₉	v ₂₀	v ₂₁	v ₂₂	v ₂₃	v ₂₄	v ₂₅	v ₂₆	v ₂₇	v ₂₈	v ₃₁	v ₃₂	v _{10.2}	v _{10.3}
A	O	F	F	F	F	O	F	F	F	O	F	F		
B	O	F	F	F	O	F	F	F	O	F	F	F	A-AB	
C	O	F	F	O	F	F	F	O	F	F	F	F		
C'	O	F	F	F	F	F	F	F	F	F	O	F		
D	F	O	F	F	F	O	F	F	F	O	F	O	A-AB	AB-B
E	F	O	F	F	F	O	F	F	F	O	F	O	B-AB	A-B
F	F	F	O	F	F	O	O	F	F	O	F	F		
G	F	F	O	F	O	F	O	F	O	F	F	F	A-AB	

Les pompes P₉ et P₁₀ { fonctionnent toujours
le compresseur PC₁ {

a) La pompe à chaleur fonctionne en " froid " (cycle inverse) pour produire de l'eau glacée dans le stockage de 5 m³ (A → C').

ETAT A

- L'évaporateur est alimenté par l'eau venant du stockage " froid ".
- Le condenseur fournit des calories à l'accumulateur primaire de 100 m³.

Lorsque l'accumulateur primaire est saturé en température et que la demande de froid subsiste, on passe au mode de fonctionnement " B ".

ETAT B

- Evaporateur (idem que l'Etat A).
- Le condenseur fournit les calories aux ballons enterrés de 450 m³.

Si la demande de froid subsiste et que l'accumulateur primaire ainsi que les ballons enterrés sont saturés en température, on passe au mode de fonctionnement " C ".

ETAT C

- Evaporateur (idem que l'état A).
- Le condenseur fournit les calories aux serpentins verticaux enterrés.

Un dernier cas (C') est lié à une demande en froid persistante alors que l'accumulateur primaire, les ballons d'eau enterrés, les serpentins verticaux sont saturés en température.

ETAT C'

- Evaporateur (idem que l'état A).
- Le condenseur rejette les calories à l'atmosphère.

b) La pompe à chaleur fonctionne en cycle direct (chaud) pour charger l'accumulateur primaire de 100 m³ (D → F).

ETAT D

- Le condenseur fournit les calories à l'accumulateur primaire de 100 m³.
- L'évaporateur refroidit les ballons d'eau enterrés de 450 m³.

ETAT E

- Condenseur (idem que l'état D).
- L'évaporateur refroidit le ballon enterré " chaud " de 50 m³.

ETAT F

- Condenseur (idem que l'état D).
- L'évaporateur refroidit les serpentins verticaux enterrés.

c) Cas particulier.

ETAT G : Le fonctionnement " G " est utilisé en dernier recours.

- Le condenseur fournit des calories aux ballons enterrés de 450 m³.
- L'évaporateur refroidit les serpentins verticaux enterrés.

On peut constater que les états de fonctionnement sont repérables à partir des signalisations caractérisant :

la position des vannes V_{19} à V_{31} , $V_{10.2}$, $V_{10.3}$

le fonctionnement des pompes P_9 , P_{10}

le fonctionnement du compresseur de la pompe à chaleur n° 1.

De même, toute paire d'événements (X, Y) tels que $X, Y \in [A, G]$ est exclue (voir tableau 7 ci-avant).

2° Fonctionnement de la pompe à chaleur n° 2 (H → I).
Voir figure 28 ci-avant.

La pompe à chaleur n° 2 a pour fonction de fournir des calories à l'accumulateur primaire de 100 m^3 , à partir de l'énergie puisée soit dans les serpentins horizontaux " solaires " (en priorité), soit dans les serpentins horizontaux " géothermiques ".

ETAT H

- Le condenseur fournit les calories à l'accumulateur primaire de 100 m^3 .
- L'évaporateur puise des calories dans les serpentins solaires.
Les vannes V_{11} et V_{12} sont ouvertes.
La pompe P_{11} et le compresseur PC_2 fonctionnent.

ETAT I

- Condenseur (idem que l'état H).

- L'évaporateur puise des calories dans les serpentins géothermiques.
- Les vannes V_{13} et V_{14} sont ouvertes.
- La pompe P_{11} et le compresseur PC_2 fonctionnent.

3° Charge de l'accumulateur secondaire par la pompe P_7
($J \rightarrow K$).

ETAT J

A partir du ballon " chaud " enterré de $50 m^3$.

Vannes V_{15} , V_{18} ouvertes.

Vannes V_{16} , V_{17} fermées.

Direction des vannes : $V_{10.2} \dots \text{AB - A}$

$V_{10.1} \dots \text{AB - B}$

$V_{10.3} \dots \text{AB - A}$

ETAT K

A partir de l'accumulateur primaire.

Vannes V_{16} , V_{17} ouvertes.

Vannes V_{15} , V_{18} fermées.

Les fonctionnements de " J " et " K " ne sont pas simultanés.

4° Utilisation du rayonnement solaire ($L \rightarrow M$).

En cas d'ensoleillement, la priorité est donnée au transfert de l'énergie récoltée en toiture, vers l'accumulateur primaire de $100 m^3$

par l'intermédiaire d'un premier échangeur de chaleur, de type caloporteur - eau (fonctionnement " L ").

Une fois cette capacité de stockage saturée, le transfert se fait simultanément vers les citernes enterrées grâce à un deuxième échangeur et vers les serpentins solaires en terre par circulation directe (fonctionnement " M ").

ETAT L

Charge accumulateur primaire :

- soit une ou plusieurs des pompes P_1 à P_3 fonctionne(nt) et les positions des vannes V_1 à V_3 sont ajustées;
- les vannes V_4 et V_7 sont ouvertes;
les vannes V_5 , V_6 , V_8 et V_9 sont fermées;
- la pompe P_4 fonctionne.

ETAT M

Charge simultanée des ballons enterrés et des serpentins solaires.

N.B. : Une charge séparée est également possible.

a) Ballons enterrés

- soit une ou plusieurs des pompes P_1 à P_3 fonctionne(nt) et les positions des vannes V_1 à V_3 sont ajustées;
- les vannes V_6 et V_9 sont ouvertes;
les vannes V_4 et V_7 sont fermées;

- la pompe P_5 fonctionne.

Direction des vannes : $V_{10.1}$ A - AB

$V_{10.2}$ A - AB

b) Serpentins solaires

- Position des vannes V_1 à V_3 {
Position des pompes P_1 à P_3 { cf. ci-avant

- Les vannes V_5 et V_8 sont ouvertes.

Les vannes V_4 et V_7 sont fermées.

- La philosophie de fonctionnement veille à assurer la priorité à l'ensoleillement, c'est-à-dire aux événements "L" et "M", avec priorité de "L" sur "M".

Par ailleurs, les pompes à chaleur peuvent contribuer à la satisfaction des besoins calorifiques. Seule la pompe à chaleur n° 1 peut être utilisée pour contribuer à la satisfaction des besoins frigorifiques.

En aval de l'accumulateur primaire de 100 m³, l'énergie est distribuée dans le bâtiment à partir d'un ballon intermédiaire de 3 m³ au sein duquel s'opère éventuellement l'appoint électrique.

Enfin, le système de conditionnement comprend une récupération calorifique sur l'air extrait des hottes des laboratoires.

La distribution de la chaleur se fait par des ventilo-convection alimentés en eau à basse température (42°C).

- Toutes les configurations décrites de "A" à "M" ne sont pas simultanées. Il s'agit d'introduire dans le processus de gestion du système les priorités et les exclusivités adéquates qui évitent l'usage irrationnel de toutes les possibilités physiques.

On trouve sur le tableau 8 la liste des états compatibles.
 Il reprend les seules configurations simultanément possibles
 sans préjuger de leur usage réel.

TABLEAU 8

A	LA		AH	AI	AJ	AK	LAH	LAI	LAJ	LAK
B	LB	MB ?	BK	MBK ?	LBK					
C	LC	MC	CK	MCK	LCK					
C'	LC'		DH	DI	DK	LDH	LDI	LDK		
D	LD									
E	LE									
F	LF		FH	FI	FK	LFH	LFI	MFK	LFK	
G	LG									
H	LH		HJ	HK	LHJ	LHK				
I	LI		IK	LIK						
J	LJ	MJ								
K	LK	MK								
AHJ	AHK	AIK	DHK	DIK	FHK	FIK				
LAHJ	LAHK	LAIK	LDHK	LDIK	LFHK	LFIK				

V.6. MESURE DES FLUX DU DIAGRAMME ENERGETIQUE.

V.6.1. Flux liés au sous-système " climat ".

Les valeurs intégrées semi-horaires de P_1 , P_2 , P_3

permettent la mesure du flux énergétique (1) équivalent à

$$P_1 S_1 + P_2 S_2 + P_3 S_3$$

où S_1 , S_2 , S_3 = surface des collecteurs dans chaque bâtiment.

V.6.2. Flux liés au sous-système " collecteurs solaires ".

BILAN ENERGETIQUE

$$(1) + (3) = (2) + (4)$$

- Le flux énergétique (1) est déjà calculé.
- Le flux énergétique (2) est calculable à partir de la somme des bilans calorifiques :
 - Pour les bâtiments " Bureaux "
$$LM_1 = q_1 \cdot cp (T_2 - T_1)$$
- Pour les bâtiments " Laboratoires "
$$LM_2 = q_2 \cdot cp (T_6 - T_5)$$
- Pour les bâtiments " Pompe à chaleur "
$$LM_3 = q_3 \cdot cp (T_{10} - T_9)$$
- Le flux énergétique (3) représente l'énergie électrique de fonctionnement des pompes P_1 , P_2 et P_3 .

Le compteur électrique d'énergie active n° 1 en tient compte, mais il globalise en outre la mesure des pompes à une vitesse P_4 (en mode " L ") et P_5 (en mode " M ") dont la consommation peut être déduite de la mesure du temps de fonctionnement et de la puissance instantanée.

- Le flux énergétique (4), représentant les pertes thermiques du sous-système " collecteurs solaires ", est estimable à partir du bilan énergétique du sous-système.

V.6.3. Flux liés au sous-système " distribution de l'énergie solaire vers le local technique ".

BILAN ENERGETIQUE

$$(2) = (5) + (6)$$

- Le flux énergétique (2) est déjà calculé.
- Le flux énergétique (5) est calculable à partir de la somme des bilans calorifiques :
 - Pour les bâtiments " Bureaux "
$$LM_4 = q_1 \cdot cp (T_{15} - T_{18})$$
 - Pour les bâtiments " Laboratoires "
$$LM_5 = q_2 \cdot cp (T_{16} - T_{19})$$
 - Pour les bâtiments " Pompe à chaleur "
$$LM_6 = q_3 \cdot cp (T_{17} - T_{20})$$
- Le flux énergétique (6), représentant les pertes thermiques du sous-système, est déduit du bilan énergétique.

Les sondes de température T_3 , T_4 , T_7 , T_8 , T_{13} , T_{14} n'interviennent pas dans les bilans principaux.

V.6.4. Flux liés au sous-système " distribution de l'énergie solaire vers les stockages ".

BILAN ENERGETIQUE

$$(5) + (8) + (10) = (9) + (7) + (11) + (12)$$

- Le flux énergétique (5) est déjà calculé.
- La distribution de l'énergie solaire a lieu de façon privilégiée vers l'accumulateur primaire de 100 m^3 (en mode "L" : les vannes V_5 et V_8 sont ouvertes tandis que les vannes V_6 , V_9 , V_4 V_7 sont fermées).
- Le flux énergétique (9) est calculable à partir du bilan calorifique : $L_7 = q_4 \cdot cp (T_{22} - T_{21})$.

Notons que cette mesure représente la mesure au secondaire de l'échangeur. Le flux énergétique au primaire de l'échangeur n'est pas mesuré : le débit est connu ($q_1 + q_2 + q_3$) mais les températures aller et retour ne sont pas mesurées. Les pertes thermiques de l'échangeur et son rendement ne sont pas calculables. L'auteur de projet a veillé à minimiser ces pertes.

Les pertes thermiques dans les canalisations et l'échangeur seront comptabilisées dans les pertes globales du système "distribution de l'énergie solaire".

- L'énergie électrique de fonctionnement de la pompe P_4 (10) est comptabilisée par le compteur électrique n° 1 reprenant les pompes P_1 à P_5 , mais peut être individualisée par mesure du temps de fonctionnement et de la puissance instantanée.

- Lorsque l'accumulateur primaire est saturé, l'énergie solaire est distribuée simultanément vers les ballons d'eau enterrés de $50 \text{ m}^3 + 450 \text{ m}^3$ (vannes V_6 et V_9 ouvertes) et vers les serpentins " solaires " enterrés (vannes V_4 et V_7 ouvertes) ; les vannes V_5 et V_8 étant alors fermées, on est en mode " M ".

• Vers les ballons d'eau enterrés

- Le flux énergétique au primaire de l'échangeur n'est pas mesuré. Le débit est bien estimable mais les températures ne sont pas mesurées.

Le flux énergétique (7) au secondaire de l'échangeur est calculé à partir du bilan calorifique :

$$M_7 = q_9 \cdot cp (T_{32} - T_{31}).$$

Les pertes thermiques dues à l'échangeur et le rendement de l'échangeur ne sont pas calculables. L'auteur de projet a veillé à les minimiser. Les pertes thermiques dues à l'échangeur seront comptabilisées dans les pertes globales du système " distribution de l'énergie solaire ".

- L'énergie électrique de fonctionnement de la pompe P_5 (8) est comptabilisée par le compteur électrique n° 1 mais peut être individualisée (cf. (10)).

• Vers les serpentins " solaires " enterrés

Le flux énergétique (11) représente la somme des bilans calorifiques : $M_8 = q_6 \cdot cp (T_{26} - T_{25})$

$$M_9 = q_5 \cdot cp (T_{24} - T_{23})$$

Ces bilans représentent l'énergie injectée dans chacune des nappes enterrées : " moquette solaire " et tuyau EPDM 3/4 ". Les pertes thermiques du sous-système " distribution de l'énergie solaire " (12) sont déductibles du bilan énergétique du sous-système. Le bilan énergétique, exécuté en ne tenant pas compte des énergies de fonctionnement (8) (10), représente une première approximation.

V.6.5. Flux liés au sous-système " stockage eau : accumulateurs primaire et secondaire ".

BILAN ENERGETIQUE

$$\begin{aligned} (9) + (13) + (14) + (15) + (16) + (17) = \\ (18) + (20) + (22) + (19) \end{aligned}$$

Pour l'accumulateur primaire :

$$(9) + (13) + (14) = (21) + (20) + (18'')$$

Pour l'accumulateur secondaire :

$$(15) + (16) + (17) + (21) = (18') + (22) + (19)$$

- Le flux énergétique (9) est déjà calculé.
- Le flux énergétique généré dans l'accumulateur primaire par la pompe à chaleur n° 1 (13) est la somme des bilans calorifiques suivants :
 - En mode de fonctionnement " A " de la pompe à chaleur
$$A_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$
 - En mode de fonctionnement " DE " de la pompe à chaleur
$$DE_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$
 - En mode de fonctionnement " F " de la pompe à chaleur
$$F_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$
- Le flux énergétique généré dans l'accumulateur primaire par la pompe à chaleur n° 2 (14) est représenté par la somme des

bilans calorifiques :

- En mode de fonctionnement " H " de la pompe à chaleur (puisage serpentins " solaires ")

$$H_1 = q_{13} \cdot cp (T_{48} - T_{49})$$

- En mode de fonctionnement " I " de la pompe à chaleur (puisage serpentins " géothermiques ")

$$I_1 = q_{13} \cdot cp (T_{48} - T_{49})$$

- Le flux énergétique transféré de l'accumulateur primaire à l'accumulateur secondaire (21) est représenté par le bilan calorifique :

$$K_1 = q_{15} \cdot cp (T_{65} - T_{64})$$

- Le flux énergétique représentant l'énergie électrique d'appoint fournie à l'accumulateur secondaire (15) est calculable à partir de la mesure de la puissance instantanée W_z intégrée.

Le compteur électrique d'énergie active n° 5 fait également la mesure.

- Le flux énergétique fourni par l'accumulateur primaire au chauffage du bâtiment (19) est représenté par le bilan calorifique :

$$\boxed{41} = q_{16} \cdot cp (T_{66} - T_{67})$$

- Le flux énergétique cédé par le ballon " chaud " de 50 m³ en terre en direct à l'accumulateur secondaire (16) est représenté par le bilan calorifique :

$$J_1 = q_{14} \cdot cp (T_{51} - T_{50})$$

- Les températures de l'eau à différents niveaux de l'accumulateur primaire T_{52} à T_{56} donnent une valeur indicative de la stratification thermique mais ne sont pas nécessairement représentatives de l'énergie stockée à court terme dans l'accumulateur primaire (20).
- Les pertes thermiques de l'accumulateur primaire de 100 m^3 (18 ") sont calculables à long terme (terme assez long pour que l'énergie stockée puisse être négligée).
- Les températures de l'eau à différents niveaux de l'accumulateur secondaire T_{57} à T_{60} donnent une valeur indicative de la stratification thermique mais ne sont pas nécessairement représentatives de l'énergie stockée à court terme dans l'accumulateur secondaire (22).
- Les pertes thermiques du sous-système " stockage eau " (18 ') sont calculables à long terme (terme assez long pour que l'énergie stockée puisse être négligée).
- L'énergie électrique de fonctionnement de la pompe P_7 (17) est comptabilisée dans le compteur électrique d'énergie active n° 2.
La mesure du temps de fonctionnement et de la puissance instantanée peuvent être également exécutées.
- Les pertes thermiques du sous-système " stockage eau " (18) sont calculables à long terme à partir du bilan énergétique. Il faut un terme assez long pour que l'énergie stockée puisse être négligée. On obtient de la sorte une idée du rendement d'utilisation du stockage. A court terme, les pertes thermiques du stockage, déduites par calcul du bilan énergétique du sous-système, ne pourront être quantifiées.

V.6.6. Flux liés au sous-système " pompe à chaleur n° 1 ".

V.6.6.1.

Le dédoublement de la pompe à chaleur n° 1 n'entraîne pas le dédoublement des capteurs de mesure pour *dito*.

Cette pompe assure l'entièreté des besoins frigorifiques.

Quand elle fonctionne en *générateur de froid*,
le circuit qui alimente l'évaporateur est raccordé sur le ballon
de 5 m³ d'eau glacée et
le circuit qui alimente le condenseur par lequel on évacue la
chaleur est
soit l'accumulateur primaire de 100 m³ (mode " A ")
soit les ballons enterrés de 450 m³ (mode " B ")
soit les serpentins verticaux enterrés (mode " C ")
soit l'atmosphère (mode " C' ")

Quand elle fonctionne comme *générateur de chaud*,
le circuit qui alimente le condenseur est raccordé à l'accumulateur
primaire et
le circuit qui alimente l'évaporateur est raccordé
soit aux ballons enterrés (mode " D ")
soit aux serpentins verticaux enterrés (mode " F ")

Un cas particulier est représenté par le mode de fonctionnement " G "
où l'évaporateur est raccordé aux serpentins verticaux enterrés et
le condenseur est raccordé aux ballons d'eau enterrés de 450 m³.

Pour chaque mode de fonctionnement $X \in [A, G]$, le bilan énergétique
de la pompe à chaleur doit être vérifié :

$$\longrightarrow Q_{EV} + P = Q_C$$

avec Q_{EV} : chaleur puisée par l'évaporateur

P : énergie du compresseur

Q_C : chaleur fournie au condenseur

De même, le coefficient de performance en " chaud " et en " froid " peut être calculé :

$$\longrightarrow COP_C = \frac{Q_C}{P} ; \quad COP_f = \frac{Q_{EV}}{P} = COP_C - 1$$

Ces relations seront également calculées globalement pour chaque effet utile :

- production frigorifique (mode " A + B + C + C' ")
- production de " chaud " (mode " DE + F ")

V.6.6.2. Calcul des flux énergétiques.

Le flux énergétique (13), représentant la chaleur transférée à l'accumulateur primaire, est calculé à partir de la somme des bilans calorifiques :

- En mode de fonctionnement " A "

$$A_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

- En mode de fonctionnement " DE "

$$DE_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

- En mode de fonctionnement " F "

$$F_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

Le flux énergétique (29), représentant la chaleur puisée au ballon d'eau froide de 5 m³, est calculé à partir de la somme des bilans calorifiques :

- En mode de fonctionnement " A "

$$A_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

- En mode de fonctionnement " B "

$$B_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

- En mode de fonctionnement " C "

$$C_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

- En mode de fonctionnement " C' "

$$C'_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

Lors de la production de " froid " (mode B à C'), le bilan calorifique du condenseur est représenté comme suit :

- Mode de fonctionnement " B "

$$(26) = B_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

- Mode de fonctionnement " C "

$$(28) = C_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

- Mode de fonctionnement " C' "

$$(28') = C'_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

Lors de la charge de l'accumulateur primaire de 100 m³ (mode " DE " et " F "), le bilan calorifique de l'évaporateur est représenté

comme suit :

- Mode de fonctionnement " DE "

$$(25) = DE_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

- En mode de fonctionnement " F "

$$(27) = F_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

Lors du cas de fonctionnement " G ", on a :

- Bilan calorifique du condenseur

$$(26') = G_1 = q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$$

- Bilan calorifique de l'évaporateur

$$(27') = G_2 = q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$$

L'énergie électrique du compresseur (23) est mesurée à partir de la puissance instantanée W_1 intégrée.

Ce calcul d'intégration peut être distingué pour chacun des modes de fonctionnement " A à G ", avec la relation :

$$\rightarrow W_1 = (W_1)_A + (W_1)_B + \dots + (W_1)_G$$

Le compteur électrique d'énergie active n° 3 mesure la consommation électrique globale du compresseur et des pompes P_9 , P_{10} (24), les modes de fonctionnement n'étant pas distingués.

La consommation des pompes P_9 , P_{10} est également estimable moyennant un compteur du temps de fonctionnement et une mesure de la puissance instantanée.

REMARQUE IMPORTANTE

L'on pourra constater que les produits

$$q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44}) \text{ et } q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42}),$$

représentant les énergies transférées au condenseur et à l'évaporateur de la pompe à chaleur n° 1,
doivent être affectés à une variable différente suivant le mode de fonctionnement en vigueur.

Il en est de même pour l'intégration de la puissance instantanée du compresseur W_1 à affecter à une variable différente suivant le mode de fonctionnement.

Cela implique :

- la connaissance en parallèle des modes de fonctionnement ayant eu cours (c'est-à-dire la position des vannes $v_{19} \rightarrow v_{31}, v_{10.2}, v_{10.3}$) et de leur durée;
 - que toute modification d'état détectée par une modification de position des vannes citées ci-dessus, entraîne un changement d'affectation des valeurs intégrées des produits : $q_{11} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$
 $q_{10} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$
et de W_1
- (On clôture une opération d'intégration et on commence une nouvelle).

V.6.7. Flux liés au sous-système " pompe à chaleur n° 2 ".

La pompe à chaleur n° 2, de type caloporeur / eau, est caractérisée par deux modes de fonctionnement indépendants, " H " et " I " :

- Mode " H " = puisage des calories hors des serpentins horizontaux " solaires " enterrés.
- Mode " I " = puisage des calories hors des serpentins horizontaux " géothermiques " enterrés.

A chaque fois, le condenseur transfère l'énergie à l'accumulateur primaire de 100 m³.

Le flux énergétique (14) représente la chaleur transférée à l'accumulateur primaire calculée à partir de la somme des bilans calorifiques :

- Mode de fonctionnement " H "

$$H_1 = q_{13} \cdot cp (T_{48} - T_{49})$$

- Mode de fonctionnement " I "

$$I_1 = q_{13} \cdot cp (T_{48} - T_{49})$$

Le flux énergétique (32) représente la chaleur puisée aux serpentins " solaires " (en mode " H ") calculée à partir de la somme des bilans calorifiques H_3 et H_4 (somme équivalente aussi à H_2) :

$$H_3 = q_6 \cdot cp (T_{26} - T_{25})$$

$$H_4 = q_5 \cdot cp (T_{24} - T_{23})$$

$$H_2 = q_{12} \cdot cp (T_{47} - T_{46})$$

Le flux énergétique (32') représente la chaleur puisée aux serpentins " géothermiques " (mode " I ") calculée à partir de la somme des bilans calorifiques I_3 et I_4 (somme équivalente aussi à I_2) :

$$I_3 = q_8 \cdot cp (T_{30} - T_{29})$$

$$I_4 = q_7 \cdot cp (T_{28} - T_{27})$$

$$I_2 = q_{12} \cdot cp (T_{47} - T_{46})$$

$$\{ H_3 \text{ et } H_4 ; I_3 \text{ et } I_4 \}$$

permettent de différencier, tant pour les serpentins " solaires " que " géothermiques ", les performances de la nappe constituée par la moquette " SOLAROLL " et celle constituée de tuyau EPDM 3/4".

L'énergie électrique du compresseur (30) est mesurée à partir de la puissance instantanée W_2 intégrée.

Ce calcul d'intégration pourra être distingué pour chacun des modes de fonctionnement " H " et " I ", avec la relation :

$$\longrightarrow W_2 = (W_2)_H + (W_2)_I$$

Le compteur électrique d'énergie active n° 4 mesure la consommation électrique globale (31) des pompes P_{11} , P_{12} et du compresseur de la pompe à chaleur n° 2, sans distinguer les modes de fonctionnement.

La consommation des pompes P_9 et P_{10} est également estimable moyennant un compte-heure de fonctionnement et une mesure de la puissance instantanée.

Les remarques émises pour la pompe à chaleur n° 1 restent valables également.

V.6.8. Flux liés au sous-système " stockage d'eau glacée ".

BILAN ENERGETIQUE

$$(33) + (34) + (35) = (29)$$

- Le flux énergétique (29) est déjà calculé.
- Le flux énergétique généré pour le rafraîchissement des locaux (34) est représenté par le bilan calorifique :

$$42 = q_{17} \cdot cp (T_{69} - T_{68})$$

- Les températures de l'eau à différents niveaux (T_{61} à T_{63}) donnent une idée de la stratification thermique dans le stockage.

L'énergie stockée à court terme (33) dans le stockage n'est pas déductible, à moins de connaître avec précision les gains de l'ambiance (35). A long terme, on peut cependant apprécier le rendement du stockage.

V.6.9. Flux liés au sous-système " stockage en terre ".

V.6.9.1.

Pour ce qui concerne le stockage en terre dans les ballons d'eau, les serpentins " solaires " et " géothermiques " enterrés (incorporés à la fouille imperméabilisée) et les serpentins verticaux (hors fouille), seuls sont représentés les flux énergétiques quantifiables à court terme.

Il s'agit des " *input* " énergétiques
(via l'énergie solaire ou les pompes à chaleur) et
des " *output* " énergétiques
(via pompe à chaleur ou en direct hors du ballon de
50 m³ " chaud "),

permettant d'évaluer le rendement d'utilisation du stockage global et de chacun de ses composants à long terme.

Les sondes de température prévues par l'auteur de projet ne fournissent donc que des valeurs indicatives ponctuelles, utiles pour la régulation dans un premier temps, mais pas nécessairement représentatives de l'énergie stockée à court terme.

Un programme de mesure plus complet, conjugué à une modélisation, est nécessaire à l'étude du comportement dynamique du stockage, de la distribution thermique au sein des volumes de stockage, de l'évolution des caractéristiques d'échange. Il permettra d'apprécier la manière dont l'énergie injectée est dissipée, récupérée ou encore les interactions de chacun des stockages entre eux et vis-à-vis de l'extérieur de la fouille.

Cette étude, consacrée à ce stockage saisonnier complexe, de grande dimension de l'énergie solaire par chaleur sensible, sera entreprise ultérieurement dans le cadre du programme national R & D Energie 3ème phase. Elle permettra d'affiner le diagramme des flux énergétiques des sous-systèmes " stockage en terre ".

V.6.9.2.

Les flux énergétiques (37), (38), (39) ne sont pas quantifiables à court terme mais à très long terme; ils permettront de se fixer une idée du rendement d'utilisation propre à chacun des stockages en terre. Ce très long terme peut représenter plus d'une année : il signifie une période de temps suffisante pour négliger, dans le bilan énergétique, l'énergie stockée.

Ils sont déductibles du bilan énergétique de chacun des stockages :

- Bilan énergétique du stockage
" ballons d'eau enterrés "

$$(7) + (26) + (26') = (39) + (25) + (16)$$

- Bilan énergétique du stockage
" serpentins verticaux enterrés "

$$(28) = (38) + (27) + (27')$$

Notons que (38) peut être positif ou négatif dans le sens d'une déperdition ou d'un gain comme pour les serpentins " géothermiques ".

- Bilan énergétique du stockage
" serpentins horizontaux " solaires " enterrés "

$$(11) = (32) + (37)$$

Le flux énergétique (36) a la même valeur que le flux énergétique (32').

V.6.10. Flux liés au sous-système " utilisation en locaux " : partie énergétique " aval ".

La mesure des énergies électriques de fonctionnement (40) et (41) n'est pas prévue.

Les flux énergétiques (42) et (43) sont calculables, respectivement, à partir des bilans calorifiques :

$$43 = q_{18} \cdot cp (T_{71} - T_{70})$$

$$44 = q_{19} \cdot cp (T_{73} - T_{72})$$

V.6.11. Résumé.

- Energies calorifiques transportées par un débit massique à partir de la relation générale : $q \cdot cp \cdot \Delta T$

Les 22 comptages de chaleur ($q \cdot cp \cdot \Delta T$) repris en colonne 1 du tableau 9 ci-après, peuvent être exécutés à partir des sondes de mesure placées.

Toutefois, il apparaît qu'un même comptage ($q \cdot cp \cdot \Delta T$) peut représenter un flux énergétique différent suivant la configuration de fonctionnement.

La colonne 2 du tableau reprend, pour chaque comptage ($q \cdot cp \cdot \Delta T$), les différentes variables d'affectation possibles de la valeur intégrée en fonction du mode de fonctionnement.

- Energies du compresseur des pompes à chaleur n° 1 et n° 2, calculées à partir des puissances instantanées : W_1 et W_2

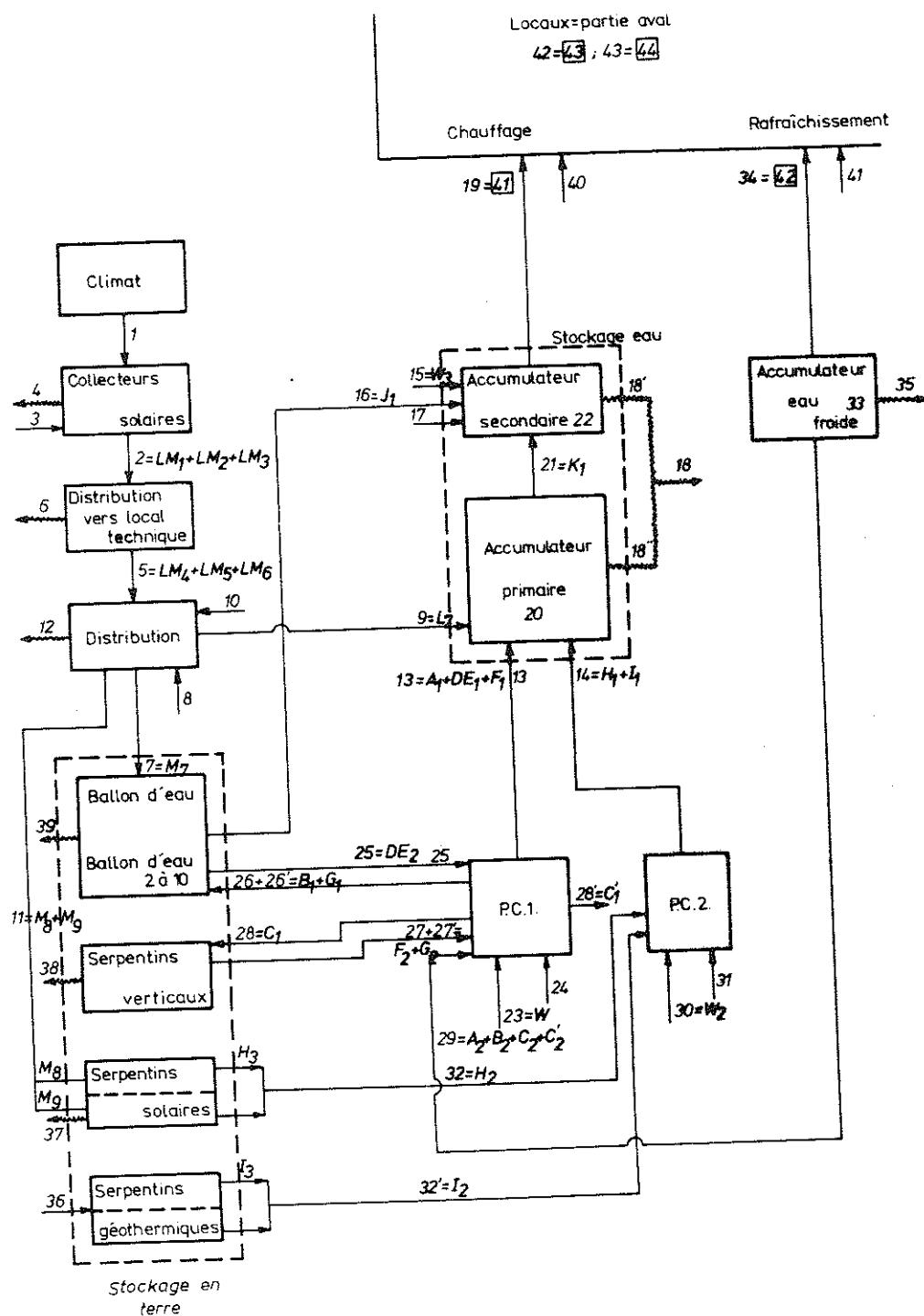
De la même façon, les valeurs intégrées devront être affectées à la variable représentative du mode de fonctionnement : voir tableau 9.

Le diagramme énergétique, tenant compte des divers états de fonctionnement, est repris en figure 30.

TABLEAU 9

	VARIABLE	MODE DE FONCTIONNEMENT	FLUX ENERGETIQUE
$q_1 \cdot cp (T_2 - T_1)$	LM_1	L ou M	
$q_2 \cdot cp (T_6 - T_5)$	LM_2	L ou M	$(2) = LM_1 + LM_2 + LM_3$
$q_3 \cdot cp (T_{10} - T_9)$	LM_3	L ou M	
$q_4 \cdot cp (T_{15} - T_{18})$	LM_4	L ou M	
$q_5 \cdot cp (T_{16} - T_{19})$	LM_5	L ou M	$(5) = LM_4 + LM_5 + LM_6$
$q_6 \cdot cp (T_{17} - T_{20})$	LM_6	L ou M	
$q_7 \cdot cp (T_{22} - T_{21})$	L_7	L	$(9) = L_7$
$q_8 \cdot cp (T_{32} - T_{31})$	M_7	M	$(7) = M_7$
$q_9 \cdot cp (T_{26} - T_{25})$	M_8, H_3	M, H	$(11) = M_8 + M_9$
$q_{10} \cdot cp (T_{24} - T_{23})$	M_9, H_4	M, H	
$q_{11} \cdot cp (T_{65} - T_{64})$	K_1	K	$(21) = K_1$
$q_{12} \cdot cp (T_{51} - T_{50})$	J_1	J	$(16) = J_1$
$q_{13} \cdot cp (T_{45} - T_{44})$	B_1, G_1 DE_1, F_1, A_1 C_1, C'_1	B, G DE, F, A C, C'	$(26) = B_1 ; (26') = G_1$ $(19) = DE_1 + F_1 + A_1$ $(28) = C_1 ; (28') = C'_1$
$q_{14} \cdot cp (T_{43} - T_{42})$	DE_2 F_2, G_2 A_2, B_2, C_2, C'_2	DE F, G A, B, C, C'	$(25) = DE_2$ $(27) = F_2 ; (27') = G_2$ $(29) = A_2 + B_2 + C_2 + C'_2$
$q_{15} \cdot cp (T_{48} - T_{49})$	H_1, I_1	H, I	$(14) = H_1 + I_1$
$q_{16} \cdot cp (T_{47} - T_{46})$	H_2, I_2	H, I	$(32) = H_2 \approx H_3 + H_4$ $(32') = I_2 \approx I_3 + I_4$
$q_{17} \cdot cp (T_{27} - T_{28})$	I_3	I	
$q_{18} \cdot cp (T_{29} - T_{30})$	I_4	I	
$q_{19} \cdot cp (T_{67} - T_{66})$	41		$(19) = \boxed{41}$
$q_{20} \cdot cp (T_{69} - T_{68})$	42		$(34) = \boxed{42}$
$q_{21} \cdot cp (T_{71} - T_{70})$	43		
$q_{22} \cdot cp (T_{73} - T_{72})$	44		
W_1	$W_{1A}, W_{1B}, W_{1C}, W_{1C'}$ W_{1DE}, W_{1F}, W_{1G}	A, B, C, D E, F, G	$(23) = W_{1A} + W_{1B} + \dots + W_{1G}$
W_2	W_{2H}, W_{2I}	H, I	$(30) = W_{2H} + W_{2I}$

FIGURE 30



V.7. ANALYSE DES PERFORMANCES THERMIQUES.

V.7.1. Données disponibles.

- Le système d'acquisition de données fournit, après chaque demi-heure :
 - 1/ 134 valeurs de mesures semi-horaires;
 - 2/ 38 variables (au maximum) représentatives de bilans calorifiques;
 - 3/ 9 variables de consommations électriques (compresseurs des pompes à chaleur n° 1 et n° 2) en distinguant chaque mode de fonctionnement;
 - 4/ pour chaque configuration "A" à "M", il détermine ou permet de déterminer leur temps de fonctionnement avec si possible heure de début et heure de fin. Cela est lié aux signalisations d'état des pompes P_1 à P_{12} et des positions des vannes V_1 à V_{31} dans le temps.

La simultanéité des configurations et leur durée de fonctionnement en seront déduites également.

- En dehors du système d'acquisition de données, les relevés journaliers suivants peuvent être effectués :
 - 5/ 6 compteurs électriques à énergie active;
 - 6/ 1 compteur d'eau;
 - 7/ tous les relevés de compte-heures des pompes et des compresseurs.

Lors du traitement, toutes ces données, prises individuellement, seront cumulées (ou moyennées) à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle, afin d'intervenir dans les calculs de bilan, de rendement, de coefficient de performance, etc., qui n'ont de pleine signification physique qu'à cette échelle.

Les valeurs maximale et minimale, propres à chaque variable pendant les intervalles de temps correspondant, pourront également être calculées.

V.7.2.

Le tableau 10 (p. 222) reprend les différents calculs de sommation de mesurandes intégrées correspondant à la détermination des flux du diagramme énergétique et aux bilans des sous-systèmes à l'échelle semi-horaire et / ou journalière.

Par simple sommation, les mêmes expressions seront également calculées à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle.

REMARQUES RELATIVES AU TABLEAU 10 (dernière colonne).

- (1) 30 min si on néglige le flux (3) dans le bilan énergétique
- (2) 30 min si on néglige les flux (8) et (10) dans le bilan énergétique
- (3) 30 min si on néglige le flux (17) dans le bilan énergétique
- (4) En prenant une base semi-horaire et en négligeant le flux (17),
 $(18'')$ + (20) et $(18')$ + (22) peuvent être connus avec précision,
c'est-à-dire qu'on ne peut dissocier l'énergie stockée et l'énergie perdue par le stockage.
La température moyenne du stockage estimée à partir des températures dans ces stockages permet d'estimer grossièrement (20) et (22) à l'échelle semi-horaire et, dès lors, $(18'')$ et $(18')$ grossièrement également.
À long terme (dès que l'on peut négliger la capacité du stockage), on a :
 - pour l'accumulateur primaire :
 $(20) = 0$ et le flux $(18'')$ est déduit avec précision;
 - pour l'accumulateur secondaire :
 $(22) = 0$ et le flux $(18')$ est déduit avec précision.
- (5) Cfr (4) :
 - (33) peut être estimé grossièrement sur une base semi-horaire en fonction des températures T_{61} à T_{63}
 - Pour un terme suffisamment long qui néglige la capacité du stockage : $(33) = 0 \implies (35) = (29) - (34)$.
- (6) Déduit à partir du calcul du rendement d'utilisation du stockage à long terme (une saison, 1 an, 2 ans, ...).

TABLEAU 10

FLUX ENERGETIQUE	SOMME DES MESURANDES INTEGRES	MESURANDES INTEGRES UTILES A LA SOMMATION	MESURES RELEVEES EN DEHORS DU SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNEES	FREQUENCE
(1) =	$P_1 + P_2 + P_3$	P_1, P_2, P_3		30'
(2) =	$LM_1 + LM_2 + LM_3$	LM_1, LM_2, LM_3		30'
(3)			Compteur électrique n° 1 (ou mesure de puissance + compte heure)	1 j
(4) =	$(1) + (3) - (2)$			1 j (1)
(5) =	$LM_4 + LM_5 + LM_6$	LM_4, LM_5, LM_6		30'
(6) =	$(2) - (5)$			30'
(7)		M_7		30'
(8)			Voir (3)	1 j
(9)		L^*		30'
(10)			Voir (3)	1 j
(11) =	$M_8 + M_9$	M_8, M_9		30'
(12) =	$(5) + (8) + (10) - (9) - (7) - (11)$			1 j (2)
(13) =	$A_1 + DE_1 + F_1$	A_1, DE_1, F_1		30'
(14) =	$H_1 + I_1$	H_1, I_1		30'
(15)		W_1	Compteur électrique n° 5 (ou mesure de puissance + compte heure)	30'
(16)		J_1		30'
(17)			Compteur électrique n° 2 (ou mesure de puissance + compte heure)	1 j
(19)		41		30'
(21)		K_1		30'
(20)		$T_{S2} \text{ à } T_{S5}$ (valeur moyenne)		30' (4)
(22)		$T_{S7} \text{ à } T_{S9}$ (valeur moyenne)		30' (4)
(18') + (20) =	$(9) + (13) + (14) - (21)$			30'
(18') + (22) =	$(15) + (16) + (17) + (21) - (19)$			1 j (3)
(18) =	$(18') + (18'')$			(4)
(23) =	$W_1 = W_{1A} + W_{1B} + \dots + W_{1G}$	$W_{1A}, W_{1B}, \dots, W_{1G}$		30'
(24)			Compteur électrique n° 3 duquel on déduit (23) (P_9, P_{10} : compte heure + wattmètre)	1 j
(25)		DE_2		30'
(26)		B_1		30'
(26')		G_1		30'
(27)		F_2		30'
(27')		G_2		30'
(28)		C_1		30'
(28')		C'_1		30'
(29) =	$A_2 + B_2 + C_2 + C'_2$	A_2, B_2, C_2, C'_2		30'
(30) =	$W_2 = W_{2H} + W_{2I}$	W_{2H}, W_{2I}		30'
(31)			Compteur électrique n° 4 duquel on déduit (30) (P_{11}, P_{12} : compte heure + wattmètre)	1 j
(32) =	$H_2 = H_3 + H_4$	H_3, H_4		30'
(32')	$I_2 = I_3 + I_4$	I_3, I_4		30'
(33)		$T_{S1} \text{ à } T_{S3}$ (valeur moyenne)		30'
(34)		42		30'
(35) =	$(29) - (34) - (33)$			(5)
(36) =	$(32')$			30'
(40)			Non prévu (compte heure + wattmètre)	1 j
(41)			Non prévu (compte heure + wattmètre)	1 j
(42)		43		30'
(43)		44		30'
(37) =	$(11) - (32)$			(6)
(38) =	$(23) - (27) - (27')$			(6)
(39) =	$(7) + (26) + (26') - (25) - (16)$			(6)

V.7.3. Energie totale fournie aux accumulateurs primaire et secondaire pour le chauffage (E_f).

$$\begin{aligned} E_f &= (15) + (16) + f_1 + (9) + (13) + (14) + f_2 + f_3 \\ &= W_1 + J_1 + f_1 + L_7 + A_1 + DE_1 + F_1 + H_1 + I_1 + f_2 + f_3 \end{aligned}$$

avec

W_1 = électricité d'appoint direct dans l'accumulateur secondaire

J_1 = énergie transférée directement par le ballon "chaud" enterré de 50 m^3

f_1 (17) = fraction de l'énergie électrique de la pompe P_7 (17), transférée au fluide

L_7 = énergie solaire directe

$A_1 + DE_1 + F_1$ = énergie transférée au condenseur de la pompe à chaleur PC_1 , en mode de fonctionnement A, DE, F

f_2 = fraction de l'énergie électrique consommée par la pompe P_{10} , en mode de fonctionnement A, DE, F de PC_1 , transférée au fluide

$H_1 + I_1$ = énergie transférée par la pompe à chaleur PC_2

f_3 = fraction de l'énergie électrique consommée par la pompe P_{12}

En négligeant les énergies de fonctionnement f_1 , f_2 , f_3 , E_f peut être calculé sur une base semi-horaire.

Les énergies de fonctionnement f_1 , f_2 , f_3 peuvent être globalisées dans un bilan journalier et mensuel.

Par simple sommation, E_f peut être calculé à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle.

Les bilans de la pompe à chaleur étant vérifiés et calculables chaque demi-heure :

$$A_1 = A_2 + (23)_A$$

$$\Delta E_1 = \Delta E_2 + (23)_B$$

$$F_1 = F_2 + (23)_F$$

$$H_1 = H_2 + (30)_H$$

$$J_1 = J_2 + (30)_I$$

On peut estimer que l'énergie E_f est assurée comme suit :

- Energies électriques

- Appoint direct W_1
- Compresseur ... $(23)_A + (23)_B + (23)_F + (30)_H + (30)_I$
- $f_1 + f_2 + f_3$ (normalement négligeables)

- Energie non onéreuse

- Energie solaire directe L_7
- Energie solaire via ballon "chaud" de 50 m^3 J_1
- Energie puisée hors du ballon "froid"
d'eau glacée A_2

- Energie puisée hors des ballons d'eau enterrés de
500 m³ DE₂
- Energie puisée hors des serpentins verticaux
enterrés F₂
- Energie puisée hors des serpentins horizontaux
" solaires " H₂
- Energie puisée hors des serpentins horizontaux
" géothermiques " I₂

A l'exception de f₁, f₂, f₃, toutes ces énergies sont calculables sur une base semi-horaire; par sommation, elles peuvent être obtenues à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle.

Il convient de remarquer que toute l'énergie fournie aux accumulateurs primaire et secondaire ne serait réellement utilisée que dans un système idéal, sans pertes : thermiques, de distribution, aux stockages, aux transferts, ou liées à la régulation.

On définira un rendement d'utilisation de l'énergie générée en " chaud " ($\eta_{ut.e.g.c}$) :

$$\eta_{ut.e.g.c} = \frac{(19)}{E_f} = \frac{41}{W_1 + J_1 + f_1 + L_7 + A_1 + DE_1 + F_1 + H_1 + I_1 + f_2 + f_3}$$

(19) représente l'énergie fournie en aval pour le chauffage du bâtiment, soit la charge thermique du bâtiment majorée des pertes liées à la distribution, à l'émission et à la régulation d'un chauffage " basse température ".

Les conditions de confort (température et humidité relative) dans certaines pièces représentatives, permettent d'apprécier qualitativement l'impact du chauffage ainsi considéré.

Ce rendement ne présente une pleine signification physique que pour une période de temps assez longue, permettant de négliger la capacité du stockage de 100 m³ (1 mois (?), une saison, 1 an).

V.7.4. Energie fournie en "froid" à l'accumulateur d'eau froide (E_{ff}).

$$E_{ff} = (29) = A_2 + B_2 + C_2 + C'_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{calculable sur une base} \\ \text{semi-horaire} \end{array} \right.$$

ainsi que les proportions $\left\{ \frac{A_2}{E_{ff}}, \frac{B_2}{E_{ff}}, \frac{C_2}{E_{ff}}, \frac{C'_2}{E_{ff}} \right\}$

REMARQUE

Les lettres correspondent au temps de fonctionnement de la pompe à chaleur PC₁ en mode A, B, C, C'

et aux niveaux de températures dans l'accumulateur primaire (mode A), dans les ballons d'eau (mode B), dans les serpentins verticaux (mode C), dans l'atmosphère (mode C').

L'énergie réellement utilisée en "froid" est représentée par le flux 42.

On définit le rendement d'utilisation de l'énergie générée en "froid" ($\eta_{ut.e.g.f}$) :

$$\eta_{ut.e.g.f} = \frac{\boxed{42}}{E_{ff}}$$

Ce rendement est calculable chaque demi-heure, mais il ne présente une signification physique que pour une période suffisamment longue permettant de négliger la capacité du stockage (1 mois, une saison, 1 an).

V.7.5. Stockages dans le sol.

Chaque stockage est caractérisé par :

- le niveau thermique atteint (température) dans le temps;
- en regard, le temps de fonctionnement des différents modes A , B , C , C' , DE , F , G , H , L , M ;
- le rapport $\frac{\text{Energie utilisée}}{\text{Energie fournie quantifiée}}$ qui définit, à long terme, le rendement d'utilisation du stockage;
- les interactions avec l'enveloppe extérieure et entre le(s) stockage(s), extrêmement complexes, et qui nécessitent une modélisation et des mesures spéciales.

REMARQUE

Si un stockage reçoit de l'énergie de la terre ambiante ou du stockage voisin, cela tend à augmenter son rendement d'utilisation car le numérateur augmente alors que le dénominateur reste invariable (et vice-versa pour le stockage voisin).

Chaque stockage peut être alimenté thermiquement par :

- un flux " solaire " via les collecteurs plans en toiture;
- un flux via la pompe à chaleur, en mode B , C , G ;
- un flux géothermique ou dissipé par un stockage voisin, non quantifié dans la présente expérience.

Nous ferons l'hypothèse dans un premier temps, à vérifier par des mesures spéciales, que l'énergie utilisée l'est avec le même rendement d'utilisation quelle que soit sa source; ce qui permettra une évaluation fort approximative de l'énergie solaire réellement utilisée (colonne 3 du tableau 11, p. 229).

Toutes les variables reprises dans le tableau peuvent être évaluées sur une base semi-horaire, mais les rapports calculés ne présentent leur pleine signification physique qu'à long terme (1 mois (?), une saison (?), 1 an, 2 ans, ...).

L'énergie fournie en "chaud" à l'accumulateur primaire et à l'accumulateur secondaire par l'ensemble des stockages en terre vaut :

$$E_{fs} = DE_2 + J_1 + F_2 + H_3 + H_4 + I_3 + I_4$$

$$- \text{Part des ballons d'eau} \dots \dots \dots \frac{DE_2 + J_1}{E_{fs}}$$

$$- \text{Part des serpentins verticaux} \dots \dots \frac{F_2}{E_{fs}}$$

$$- \text{Part des serpentins "solaires"} \dots \frac{H_3 + H_4}{E_{fs}} \quad (1)$$

$$- \text{Part des serpentins "géothermiques"} \dots \frac{I_3 + I_4}{E_{fs}} \quad (1)$$

(1) La part des nappes "moquette" et "tubes" peut être différenciée

E_{fs} et la part propre à chacun des stockages seront calculés sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

TABLEAU 11

STOCKAGE	RENDEMENT D'UTILISATION DU STOCKAGE	PART SOLAIRE (via collecteurs) DES FLUX QUANTIFIÉS ALIMENTANT LE STOCKAGE	ÉNERGIE SOLAIRE REFLÉTÉMEN UTILISÉE
Ballons d'eau	$\frac{DE_2 + J_1}{M_7 + B_1 + G_1}$	$\frac{M_7}{M_7 + B_1 + G_1}$	$\frac{(M_7 - J_1)}{M_7 - J_1 + B_1 + G_1}$
Serpentins verticaux	$\frac{F_2 + G_2}{C_1}$	$\frac{0}{C_1} = 0$	—
Serpentins " solaires "	$\frac{H_3 + H_4}{M_8 + M_9}$	$\frac{M_8 + M_9}{M_8 + M_9} = 100 \%$	$H_3 + H_4$
Serpentins " géothermiques "	Puisage géothermique (2)	—	—
GLOBAL	$\frac{DE_2 + J_1 + F_2 + G_2 + H_3 + H_4 + I_3 + I_4}{M_7 + B_1 + G_1 + M_8 + M_9 + C_1}$	$\frac{M_7 + M_8 + M_9}{M_7 + B_1 + G_1 + C_1 + M_8 + M_9}$	$\frac{(M_7 - J_1)}{M_7 - J_1 + B_1 + G_1} + H_3 + H_4$

(1) Si $G_1 \rightarrow 0$: on est en puisage géothermique essentiellement.

(2) L'énergie utile prise au flux géothermique vaut : $I_3 + I_4$; en regard, il convient d'observer l'évolution de la température dans le temps afin d'évaluer la régénération thermique du sol.

(3) En regard, observer l'évolution de la température dans le temps.

V.7.6. Coefficient de performance et rendement relatif à la collecte et à la distribution de l'énergie solaire.

- Coefficient de performance relatif à l'énergie solaire distribuée (COP_{end})

$$COP_{end} = \frac{L_7 + M_8 + M_9 + M_7}{(3) + (8) + (10)}$$

- Rendement de collecte de l'énergie solaire (η_c)

Par bâtiment $\eta_{c1} = \frac{LM_1}{P_1S_1}$; $\eta_{c2} = \frac{LM_2}{P_2S_2}$; $\eta_{c3} = \frac{LM_3}{P_3S_3}$

Globalement $\eta_c = \frac{LM_1 + LM_2 + LM_3}{P_1S_1 + P_2S_2 + P_3S_3}$

{ S_i = surface des collecteurs propres à chacun }
 { des bâtiments }

- Rendement de collecte de l'énergie solaire après distribution vers le local technique (η_{cd})

Par bâtiment $\eta_{cd1} = \frac{LM_4}{P_1S_1}$; $\eta_{cd2} = \frac{LM_5}{P_2S_2}$; $\eta_{cd3} = \frac{LM_6}{P_3S_3}$

Globalement $\eta_{cd} = \frac{LM_4 + LM_5 + LM_6}{P_1S_1 + P_2S_2 + P_3S_3}$

- Rendement de distribution de l'énergie solaire dans les stockages
(η_d)

$$\eta_d = \frac{L_7 + M_8 + M_9 + M_7}{P_1 S_1 + P_2 S_2 + P_3 S_3}$$

- Rendement de l'énergie solaire utilisée (η_u)

$$\eta_u = \frac{H_3 + H_4 + J_1 + DE_2 \left(\frac{M_7 - J_1}{M_7 - J_1 + B_1 + G_1} \right)}{P_1 S_1 + P_2 S_2 + P_3 S_3}$$

en première approximation

Le rapport $\frac{\eta_u}{\eta_c}$ caractérise la part de l'énergie solaire collectée qui est réellement utilisée.

REMARQUE

Chacune de ces expressions peut être calculée sur une base (instantanée) semi-horaire, journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle.

V.7.7. Coefficients d'exploitation énergétique globaux (chaud et froid confondus) (COE).

- Rapporté à l'énergie utilisée (COE_u)

$$COE_u = \frac{(19) + (34)}{(3) + (8) + (10) + (23) + (24) + (30) + (31) + (17) + (15) + CE_6}$$

Il s'agit du rapport entre l'énergie utilisée et les énergies électriques de fonctionnement et d'appoint nécessaires à sa génération.

(19), (34), (23), (30), (15) pourront être calculés chaque demi-heure; les autres termes sont obtenus par des relevés journaliers.

COE_u peut être calculé sur une base journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle.

Il peut présenter une valeur significative à partir d'une base mensuelle, ... , annuelle.

- Rapporté à l'énergie générée (COE_g)

$$COE_g = \frac{\frac{(19)}{\eta_{ut.e.g.c}} + \frac{(34)}{\eta_{ut.e.g.f}}}{(3) + (8) + (10) + (23) + (24) + (30) + (31) + (17) + (15) + CE_6}$$

Il s'agit du rapport entre l'énergie générée pour les besoins en "chaud" et en "froid" et les énergies électriques de fonctionnement et d'appoint nécessaires à sa génération.

Base de calcul identique à COE_u.

V.7.8. Bilans et coefficients de performance de la pompe à chaleur n° 2.

• Bilan global

Energie condenseur = Energie compresseur + Energie évaporateur

$$H_1 + I_1 = (30)_{H+I} + H_2 + I_2$$

• Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 2
 $(COP_{PC}(H+I))$

$$COP_{PC}(H+I) = \frac{(14)}{(30)_{H+I}} = \frac{(14)}{H_1 + I_1 - H_2 - I_2}$$

Le bilan global, tout comme $COP_{PC}(H+I)$ sera calculé sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

• Coefficient de performance global de la pompe à chaleur n° 2
 $(COP_G(H+I))$

en tenant compte des énergies de fonctionnement des pompes de circulation p_{11} et p_{12}

$$COP_G(H+I) = \frac{(14)}{(30 + 31)_{H+I}}$$

- Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 2 en mode de fonctionnement "H" ($COP_{PC}(H)$)
- et Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 2 en mode de fonctionnement "I" ($COP_{PC}(I)$)
(auxiliaires non compris)

$$COP_{PC}(H) = \frac{H_1}{[30]_H} = \frac{H_1}{H_1 - H_2}$$

$$COP_{PC}(I) = \frac{I_1}{[30]_I} = \frac{I_1}{I_1 - I_2}$$

- De la même manière, on peut définir les coefficients de performance globaux $COP_G(H)$ et $COP_G(I)$ qui tiennent compte des énergies de fonctionnement des pompes auxiliaires :

$$COP_G(H) = \frac{H_1}{(30 + 31)_H} ; \quad COP_G(I) = \frac{I_1}{(30 + 31)_I}$$

$(31)_{H+I}$ est relevé chaque jour

$(31)_H$ et $(31)_I$ ne peuvent être différenciés que par des relevés ponctuels, ou à partir de la connaissance du temps de fonctionnement en régime H et en régime I, en faisant l'hypothèse d'une consommation instantanée identique dans chacun des modes de fonctionnement.

REMARQUE : Ces divers bilans peuvent être calculés sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

V.7.9. Bilans et coefficients de performance de la pompe à chaleur n° 1.

Les considérations émises pour la pompe à chaleur n° 2 restent valables. Toutefois, la pompe à chaleur n° 1 est caractérisée par 7 modes de fonctionnement distincts : A , B , C , C' , DE , F , G .

- A -

- Bilan de la pompe à chaleur correspondant à chaque mode

$$\text{Mode A} \dots \quad A_1 = A_2 + (23)_A$$

$$\text{Mode B} \dots \quad B_1 = B_2 + (23)_B$$

$$\text{Mode C} \dots \quad C_1 = C_2 + (23)_C$$

$$\text{Mode C'} \dots \quad C'_1 = C'_2 + (23)_{C'}$$

$$\text{Mode DE} \dots \quad DE_1 = DE_2 + (23)_{DE}$$

$$\text{Mode F} \dots \quad F_1 = F_2 + (23)_F$$

$$\text{Mode G} \dots \quad G_1 = G_2 + (23)_G$$

- Le coefficient de performance de la pompe à chaleur seule, dans chacun des modes de fonctionnement, est évaluable :

$$COP_{PC}(A) = \frac{A_1}{(23)_A} = \frac{A_1}{A_1 - A_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(B) = \frac{B_1}{(23)_B} = \frac{B_1}{B_1 - B_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(C) = \frac{C_1}{(23)_C} = \frac{C_1}{C_1 - C_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(C') = \frac{C'^1_1}{(23)_{C'}} = \frac{C'^1_1}{C'^1_1 - C'^1_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(\text{DE}) = \frac{\text{DE}_1}{(23)_{\text{DE}}} = \frac{\text{DE}_1}{\text{DE}_1 - \text{DE}_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(F) = \frac{F_1}{(23)_F} = \frac{F_1}{F_1 - F_2}$$

$$\text{COP}_{\text{PC}}(G) = \frac{G_1}{(23)_G} = \frac{G_1}{G_1 - G_2}$$

Le bilan et chaque $\text{COP}_{\text{PC}}(X)$ avec $X \in [A, G]$

peuvent être calculés sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

- Le coefficient global de performance de la pompe à chaleur dans chacun des modes de fonctionnement, (en tenant compte des énergies auxiliaires de fonctionnement des pompes de circulation p_9 et p_{10}), est évaluable comme suit :

$$\text{COP}_{\text{G}}(A) = \frac{A_1}{(23 + 24)_A}$$

$$\text{COP}_{G(B)} = \frac{B_1}{(23 + 24)_B}$$

" " "
" " "
" " "
" " "

$$\text{COP}_{G(G)} = \frac{G_1}{(23 + 24)_G}$$

N.B. : $(24)_{A+B+\dots+G}$ peut être relevé journallement;

par contre, le relevé individualisé des auxiliaires de fonctionnement (par mode) n'est pas prévu en continu à moins :

- de connaître le temps de fonctionnement de chaque mode et
- de supposer la consommation instantanée identique dans chacun des modes.

- B -

- Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 1
lors de la production d'énergie à l'accumulateur primaire :

$$\text{COP}_{PC\ 1(\text{chaud})} = \frac{A_1 + DE_1 + F_1}{(23)_A + (23)_{DE} + (23)_F} = \frac{A_1 + DE_1 + F_1}{A_1 - A_2 + D_1 - D_2 + F_1 - F_2}$$

Rem. : $A_1 + DE_1 + F_1 = (13)$

En tenant compte des énergies auxiliaires de fonctionnement des pompes de circulation p_9 et p_{10} :

$$\text{COP}_{G(\text{PC1c})} = \frac{(13)}{(23 + 24) A + DE + F} \quad (\text{voir N.B. ci-avant})$$

COP_{PC1c} est calculable sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

- C -

• Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 1 en froid

$$\begin{aligned} \text{COP}_{\text{PC1(froid)}} &= \frac{A_2 + B_2 + C_2 + C'_2}{(23)_A + (23)_B + (23)_C + (23)_{C'}} \\ &= \frac{A_2 + B_2 + C_2 + C'_2}{A_1 - A_2 + B_1 - B_2 + C_1 - C_2 + C'_1 - C'_2} \end{aligned}$$

Rem. : $A_2 + B_2 + C_2 + C'_2 = (29)$

En tenant compte des énergies auxiliaires de fonctionnement des pompes de circulation p_9 et p_{10} :

$$\text{COP}_{G(\text{PC1f})} = \frac{(29)}{(23 + 24) A + B + C + C'} \quad (\text{voir N.B. ci-avant})$$

COP_{PC1f} est calculable sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

- D -

- Coefficient de performance de la pompe à chaleur n° 1
(tous fonctionnements compris) :

$$\text{COP}_{\text{PC } 1} = \frac{(13) + (26) + (26') + (28) + (28')}{(23) A + B + \dots + G}$$

(pour la pompe à chaleur seule)

- Le bilan global de la pompe à chaleur peut être vérifié :

$$(25) + (27) + (27') + (29) + (23) = (13) + (26) + (26') + (28) + (28')$$

En tenant compte des énergies des pompes auxiliaires, on a :

$$\text{COP}_{G (\text{PC } 1)} = \frac{(13) + (26) + (26') + (28) + (28')}{(23 + 24) A + B + \dots + G}$$

$\text{COP}_{\text{PC } 1}$ et le bilan global peuvent être évalués sur une base semi-horaire, journalière, mensuelle, annuelle.

$\text{COP}_{G (\text{PC } 1)}$ peut être évalué sur une base journalière, mensuelle, annuelle.

REMARQUE GENERALE

Il convient de connaître le temps de fonctionnement de la pompe à chaleur n° 1 dans chacun de ses modes de fonctionnement A , B , ... , G .

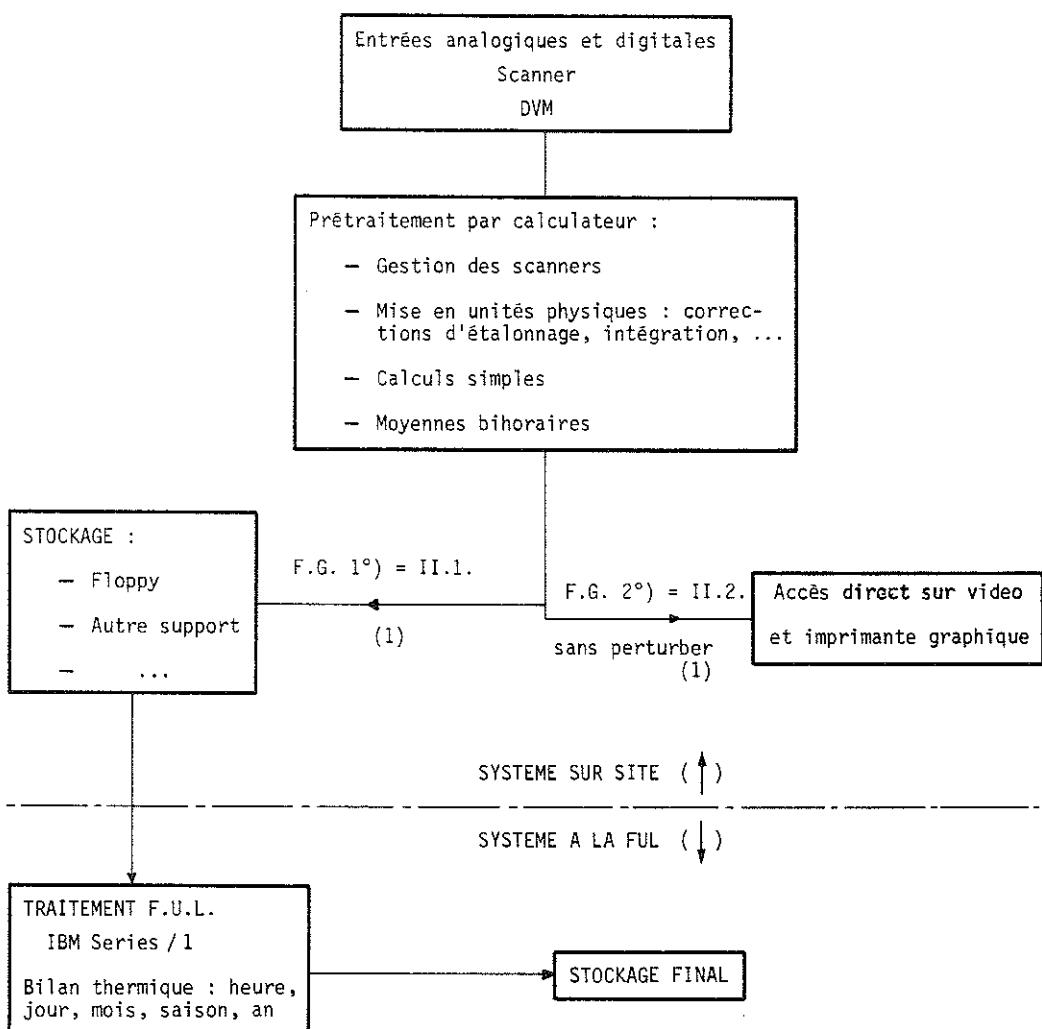
V.8. SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNEES.

Vu les retards pris par le chantier et vu les retards de la firme assurant la mise en oeuvre du système automatique de gestion qui, à travers de multiples mesures, assure l'automatisme, la régulation, l'optimisation de fonctionnement et la surveillance, l'état actuel de l'acquisition de données se limite aux prescriptions du cahier des charges / 25 / et aux *desiderata* que l'Unité de recherche a présentés lors de son établissement / 26 /.

L'Unité de recherche stipule les exigences suivantes (figure 31) / 27 / :

- 1/ Collecter les signaux électriques fournis par tous les senseurs à une fréquence propre à chaque mesure (voir V. 4.2.3.).
- 2/ Contrôler visuellement (accès direct) la collecte des données.
- 3/ Convertir les données en unités physiques réelles.
- 4/ Calculer les valeurs des énergies calorifiques transportées par chaque débit massique ($m \cdot cp \cdot \Delta T$) comme explicité au chapitre V.6.
- 5/ Calculer les valeurs moyennes et intégrées de chaque mesure sur une base semi-horaire.
- 6/ Stocker les données moyennes bihoraires (voir V. 4.2.3.) sur un support magnétique (disque souple) assurant une autonomie de plusieurs jours. Les données stockées seront envoyées pour une analyse finale à l'ordinateur de la F.U.L..

FIGURE 31



FONCTION GENERALE 1°) = II.1.

Enregistrement continu et ininterrompu de données bihoraires + quelques résultats de calcul sur "floppy" ou autre support

FONCTION GENERALE 2°) = II.2.

A la demande de l'utilisateur et sans perturber II.1., visualisation de quelques canaux et de quelques résultats de calcul pour contrôle et suivi de l'évolution du système sur site

En outre, le système d'acquisition devra comprendre :

- 1) les interfaces, si nécessaire, entre " transducteur " et " scanner " ;
- 2) un " scanner " à faible bruit et faible vitesse;
- 3) les convertisseurs analogiques / digitaux de résolution 1 μ V ;
- 4) une unité arithmétique " floating point " permettant une résolution de 0,1 % sur les résultats de calcul;
- 5) un " video display " ;
- 6) une unité de stockage magnétique avec support magnétique : disque souple compatible IBM 1 .

En septembre 1982, le stockage final des données après traitement sur ordinateur est prévu sur disque souple et la présentation des données se fera conformément aux formats requis par la Commission des Communautés Européennes / 41/.

Toutefois, l'objectif serait d'utiliser un support magnétique compatible avec le matériel utilisé par d'autres unités de recherche du Programme National : le lecteur enregistreur " Penny & Giles ", d'une capacité de 1 600 K byte par cartouche magnétique, peut être envisagé.

V.9. EQUIPEMENT COMPLEMENTAIRE. BÂTIMENTS F.U.L. - 1ère PHASE.

Bien que le Bureau d'études du chauffage ait prévu pour l'essentiel les sondes nécessaires au suivi scientifique des bâtiments de la F.U.L. tel que présenté, le plan 002 ter D dressé par le Bureau Latran démontre qu'un certain nombre de sondes complémentaires sont nécessaires.

• HYPOTHESE A

VALORISATION DE LA DIVERSITE DES STOCKAGES

Cette liste des sondes supplémentaires vise à tenir compte de la nécessité de valoriser au minimum la diversité des stockages (ballons d'eau et serpentins en terre) et le fait que le stockage en terre dans les serpentins présente un visage dédoublé.

1. Serpentins " solaires ".

- Une moitié avec les serpentins constitués de moquette " Solaroll " EPDM, tubes d'un diamètre de 5,2 mm et d'une surface de 187 m².
- Une moitié avec les serpentins en tuyaux " EPDM " de diamètre 3/4"; 30 serpentins ou spires de 30 m.

2. Serpentins " géothermiques ".

Idem ci-avant.

Ce visage dédoublé du stockage en terre est donc une variante par rapport à ce qui figurait dans les plans d'adjudication. Cette variante ne présente un intérêt que si l'on peut instrumenter ces modes de stockage, de façon à évaluer leur différence de comportement et les comparer. Cela implique au minimum la mesure d'un débit, d'une température " entrée " et d'une température " retour " à répéter quatre fois (cf 4 et 5).

A charge du budget propre au bâtiment, 18 sondes de température seront placées en terre, de façon à évaluer qualitativement le comportement du stockage dans sa masse.

De même, le stockage dans les ballons d'eau en terre nécessite au minimum la mesure d'un débit, d'une température " aller et retour " au secondaire de l'échangeur caloporteur / eau, alimentant les ballons d'eau de $10 \times 50 \text{ m}^3$ (cf. 7 et 8).

Pour avoir un aperçu qualitatif sommaire de son comportement, il a été décidé de placer 9 sondes de température dans les ballons d'eau en terre :

- 7 sondes sont prises en charge par le budget propre au bâtiment;
- les 2 autres sont à financer par les S.P.P.S. (cf 6).

Nous sommes conscients que l'instrumentation prévue ici est minimaliste en ce sens que, pour réellement apprécier le comportement du stockage, cela nécessiterait une étude de sa modélisation, le placement de beaucoup d'autres sondes de température supplémentaires : tout un programme de recherche " S.P.P.S. " à lui seul, prévu dans la 3ème phase (1982 - 1986). Ces sondes seraient :

- un compteur d'eau d'arrosage sur le stockage en terre;
- 6 compteurs d'énergie électrique;
(ces sondes ne sont pas reliées au système d'acquisition de données : micro-ordinateur)
- un capteur de température sèche avec jupe pare-soleil;
- 4 capteurs de débit, sur les fluides qui alimentent les serpentins " géothermiques " et les serpentins " solaires ";

- 8 capteurs de température, sur l'aller et le retour des serpentins " géothermiques " et des serpentins " solaires ";
- 2 capteurs de température dans un ballon d'eau de 50 m³ en terre;
- un capteur de débit, sur le fluide " eau " alimentant le stockage des ballons d'eau de 500 m³ en terre, au secondaire de l'échangeur;
- 2 capteurs de température, sur l'aller et le retour de l'eau alimentant les ballons d'eau de 500 m³ en terre, au secondaire de l'échangeur.

(Ces sondes sont reliées au système d'acquisition de données)

● HYPOTHESE B

Si on ne pouvait obtenir les moyens de valoriser la diversité des stockages, et le fait que le stockage en terre dans les serpentins présente un visage dédoublé (ce qui serait par ailleurs très regrettable), nous pouvons détailler comme suit les sondes supplémentaires strictement nécessaires :

<u>Poste 1</u>	: Inchangé
<u>Poste 2</u>	: Inchangé
<u>Poste 3</u>	: Inchangé
<u>Poste 4</u>	: Deux capteurs de débit, sur le fluide qui alimente les serpentins " géothermiques " et les serpentins " solaires " (mesure globale). Cela entraîne un changement de localisation du débitmètre par rapport à l'autre hypothèse

Poste 5 : Quatre capteurs de température, sur l'aller et le retour des serpentins " géothermiques " et des serpentins " solaires " (mesure globale). Cela entraîne un changement de localisation des sondes par rapport à l'autre hypothèse

Poste 6 : Supprimé

Poste 7 : Inchangé

Poste 8 : Inchangé

V.10. CONCLUSIONS.

Etant donné le non fonctionnement du système de chauffage de la F.U.L. à la fin du contrat (31 août 1982), aucune mesure n'a été effectuée.

Toutefois, le suivi scientifique a été préparé en détail et l'instrumentation nécessaire a été définie.

VI. VII. LISTE DES RAPPORTS TECHNIQUES CODIFIES ET REFERENCES.

/ 1 / E. MASSIN

Boucles d'eau de calibration et d'étalonnage d'instruments de mesure nécessaires au contrôle thermique des bâtiments

Rapport intermédiaire, 12 décembre 1979, E/VII/4/79/2

/ 2 / E. MASSIN

Calibration de cinq sondes de platine Pt 100 Ω 0°C et deux sondes CTN pour la Faculté Polytechnique de Mons

18 novembre 1980, E/VII/4/80/3

/ 3 / E. MASSIN et J. NICOLAS

Calibration des sondes de mesure et de simulation de processus de chauffage au moyen de deux boucles d'eau réalisées en laboratoire

juillet 1981, E/VII/4/81/1

/ 4 / E. MASSIN et J. NICOLAS

Calibration de 35 sondes de platine Pt 100 Ω 0°C pour la maison solaire de la Faculté Polytechnique de Mons

E/VII/4/82/6

/ 5 / E. MASSIN

Mesures *in situ*. Emploi de compteurs de chaleur décentralisés. Choix du compteur à micro-ordinateur CALEC AQUAMETRO

31 août 1981, E/VII/4/81/2

/ 6 / E. MASSIN

Formulaires I.E.A. pour 5 installations solaires de production d'eau chaude en Belgique

E/VII/4/81/3

/ 7 / E. MASSIN

Installation solaire de fourniture d'eau chaude sanitaire à l'école hôtelière de la ville de Namur. Projet d'instrumentation du système solaire

E/VII/4/81/4

- / 8 / E. MASSIN
*Installation solaire de fourniture d'eau chaude sanitaire et de préchauffage de l'eau du chauffage central.
Présentation du système de chauffage. Projet d'instrumentation du système solaire*
Localisation : Van Sint Jan Pierre à Lasnes
juillet 1981, E/VII/4/81/5
- / 9 / E. MASSIN
Chauffe-eau électrosolaire dans une maison unifamiliale du Foyer Jambois. Présentation du système solaire. Projet d'instrumentation
22 octobre 1981, E/VII/4/81/6
- / 10 / E. MASSIN
*Foyer Jambois. Chauffe-eau électrosolaire.
Résultats de mesure : Période du 14 mars 1981
au 31 septembre 1981*
30 octobre 1981, E/VII/4/81/7
- / 11 / E. MASSIN
*Foyer Jambois. Chauffe-eau électrosolaire.
Résultats de mesure : Période du 14 mars 1981
au 16 mars 1982*
10 mai 1982, E/VII/4/82/1
- / 12 / E. MASSIN
Fiches techniques de 25 installations solaires de production d'eau chaude en fonctionnement en Wallonie
juillet 1982, E/VII/4/82/2
- / 13 / DUTRÉ (K.U.L.), PILATTE (F.P.Ms)
Energie dans le bâtiment. Trois solutions nouvelles
Bruxelles, 7 novembre 1980, pp. 2-3
- / 14 / E. MASSIN
Dossier de 24 installations solaires de production d'eau chaude en fonctionnement en Wallonie, basé sur les formulaires de la C.E.E. et de l'A.I.E. - confidentiel
31 août 1982, E/VII/4/82/4

/ 15 / J. BOUGARD, A. PILATTE, C. BOUSSEMAERE, P. NICOLAS,
J. LAGNEAU, M. DUTRON, S. BADALI, E. MASSIN, J. STANSON

*Résultats de recherche sur l'énergie solaire dans le
bâtiment*

Spa, 1er et 2 juin 1982

/ 16 / E. MASSIN

*Economie en énergie primaire et rentabilité du chauffe-eau
solaire en Belgique : cas d'une petite installation
(3,8 m²)*

octobre 1982

/ 17 / E. MASSIN

*Premier recensement des installations solaires réalisées
en Wallonie et la région bruxelloise*

juillet 1982, E/VII/4.1/82/5

/ 18 / E. MASSIN

*Projet d'achat par le S.P.P.S. d'un système d'acquisition
et de prétraitement de données existant sur le marché.*

Annexe 1 : Recherche d'un " data logger "

*Annexe 2 : Recherche d'un système d'acquisition et
prétraitement de données*

novembre 1980, E/VII/4.1/80/5

/ 19 / E. MASSIN

*Schéma de principe et coût de quelques maisons solaires.
Complément au rapport final.*

E/VII/4.1/82/7

/ 20 / E. MASSIN

*Maison solaire unifamiliale à Bierges. Présentation du
système de chauffage. Projet d'instrumentation du système
de chauffage.*

3 septembre 1981, E/VII/4.1/81/9

/ 21 / E. MASSIN

*Maison solaire unifamiliale à Beauvechain. Présentation du
système de chauffage. Projet d'instrumentation du système
de chauffage.*

4 septembre 1981, E/VII/4.1/81/10

- / 22 / E. MASSIN
Maison solaire unifamiliale à Grez-Doiceau. Présentation du système de chauffage. Projet d'instrumentation du système de chauffage.
31 août 1981, E/VII/4.1/81/8
- / 23 / E. MASSIN
Calcul du rendement des capteurs solaires à air de la maison "Mambour" dans les conditions "Standard"
E/VII/4/80/4
- / 24 / E. MASSIN (F.U.L.), C. BOUSSEMAERE (F.P.Ms)
Solar heated swimming pools. Instrumentation and data acquisition systems
november 1981, E/VII/4.1/79/3
- / 25 / Bureau d'études LATRAN (Arlon)
Construction de laboratoires et bureaux. Phase 1. Techniques spéciales. Fascicule II. Chauffage et conditionnement. Clauses techniques. Plan et cahier des charges.
- / 26 / E. MASSIN
Remarques formulées par l'Unité de recherche à propos du cahier des charges de M. Latran dans l'optique de l'acquisition des données
6 et 8 août 1979, E/VII/4/79/1
- / 27 / E. MASSIN
Bâtiments F.U.L. - 1ère phase. Instrumentation et système d'acquisition des données. Offre examinée : offre de base.
22 février 1980, E/VII/4/80/2
- / 28 / E. MASSIN
Bâtiments F.U.L. - 1ère phase. Laboratoires et bureaux. Principes du chauffage solaire.
7 mars 1980, E/VII/4/80/1
- / 29 / J.-P. PONCELET
Energie solaire et son stockage. Chauffage solaire et stockage d'énergie à la F.U.L.
Journée scientifique du 24 juin 1981, F.U.L., pp. 26-53

- / 30 / E. STREED, M. McCABE, D. WAKSMAN, J. HEBRANCK, T. RICKMYER
*Thermal data requirements and performance evaluation.
Procedure for the National Solar Heating and Cooling
Demonstration Program*
- / 31 / *Performance monitoring of solar heating systems in
dwellings (project A). Executive summary and recomman-
dations.*
august 1979, Commission of the European Communities
- / 32 / *Recommandations for european solar collectors test methods*
Draft, june 1979, Commission of the European Communities
- / 33 / *Production d'eau chaude sanitaire au moyen d'énergie solaire*
Recherche réalisée par la Société Nationale du Logement pour
le C.S.T.C., période du 23 septembre 1981
au 22 septembre 1983
- / 34 / Ph. CONSTANT
*Technical and economic study of a solar domestic hot water
system*
Université de Liège, 83 collections des publications, 1980
- / 35 / J. LEYSEN
*Préparation d'eau chaude sanitaire par le chauffage solaire
dans une maison individuelle.*
Laborelec, 8.5125.0
- / 36 / Revue " Je vais construire "
juillet - août 1980
- / 37 / A. MEINEL, M. MEINEL
Applied solar energy : an introduction
London, Addison-Wesley (1979)
- / 38 / John A. DUFFIE, William A. BECKMAN
Solar energy thermal processes
New York, John Wiley and Sons (1974)

- / 39 / J.M. SUTTER, P. KESSELRING
Measurements of performance and efficiency of solar energy systems
Federal Institute for reactor research, Würenlingen (Suisse)
- / 40 / E. BENES, M. BRUCK, F.P. VIEHBOCK, P. BLUM, L. WIMMER, W. HUSINSKY
Standardised data acquisition package for the analysis of multicomponent solar heating systems
Report, Institut für algemeine physik, University of Technology, Vienna
- / 41 / PERFORMANCE MONITORING GROUP
*Reporting format for solar heating systems.
Active space heating and water heating systems (combined).*
Commission of the European Communities
- / 42 / E. MASSIN
Perspectives et budget
22 janvier 1981, Contrat R & D Energie, E/VII/4.1
- / 43 / *Instrumentation installation guidelines*
I B M corporation, 1 november 1977, Solar/0001-77/15
- / 44 / *Des maisons solaires sans surcoût solaire*
Revue " Je batis, je rénove ", n° 2, mai - juin 1982,
pp. 87 - 113
- / 45 / *Interim performance criteria for solar heating and cooling system in commercial buildings*
november 1976, NBSIR - 76 - 1187
- / 46 / Stephen George & Partners
Solar energy project A - The performance monitoring of solar heating system in dwellings
Data reporting format

- / 47 / Stephen George & Partners
A critical appraisal of monitoring procedures in solar heated houses
Volume 1 : Analysis and recommendations
Volume 2 : Case studies
- / 48 / Isakson, E. Ofverholm
Solar energy buildings. An outline
Reporting format, Swedish Council for Building Research

VIII. ANNEXES

ANNEXE 1 : *Calcul des performances d'installation solaire de production d'eau chaude sanitaire*

ANNEXE 2 : *Chauffage solaire et stockage d'énergie à la F.U.L. : Première expérience belge de grande ampleur*

ANNEXE 1

CALCUL DES PERFORMANCES D'INSTALLATION SOLAIRE

DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

(Extrait de Spa, 1er et 2 juin 1982) / 15 /

Un programme de calcul des performances des installations solaires, simple, fiable et adapté aux diverses variantes de circuits, est l'outil de base demandé par tous les utilisateurs de l'énergie solaire.

Les objectifs et les exigences sont variables :

1. *Bureaux d'études :*

Calculs précis de dimensionnement pour des installations de forte capacité et généralement complexes.

2. *Architectes :*

Dimensionnement rapide, de précision moyenne.
Estimation rapide des possibilités d'un site donné en fonction de l'orientation et de la surface disponible.

3. *Vendeurs d'équipements :*

Calcul rapide des performances d'une installation donnée en fonction des contraintes du client.

4. *Pouvoirs publics :*

Vérification des données d'un cahier des charges.
Essais de réception des installations solaires.

5. *Industriels solaires :*

Estimation de l'effet, sur les performances des installations, des perfectionnements apportés aux composants.

6. *Recherche scientifique :*

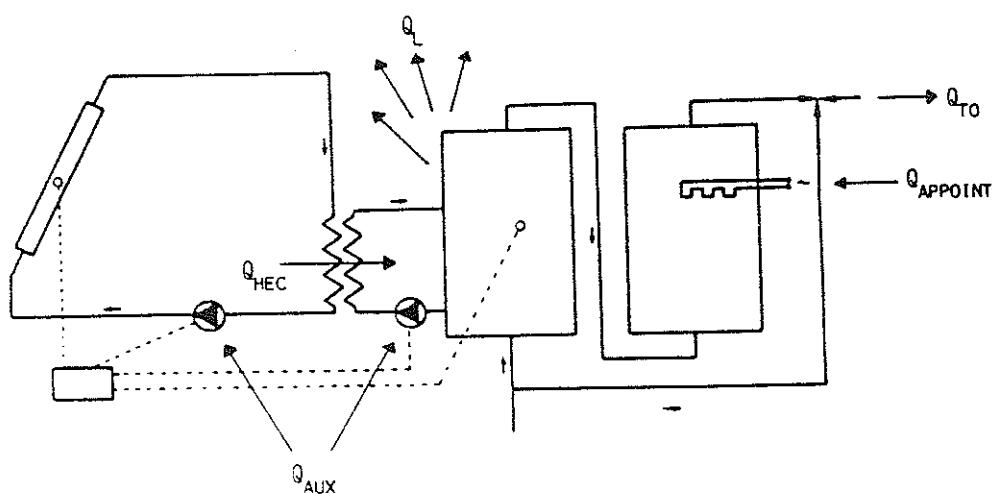
Analyse des données énergétiques mesurées sur une installation solaire en fonctionnement, en vue d'en extraire les paramètres caractéristiques.

Aide à la conception de prototypes.

Analyse de la réglementation.

PROGRAMME "SYS 5" - CHAUEAU.

Un programme "SYS 5 - Chaueau" simule une installation représentée à la figure 1 ci-après :



CHAUFFE-EAU SOLAIRE

FIGURE 1

Chaque élément : collecteur, tuyauterie, échangeur, stockage 1 et stockage 2, charge, est représenté par une équation algébrique différentielle, tandis que l'environnement climatique est constitué de données semi-horaires de l'année de référence solaire belge T / G de l'Institut Royal Météorologique.

• Les principaux paramètres caractérisant les performances thermiques :

Q_{hec}	.....	énergie économisée
Q_{to}	.....	charge de chauffe de l'eau
Q_{aux}	.....	énergie consommée par les auxiliaires
$Q_{appoint}$	.....	énergie onéreuse d'appoint
Q_1	.....	énergie perdue par le stockage

• Les rapports :

$$F_{sol} = \frac{Q_{hec}}{Q_1 + Q_{to} + Q_{aux}} = \text{fraction solaire}$$

$$F_{aux} = \frac{Q_{aux}}{Q_1 + Q_{to} + Q_{aux}} = \text{fraction d'auxiliaire}$$

$$F_{app} = \frac{Q_{app}}{Q_1 + Q_{to} + Q_{aux}} = \text{fraction d'appoint}$$

$$F_{ss} = 1 - \frac{Q_{app}}{Q_{to}} = \text{fraction solaire simplifiée}$$

Ce programme a été utilisé pour :

- les exercices d'intégration des S.P.P.S.
(voir rapports spécifiques);
- l'analyse paramétrique des petits chauffe-eau solaires;
- l'étude de quelques grandes installations.

ETUDE PARAMETRIQUE DES PETITS CHAUFFE-EAU SOLAIRES.

A partir des résultats de "SYS 5 - Chaufeau" pour 72 installations différentes, il a pu être montré que les paramètres annuels

F_{sol} , F_{aux} , $F_{appoint}$, F_{ss}

(pour les petits chauffe-eau de 1 à 15 m² de collecteurs), pourraient être calculés selon la formule suivante (écrite ici seulement pour F_{sol}) :

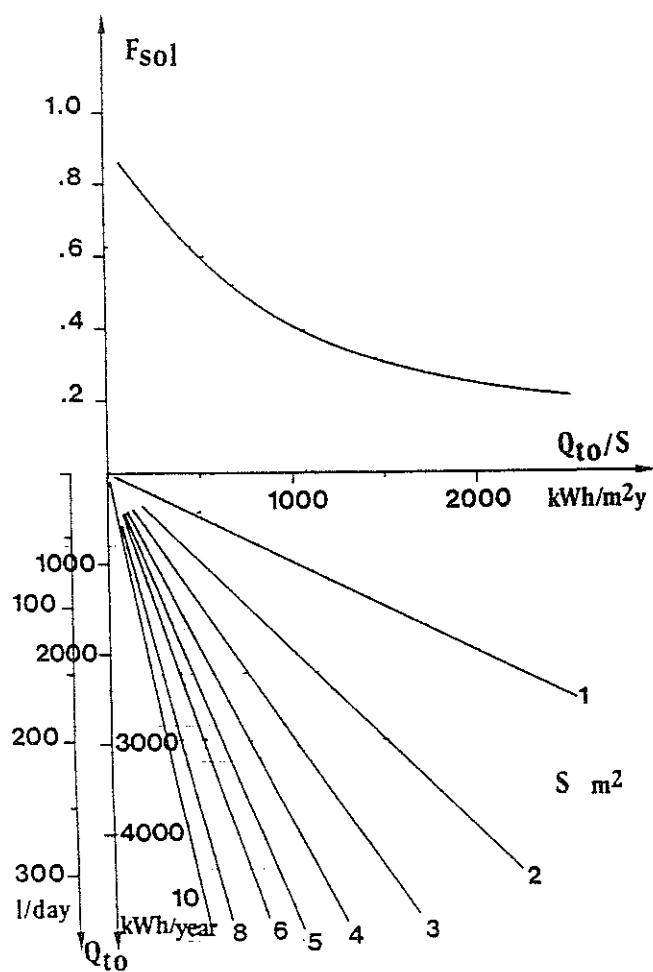
$$\begin{aligned} F_{sol} = & [F^{\circ}_{sol} (\text{ref}) + \Delta F_{sol}] F_{11} (\text{pente}) \times \\ & F_{12} (\text{azimut}) \times F_{13} (\eta_0) \times F_{14} (U_m) \times \\ & F_{15} (U_t) \times F_{16} (\varepsilon) \end{aligned}$$

où $F^{\circ}_{sol} (\text{ref})$ est la fraction solaire
fonction uniquement de (Q_{to} / S) représenté
à la fig. 2 d'une installation de référence

ΔF_{sol} est une correction due à l'apport des circulateurs

et où F_{1j} est une correction due à l'apport des facteurs correctifs tenant compte de l'influence d'un paramètre : pente, azimut, η_o , coefficient de perte du collecteur, coefficient de perte des tuyauteries, efficacité de l'échangeur

FIGURE 2



La figure 3 illustre ces corrections, qui montrent clairement les facteurs les plus importants :

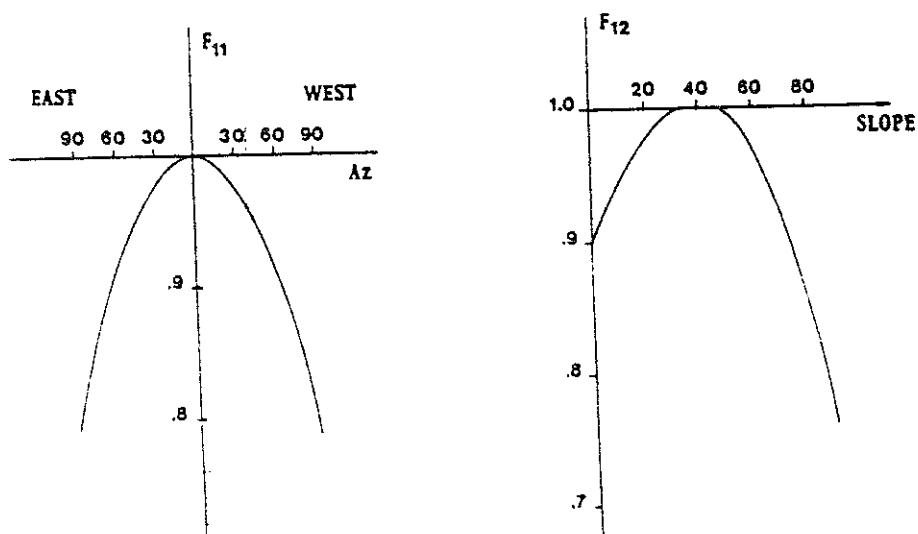
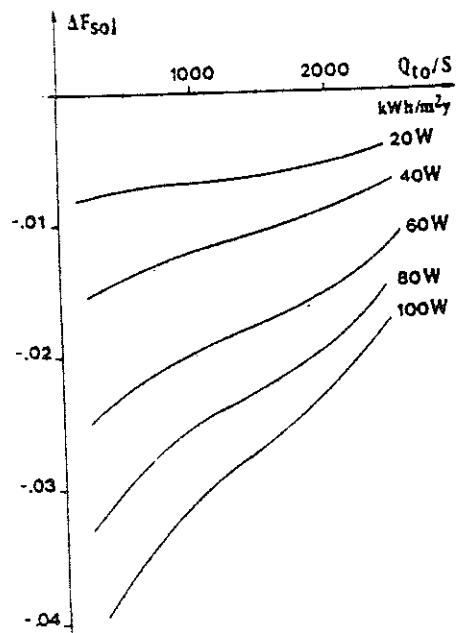
S , η_0 , U_m outre naturellement Q_{t0} / S

Les paramètres de l'installation de référence sont repris ci-dessous.

COLLECTEUR
Pente 45°
Azimut 0
η_0 0,75
U_m 2,7 W / m ² °C
TUYAUTERIE
U_t = 1,6 W / °C
CIRCULATEUR
P_{aux} 0 à 100 W
ECHANGEUR
ε = 0,7
UTILISATIONS
Température "entrée" eau 10 °C
Température "sortie" eau 45 °C
REPARTITION DE LA CHARGE
Entre 7 heures et 9 heures 25 %
Entre 11 heures et 13 heures 25 %
Entre 18 heures et 21 heures 50 %

La précision interne de cette méthode, rapide et purement graphique, est de 2 à 3 % .

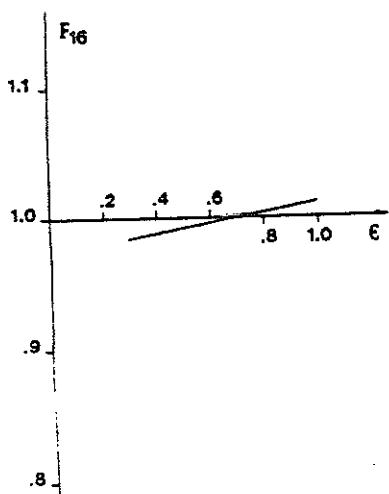
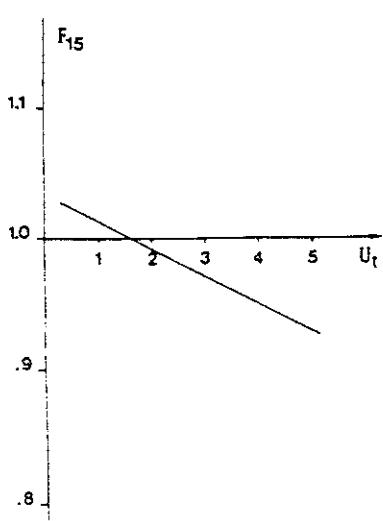
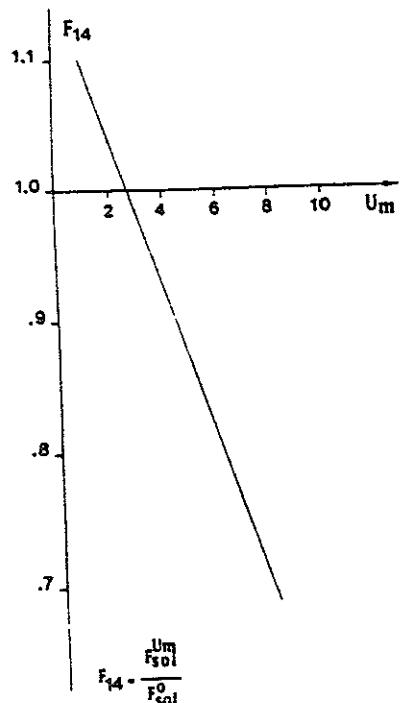
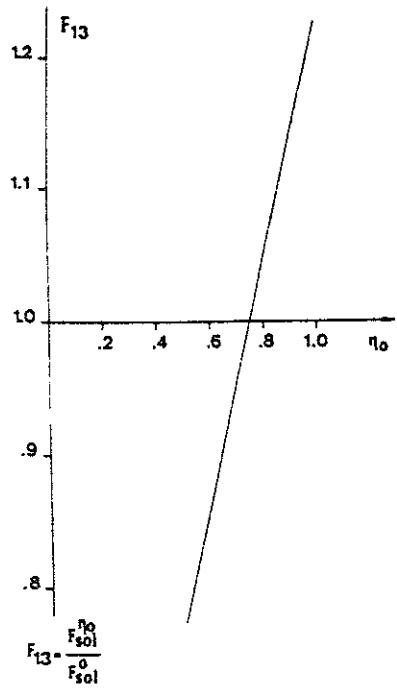
FIGURE 3



$$F_{11} = \frac{F_{\text{sol}}^{Az}}{F_{\text{sol}}^0}$$

$$F_{12} = \frac{F_{\text{sol}}^S}{F_{\text{sol}}^0}$$

FIGURE 3 (suite)



$$F_{15} = \frac{U_t}{F_{sol}^0}$$

$$F_{16} = \frac{F_{sol}^{\epsilon}}{F_{sol}^0}$$

ANNEXE 2

CHAUFFAGE SOLAIRE ET STOCKAGE D'ÉNERGIE À LA
F.U.L. : PREMIÈRE EXPÉRIENCE BELGE DE GRANDE AMPLÉUR

Jean-Pol PONCELET, Ingénieur civil, Chercheur F.U.L.

RESUME

La première expérience belge de chauffage solaire d'un bâtiment public de grande taille est en cours à la Fondation Universitaire Luxembourgeoise. Elle comprend notamment 380 m² de collecteurs solaires à absorbeur sélectif dans une toiture intégrée, et deux pompes de chaleur à eau. Un stockage d'énergie mixte terre-eau est enterré à côté des bâtiments de 3 500 m². Après avoir mis l'accent sur les nombreuses solutions innovantes retenues lors de l'exécution de ce chauffage tout à fait nouveau, et expliqué brièvement le principe de fonctionnement du système, on dégagé les perspectives de travail scientifique original qui en découlent.

site la transformation d'énergie primaire fossile, et d'autre part des exigences nouvelles, mais encore très diffuses, nées des soubresauts pétroliers des années 1973-1974.

- 2 L'utilisation de pompes de chaleur marquait une première orientation, poursuivie par le recours à l'énergie solaire thermique et au stockage d'énergie de grande ampleur dans le projet adopté en 1977 et en voie d'achèvement en 1981. L'expérience entreprise ouvre la voie à l'utilisation de nouvelles techniques de chauffage dans des bâtiments du type "public" à charge thermique intermittente. Confirmant l'intérêt du projet et son caractère innovateur, l'Administration de l'Energie du Ministère des Affaires Economiques décidait en 1980 de couvrir par un subside spécial le chauffage solaire de la F.U.L., dans le cadre de l'encouragement à des projets de démonstration dans des instituts de recherche du pays. Cette première expérience en Belgique ouvre à la F.U.L., pour la prochaine décennie, un domaine prioritaire de recherche appliquée.

► LES OPTIONS TECHNIQUES DU PROJET

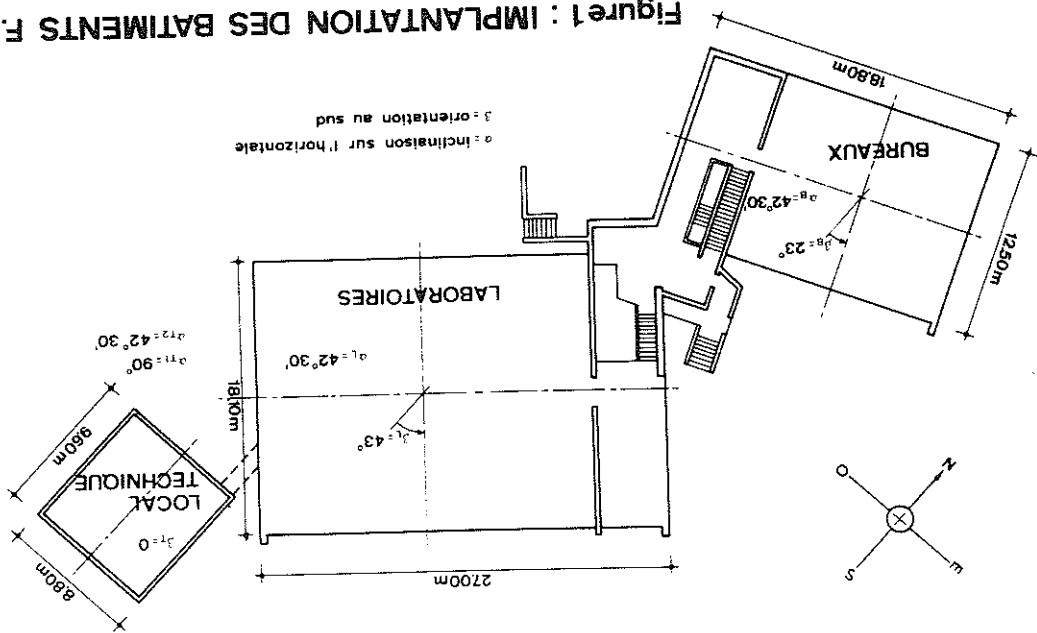
INTRODUCTION

- 1 Lancé dès 1973, le programme d'extension de la F.U.L. prévoyait, dans une première phase, la construction de laboratoires et de bureaux destinés aux services scientifiques. Le complexe construit à Arlon comprend deux modules utiles et un module technique, pour lesquels s'est rapidement posé avec acuité le problème du chauffage à mettre en oeuvre. Ce dernier se devait de concilier d'une part la vocation "environnementale" de l'Institution, au nom de laquelle notamment était exclue du

CONCEPTION ARCHITECTURALE ET THERMIQUE

- 3 Les bâtiments de la F.U.L. ont été construits de 1978 à 1980. Les deux bâtiments utiles — laboratoires et bureaux — et le local technique occupent respectivement 490 m², 235 m² et 85 m² au sol (figure 1, p. 28). De silhouette assez massive, ils comprennent deux étages en façade et deux ou trois étages sous toiture, ces derniers étant éclairés par une rangée de fenêtres réversibles placées dans le plan du toit. L'ardoise naturelle est utilisée pour les toitures exposées au nord. Les toitures

FIGURE 1 : IMPLANTATION DES BÂTIMENTS FUL.



ensoleillées sont orientées à 23° S - SE, 43° SE et 0° S par rapport au midi, respectivement pour le bloc bureaux, le bloc laboratoires et le local technique. La toiture s'élève d'un angle de 42° sur l'horizontale.

4 Une *isolation thermique* adéquate de l'enveloppe du bâtiment a été placée en vue d'une réduction significative des déperditions thermiques. Pour les éléments importants de cette enveloppe, le tableau I reprend, outre leur coefficient global de résistance thermique, la nature des matériaux successivement mis en œuvre, de l'extérieur vers l'intérieur, et leur épaisseur. Les châssis de fenêtre sont équipés de vitrage double isolant.

ÉLÉMENTS	RÉSISTANCE THERMIQUE ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)	MATÉRIAUX	ÉPAISSEUR (m)
Murs extérieurs (sous-sol)	0.261	béton armé fibre minérale argile expansée	0.24 0.12 0.14
Murs extérieurs (piézons)	0.307	béton lourd liège agglomérée argile expansée	0.24 0.10 0.14
Façades	0.37	cadre bois (2 x) liège agglomérée	0.7 0.10
Toiture	0.64	ardoises / collecteurs fibre minérale	— 0.24

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES DE L'ENVELOPPE EXTERIEURE DES BÂTIMENTS

En utilisant notamment ces caractéristiques thermiques théoriques, on peut évaluer l'importance des déperditions thermiques des bâtiments selon les méthodes traditionnelles (DIN 4701). Sur une base de température - 14°C / 19°C, ce calcul donne les résultats synthétisés au tableau 2.

Conditions extérieures / intérieures	- 14°C / + 19°C
Déperditions par transmission	92 kW
Déperditions par ventilation : naturelle	35 kW
	mécanique
	21 kW
Déperditions totales	148 kW
Volume chauffé	6 600 m ³
Coefficient volumique de déperdition	0,68 m ³ K ⁻¹
Charge thermique annuelle	1 100 GJ

TABLEAU 2 : DONNEES THERMIQUES THEORIQUES (DIN 4701)

COLLECTEURS SOLAIRES

6 La superposition à une toiture traditionnelle de collecteurs solaires modulaires conduit à de nombreux désagréments et à une qualité architecturale douteuse. Au contraire, on voulait coordonner la réalisation d'une *toiture* en ardoises naturelle de *verrières* transparentes abritant des coursives extérieures de l'*éclairage* des locaux situés sous la toiture au moyen d'fenêtres réversibles et des capteurs solaires. A cette fin, 1 partie énergétique de la toiture est constituée de solides de résistance placés suivant la pente à 45 degrés (entre axes : 0,60 ou 0,90 m), qui libèrent ainsi des surfaces correspondantes sur toute la hauteur de la toiture pour l'accès aux collecteurs solaires par l'intérieur du bâtiment (figure 2, p. 31).

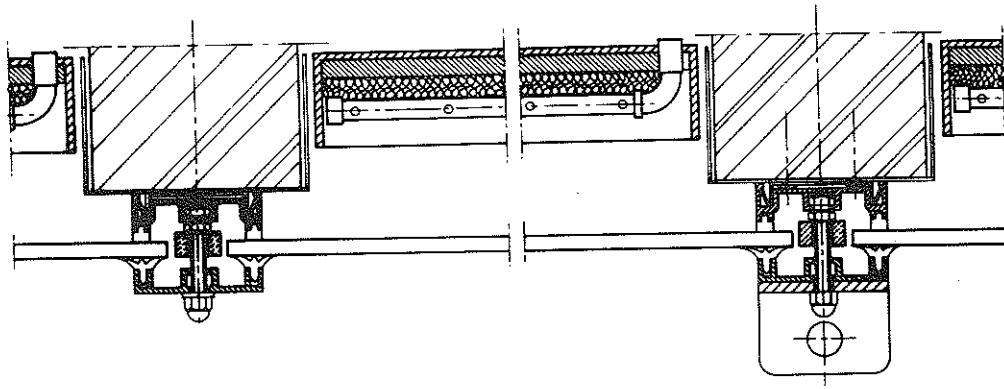


Figure 2 : COUPE TRANSVERSAL DE LA VERRIERE ET DES COLLECTEURS SOLAIRES

Sur ces éléments de structure sont posés des profilés d'aluminium laqué extérieurement, en forme de " I ", supportant le vitrage couvrant à la fois les capteurs et les coursives extérieures (verre trempé chimiquement VHR 4 mm). L'étanchéité est assurée par des parcloises en aluminium à joints en néoprène. Le circuit du caloporteur longe les solides de résistance : il n'y a donc pas d'obstacle entre les collecteurs généraux en bas et au fait de la toiture.

7 Dans l'épaisseur des solides de résistance se trouvent les collecteurs solaires, constitués d'un caisson en aluminium comportant l'absorbeur, l'isolation thermique et les accessoires de raccordement. L'absorbeur est fait de tubes de cuivre brasés sur une feuille de cuivre, recouverts d'une surface sélective (oxyde de chrome sur nickel). Le tableau 3 résume les caractéristiques des collecteurs, dont la surface nette d'absorption, soit 382.4 m^2 , est répartie entre les éléments de toiture selon les données du tableau 4, p. 33.

BÂTIMENT	LIGNE	NOMBRE	LONGUEUR (m)	SURFACE (m ²)
Laboratoires 163 m ²	1	14	1.80	19.15
	2	28	2.80	59.58
	3	14	1.40	14.90
Bureaux 92.7 m ²	4	28	1.80	38.30
	5	28	2.40	51.07
	1	10	1.80	13.68
	2	20	2.80	42.56
	3	20	2.40	36.48
Technique (toiture) 82.1 m ²	1	9	2.40	16.42
	2	9	2.40	16.42
	3	9	2.40	16.42
Technique (façade) 24.6 m ²	4	9	2.40	16.42
	5	9	2.40	16.42
	1	9	1.80	12.31
	2	9	1.80	12.31

TABLEAU 4 : REPARTITION DES COLLECTEURS SOLAIRES

Largeur du caisson	790 mm
Largeur de l'absorbeur	760 mm
Coefficient d'absorption α	0.95
Coefficient de rémission ϵ	0.17
Isolation : laine minérale	30 mm
polyuréthane	20 mm
Conditions d'essai : pression	1 MPa
température	200°C
Capacité en fluide caloporteur	0.6 dm ³ m ⁻²

TABLEAU 3 : COLLECTEURS SOLAIRES

- 8 Les canalisations "énergétiques" qui alimentent les collecteurs solaires sont constituées d'une partie d'acier souple à parois minces et d'autre partie de flexibles de raccordement souples (élastomère EPDM). Le choix du *fluide caloporteur* s'est porté sur un propylène-glycol $\text{C}_3\text{H}_6(\text{OH})_2$ offrant un compromis jugé optimum entre notamment les caractéristiques de viscosité, de neutralité chimique, de chaleur massique et d'inhibition de la corrosion.
- 9 L'optimisation d'un système de chauffage solaire dans une région tempérée comme la Belgique requiert l'établissement d'un relatif

équilibre entre les apports thermiques solaires, essentiellement fluctuants, et les exigences thermiques des bâtiments. Les uns et les autres étant globalement déphasés de six mois, il s'impose de compenser ce déphasage par un stockage thermique tant de régulation (court terme) que saisonnier (autonomie, à long terme).

Que ce soit par le recours à la chaleur sensible, ou même à la chaleur latente de seuls minéraux ou de composés organiques, les modalités du stockage de régulation ont été assez bien précisées. Par contre, si le stockage saisonnier par exemple dans des réservoirs d'eau, proposé par Alexandrov il y a une demi-douzaine d'années, a démontré sa faisabilité, il n'en reste pas moins que son coût élevé exige que des améliorations y soient apportées. Par ailleurs, l'importance des investissements exigés par le recours à l'énergie solaire impose l'utilisation intensive des équipements afin de maximiser leur facteur de charge. Le stockage de l'énergie rayonnée intensivement en période de faibles besoins contribue à cet objectif.

On est alors amené à optimiser un système complexe modélisé, en particulier grâce à la conjonction de plusieurs facteurs mis en évidence dans les simulations (1) : la surface des collecteurs, la capacité calorifique du stockage, la qualité de son isolation thermique et la charge thermique du système. Deux paramètres sont utiles dans des comparaisons quantitatives : les rapports de la charge thermique annuelle d'une part, de la capacité calorifique du stockage d'autre part, à la surface de collecteurs solaires.

11 Le choix de la F.U.L. s'est porté sur un stockage par chaleur sensible dans l'eau contenue dans des réservoirs enterrés dont la capacité totale atteint 500 m³. Il s'agit d'un ensemble de 10 ballons en acier de 50 m³ disposés horizontalement sur le fond d'une fouille à 5 m de profondeur, dans l'angle formé au NE par le pignon des laboratoires et la façade des bureaux (figure 3). Les principales caractéristiques physiques de ces citernes sont résumées au tableau 5, p. 36.

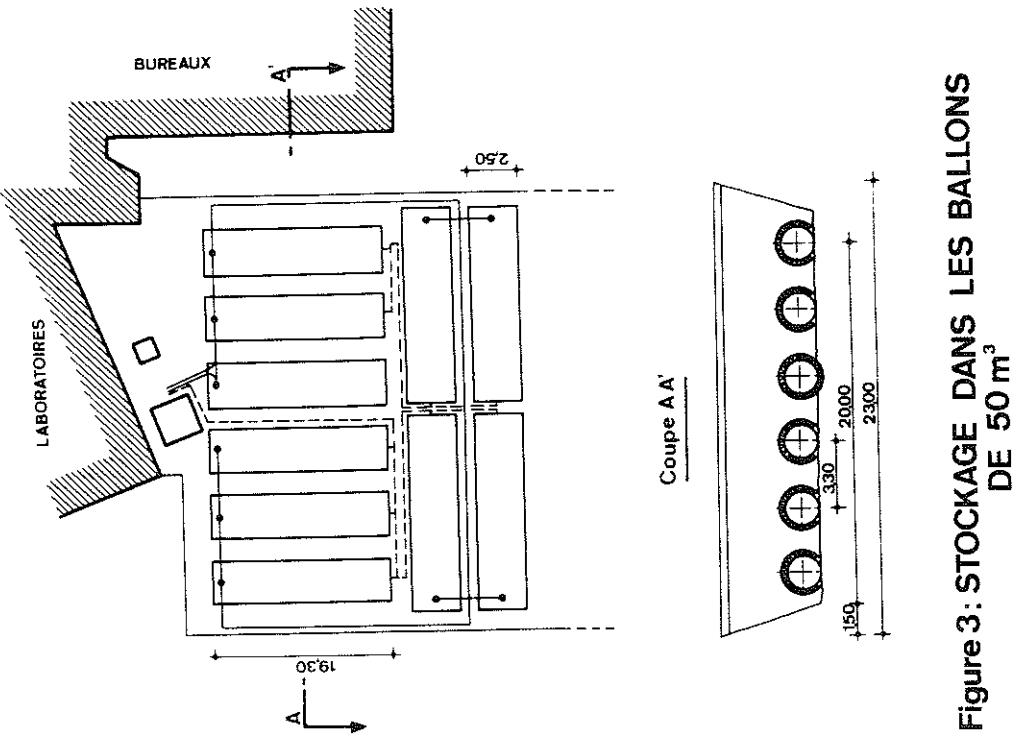


Figure 3: STOCKAGE DANS LES BALLONS DE 50 m³

(1) *Nouvelles techniques de chauffage*, Journée d'information du programme national de R-D dans le domaine de l'énergie, 17 juin 1977, Service de Programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles.

CITERNES CYLINDRIQUES A FONDS BOMBÉS :	
Diamètre	2,50 m
Longueur	10,80 m
Épaisseur	6,0 mm
Masse	4 800 kg

PROTECTION EXTERIEURE :	
Primer, asphalte, toile de verre, lait de chaux	

ISOLATION THERMIQUE :	
Coffrage en polyesterc, et injection de mousse de polyuréthane	35 kg m ⁻³
Densité	160 mm
Épaisseur	0,023 W m ⁻¹ K ⁻¹
Conductibilité	

TABLEAU 5 : CITERNES DE STOCKAGE

- 12 Comme la surface " plancher " des bâtiments de la F.U.L. et donc la charge thermique totale sont importantes par rapport à la surface de toiture ensoleillée (il y a trois ou quatre étages), on s'attend à ce que la charge spécifique soit élevée. Le rapport de la charge (1 100 GJ) à la surface de collecteurs (382 m^2) conduit à une valeur de $2,9 \text{ GJ m}^{-2}$. On montre qu'il s'agit d'un avantage : des collecteurs fortement chargés permettent d'atteindre un meilleur rendement de conversion car les températures atteintes sont peu élevées (le rendement théorique atteint 39 %). Bien évidemment, la fraction solaire de la charge est réduite : c'est le désavantage. L'utilisation de pompes de chaleur peut cependant compenser largement cet inconvénient.
- Dans le cas de 500 m^3 d'eau, la capacité thermique du stockage est de l'ordre de $2,1 \text{ GJ K}^{-1}$. Rapportée à la surface des collecteurs et à la charge thermique totale, cette valeur conduit respectivement à $5,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ et à $0,002 \text{ K}^{-1}$. Le premier rapport

(1) Port peut être comparé à la valeur $0,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, qui correspond à la " norme " habituelle de 50 dm^3 d'eau de stockage par mètre

carré de collecteurs. Il donne ainsi une idée de la très grande capacité de stockage du système implanté à la F.U.L.. Dans cette plage de variation, la fraction d'alimentation diminue jusqu'à atteindre une relative saturation. Le deuxième rapport traduit le même phénomène.

- 13 Des études internationales et notamment françaises (1) ont montré qu'il y avait intérêt à concevoir un système de stockage saisonnier, dans le sol en place, dont la charge / décharge se ferait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur enterré. Pour diversifier l'expérience en cours à Arlon, on a voulu exploiter également les capacités thermiques du sol dans une zone de déblai de 5 m de profondeur au voisinage du stockage en eau (figure 4, p. 38).
- Un système d'échange est placé à mi-profondeur, constitué de tuyaux en élastomère EPDM répartis en deux nappes. La première comporte des tubes de diamètre intérieur égal à 5,2 mm, la deuxième des serpentins de diamètre 19 mm. Chaque échangeur dispose d'un circuit indépendant depuis une station thermique implantée au sous-sol des laboratoires. Cette expérience est complétée par une zone d'accumulation et de puisage de l'énergie comprise dans le sol entre les cotes - 5 m et - 8 m sous la masse terreuse qu'on vient de décrire. Cette dernière zone comporte un réseau régulier de 42 puits de diamètre 225 mm dans lesquels deux spires d'élastomère souple constituent des échangeurs de chaleur (figure 5, p. 39).
- On a donc superposé au stockage par chaleur sensible dans l'eau une double système de stockage / puisage énergétique en terre, très expérimental. Comme on le verra, on dispose ainsi d'une importante source froide pour des pompes de chaleur, de nature à se substituer au stockage d'eau éventuellement déchargé.

(1) G. VACHAUD, J.Y. AUSSER, *The "soil therm" system for interim seasonal earth storage of solar heat for individual housing*, International Solar Energy Society Meeting, Atlanta, juin 1979.

38

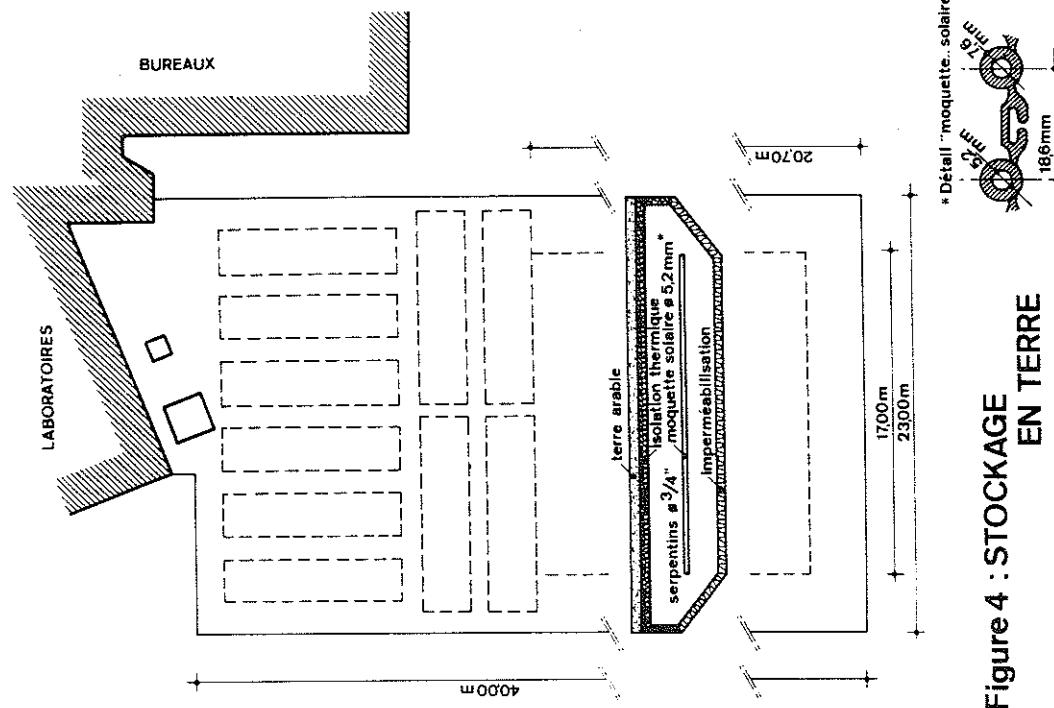


Figure 4 : STOCKAGE EN TERRE

39

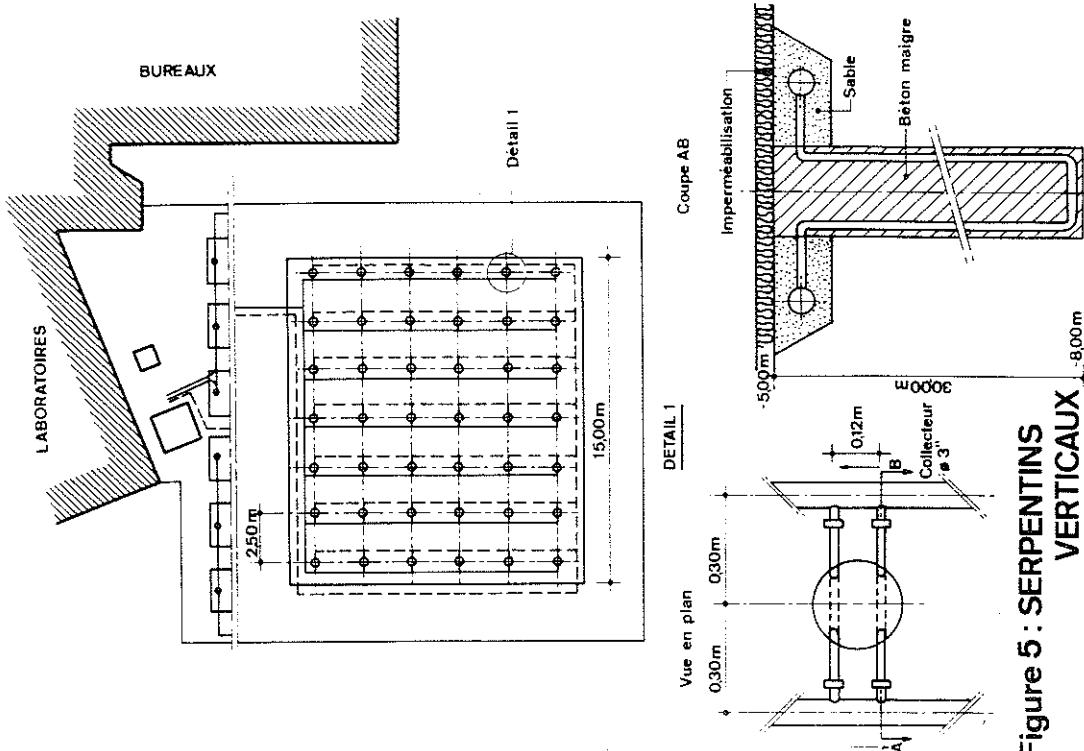


Figure 5 : SERPENTINS VERTICAUX

POMPES DE CHALEUR

14 Les stockages thermiques par chaleur sensible, que ce soit en eau ou en terre, présentent au cours d'une saison des variations de température pouvant être importantes; des gradients thermiques saisonniers de plusieurs dizaines de degrés sont possibles. Dans ces conditions, l'énergie stockée peut devenir rapidement inutilisable pour des applications de chauffage et de conditionnement. La pompe de chaleur¹⁾ est un complément opportun à ces stockages dans lesquels on dispose de beaucoup d'énergie de qualité médiocre. On comprend donc que de nombreux projets de recours à l'énergie solaire et au stockage saisonnier combinent ces techniques et l'utilisation de pompes de chaleur. Le débat est d'ailleurs ouvert, de savoir laquelle des deux solutions techniques est prépondérante (1).

L'optimisation de tels systèmes, tenant compte des préoccupations économiques, n'est pas simple : il s'agit d'établir la configuration idéale de nombreux paramètres : prix et qualité des collecteurs, des pompes de chaleur, des réservoirs de stockage, etc.. Le facteur de performance (COP) de la machine est une donnée essentielle dans ces analyses. Des valeurs inférieures à 3 ne compensent même pas les mauvais rendements de transformation de l'énergie primaire pour des pompes de chaleur à entraînement électrique.

15 Les machines du système de chauffage de la F.U.I. sont doubles. D'une part, une première pompe de chaleur (elle-même dédoublée en deux unités de demi-puissance) assure la valorisation du stockage d'énergie en eau. Le circuit qui alimente son évaporateur est donc raccordé sur les citerne enterrées ou sur les

serpentins verticaux, quand elle fonctionne comme pompe de chaleur : la chaleur provient alors du stockage. Au condenseur, cette chaleur est transférée vers un accumulateur primaire de 100 m³. Quand elle fonctionne comme générateur de froid, l'évaporateur est raccordé sur un ballon de 5 m³ d'eau glacée, tandis que le condenseur, vers lequel on évacue la chaleur, est raccordé soit sur l'accumulateur de 100 m³, soit sur les citerne enterrées, soit sur les serpentins verticaux. Cette pompe assure alors l'entièreté des besoins frigorifiques du bâtiment, l'autre échangeurs de chaleur enterrés dans le sol étant alimentés depuis la toiture énergétique par du fluide caloporteur, cette deuxième pompe est donc du type caloporteur-eau : l'évaporateur est alimenté par des échangeurs en fluide caloporteur et la chaleur est transférée vers l'accumulateur primaire de 100 m³. Cette machine fonctionne donc uniquement en circuit direct.

On a brièvement résumé au tableau 6 les caractéristiques principales des machines (identifiées comme PC₁ et PC₂).

	PC1	PC2
- CONDENSEUR :		
Puissance calorifique	110,5 kW	147,7 kW
Température eau	47 / 52°C	
Débit eau	19 m ³ h ⁻¹	25,4 m ³ h ⁻¹
- ÉVAPORATEUR :		
Puissance calorifique	75,6 kW	97,7 kW
Température eau / caloporteur	9 / 5°C	
Débit	32,5 m ³ h ⁻¹	21 m ³ h ⁻¹
... COMPRESSEUR :		
Puissance absorbée	35 kW	43 kW

TABLEAU 6 : POMPES DE CHALEUR

(1) E. ARANOVITCH, *Bilan des activités de R-D à Ispra*, Journée Scientifique à la F.U.I., 24 juin 1981, voir plus loin p. 67.

RÉGULATION ET AUTOMATISME

16 Tout l'équipement énergétique est sous la tutelle d'un système automatique de gestion qui, à travers de multiples mesures, assure l'automatisme, la régulation, l'optimisation du fonctionnement et la surveillance. Par ailleurs, ce système permet de créer en parallèle un stock de données mises en mémoire à des fins scientifiques. Une unité centrale de gestion à microprocesseur, située dans le sous-sol du bâtiment "laboratoires", exécute en permanence un programme séquentiel qui fait appel à des mesures et signalisations issues de l'ensemble de l'installation et qui agit sur les éléments de commande et de contrôle. Le système agit en permanence comme scrutateur de l'ensemble des points de mesure et génère à la fréquence voulue des "cartes" descriptives de l'état de l'installation. Entretemps, il calcule un certain nombre d'expressions intégrées (ex. : rendements des sous-systèmes). En cas de défaut dans le processeur ou dans un des éléments de l'automatisme, une console de commande manuelle permet l'accès immédiat tant aux diverses mesures qu'aux commandes.

17 L'unité centrale est destinée à contenir les programmes et les données, et à assurer le dialogue avec l'opérateur. Elle utilise un microprocesseur à 16 bits du type LSI - 11, et comprend la liaison avec une interface industrielle, deux télémultiplexeurs, un terminal CRT, une mémoire extérieure sur disques souples. L'unité est équipée d'une mémoire centrale en ferrite de 64 K bytes. L'interface industrielle à base du microprocesseur 8080 est destinée à l'acquisition et à la transmission des données. Sa mémoire comprend 16 k bytes de mémoire ferrite. La périphérie du processeur comprend une ligne de communication asynchrone vers l'unité centrale, des lignes d'entrée et de sortie analogiques et des lignes d'entrée digitales (4 ~ 20 mA, 10 bits),

et des lignes de sortie digitales (24 V DC, 1 A). On y a joint un enregistreur graphique à une courbe à deux vitesses programmables et un enregistreur à 6 courbes à vitesse fixe.

18 De multiples sondes de mesure sont raccordées aux lignes d'entrée de l'interface industrielle. On trouve 4 pyranomètres pour la mesure du rayonnement solaire dans le plan de chaque toiture et dans un plan horizontal ainsi qu'une mesure de température extérieure. On obtient ainsi une mesure des conditions climatiques. Des mesures de température et de débit permettent de suivre le comportement des fluides, eau porteur et eau; de même, on a instrumenté la masse terrestre et certains locaux tests. Tous ces points de mesure sont rassemblés dans le tableau 7.

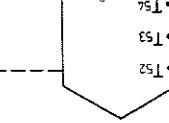
— EAU + CALDORTEUR		
Température	14	
Débit	19	
— MASSE TERRESTRE		
Température	18	
Humidité	2	
Arrosage	1	
— CONDITIONS CLIMATIQUES		
Soleil	4	
Température	1	
— AMBIANCE DES LOCAUX		
Température	6	
Humidité	6	

TABLEAU 7 : MESURES EXPÉRIMENTALES

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

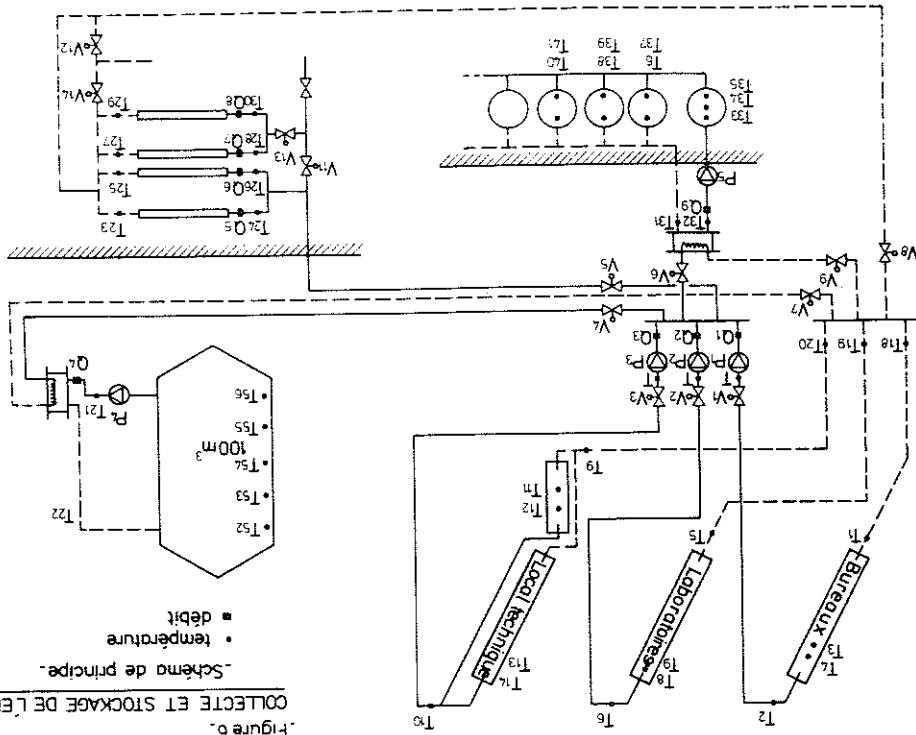
- 19 En cas d'ensoleillement, la priorité est donnée au transfert de l'énergie récoltée en toiture, vers l'accumulateur primaire de 100 m³, par l'intermédiaire d'un premier échangeur de chaleur du type caloporeur-eau. Cette capacité de stockage une fois saturée, le transfert se fait simultanément vers les citerne enterrées, grâce à un deuxième échangeur, et vers la masse de terre, par circulation directe (figure 6, p. 45).
- Par ailleurs, les pompes de chaleur peuvent contribuer à la satisfaction des besoins calorifiques ou frigorifiques.
- La première (PC₁, elle-même dédoublée) fonctionne en cycle direct pour produire une chaleur utile au condenseur ou en direct pour fournir de l'eau glacée à l'évaporateur.
- Dans ce dernier cas, l'inversion se fait par permutation des circuits raccordés aux évaporateurs et aux condenseurs au moyen d'une combinaison by-pass / vannes d'isolation (figure 7, p. 46).
- Dans le cas de la génération d'eau chaude au condenseur, ce dernier alimente systématiquement l'accumulateur primaire de 100 m³. Toutefois, la source froide raccordée à l'évaporateur peut être constituée soit de la première des dix citerne enterrées, soit des neuf autres, soit des serpentins verticaux dans les puits creusés dans le sous-sol. Par contre, cette première pompe de chaleur peut également fournir de l'eau glacée à l'évaporateur, vers un ballon d'eau glacée de 5 m³. La source chaude est alors, par ordre de priorité, soit l'accumulateur primaire de 100 m³, soit l'ensemble des neuf citerne enterrées de 450 m³, soit les deux types de serpentins d'échange enterrés, ou même l'atmosphère. La deuxième pompe de chaleur (PC₂) assure le transfert d'énergie des serpentins enterrés vers l'accumulateur primaire de 100 m³, en cycle direct exclusivement (figure 8, p. 47).

COLLECTE ET STOCKAGE DE L'ENERGIE SOLAIRE

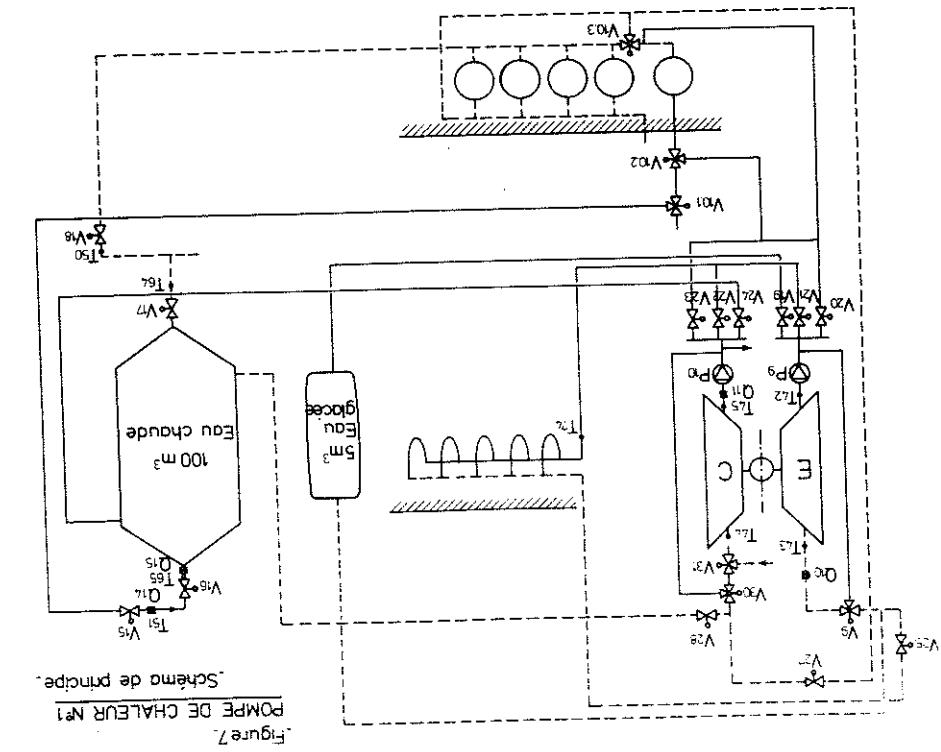


■ débit
■ température
■ Schéma de principe

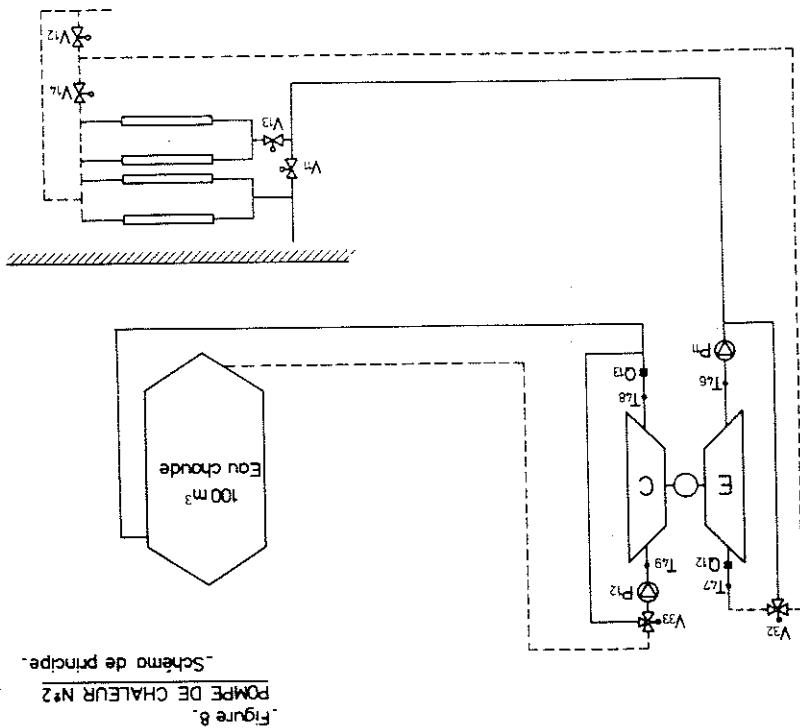
Figure 6.



46



47



Toutes les configurations ainsi décrites ne sont cependant pas simultanées. Il s'agit donc d'introduire dans le processus de gestion du système les priorités et les exclusivités adéquates, qui évitent l'usage irrational de toutes les possibilités physiques.

► L'EXPÉRIENCE SCIENTIFIQUE ET LES ASPECTS ÉCONOMIQUES

20 En aval de l'accumulateur primaire de 100 m³, l'énergie est distribuée dans le bâtiment à partir d'un ballon intermédiaire de 3 m³ au sein duquel s'opère éventuellement l'appoint électrique (figure 9). Enfin, le système de conditionnement comprend une récupération calorifique sur l'air extrait des hottes des laboratoires. La distribution de chaleur se fait par des ventilateurs alimentés en eau à basse température (35°C).

21 Des travaux internationaux récents dans le domaine du stockage saisonnier de l'énergie solaire ont montré la difficulté d'extraire des expériences en cours une hiérarchie indiscutable entre les diverses technologies actuellement mises en oeuvre. Toutefois, les procédés ayant recours à l'utilisation de la chaleur sensible semblent offrir une capacité thermique réelle supérieure (1). Les aspects économiques sont cependant moins clairs. De nombreux obstacles non techniques subsistent, en particulier la lourdeur des investissements. Parmi les chiffres cités (2), on retiendra l'exigence de prix de revient inférieur à 2 000 F.B. / m³ pour l'infrastructure de stockage en eau, et de l'ordre de 3.0 F.B. / MJ pour des capacités de la gamme $10^5 - 10^6 \text{ m}^3$. En particulier, on évoque des coûts d'isolation thermique atteignant le tiers du coût des réservoirs.

L'objectif primordial s'avère d'abord être la définition d'une méthodologie d'évaluation des expériences, qui tiendrait compte de tous les aspects scientifiques mais aussi des obstacles non techniques et spécialement économiques. Singulièrement, des critères de fiabilité et de durabilité des systèmes doivent être inclus dans les analyses; pour les collecteurs solaires, on a vu dans un passé récent combien de déboires étaient apparus lors de l'examen des rendements sur une base saisonnière. Il fallait donc que l'expérience entreprise à la R.U.L., qui s'avère être un des projets les plus originaux ayant été menés à terme, puisse contribuer à la définition d'une telle méthodologie et à la mesure des performances réelles. L'équipement météorologique élaboré qui a été implanté pour la gestion du système va le permettre, grâce aux multiples sondes réparties dans l'ensemble du bâtiment (figures 6 à 8 ci-avant).

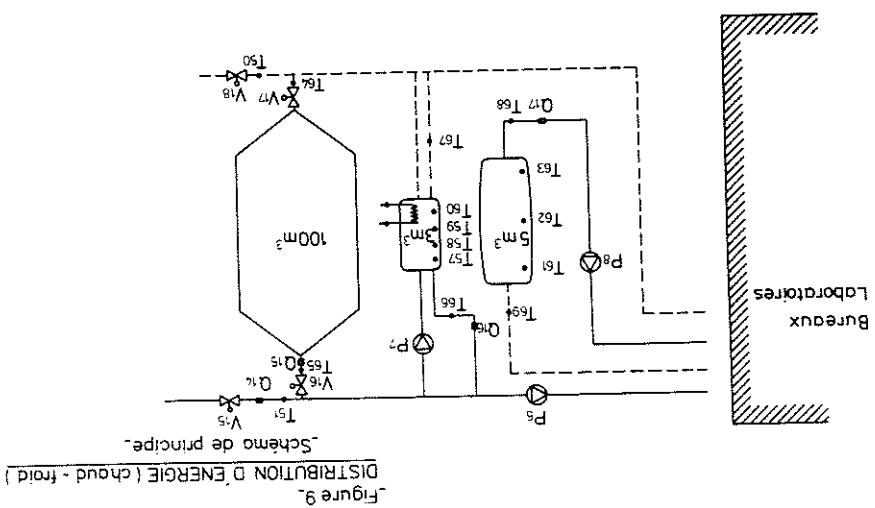
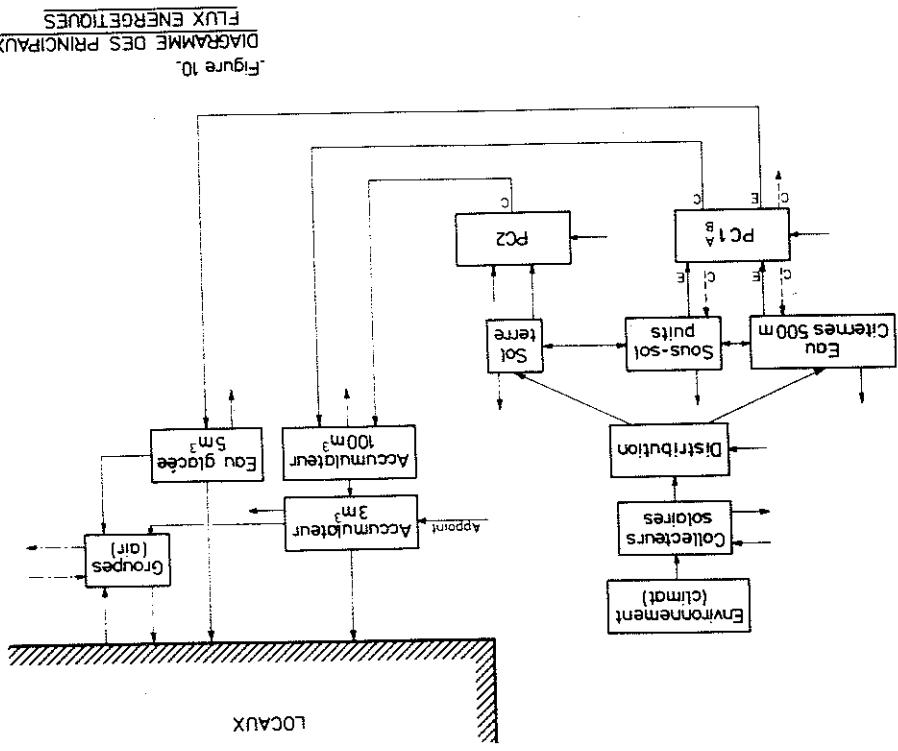


Figure 9. DISTRIBUTION D'ENERGIE (chaud-froid)

- (1) C. DEN OUDEN, *Thermal storage of solar energy*, Proceedings of the international TN0 symposium held in Amsterdam, 5-6 November 1980, Martinus Nijhoff Publishers, Leyden, 1981.
- (2) E. ARANOVITCH, op. cit. p. 40.

► LA GUIDANCE SCIENTIFIQUE

22 L'important volume de données mis en mémoire par le système automatique de gestion du chauffage est utilisé à des fins scientifiques notamment dans le cadre du programme national de R-D dans le domaine de l'énergie. On en déduira les performances thermiques des principaux sous-systèmes de l'installation et leurs interactions (figure 10).



Parmi les objectifs de la guidance, on retiendra (1) :

- Mesure des quantités d'énergie conventionnelle (fuel et / ou électricité) économisée.
- Mesure de la fraction de l'énergie utile au chauffage fournie par le réseau des collecteurs, les stockages en terre, l'énergie électrique d'appoint direct et l'énergie électrique d'appoint d'entraînement des pompes à chaleur (bilan pour des périodes mensuelles, saisonnières et annuelles), et comparaison avec les prévisions des modèles.
- Mesure des performances thermiques du système, des principaux sous-systèmes et composants et de leur interaction thermique. Bilan et rendement instantané, journalier, mensuel, saisonnier et annuel.
- Spécialement, évaluation de l'efficacité du système solaire pour convertir les radiations solaires en énergie thermique utile, pour des périodes mensuelles, saisonnières et annuelles.
- Enregistrement des paramètres climatiques locaux qui peuvent affecter les performances du système pendant la durée de vie de la démonstration.
- Mesure de la charge thermique effectivement utilisée pour le chauffage et le rafraîchissement des locaux, et comparaison avec les prédictions des différents modèles de simulation.
- Détermination du bilan économique du fonctionnement et généralisation à des projets similaires.

(1) E. MASSIN, *Instrumentation des bâtiments de la P.U.L.*, Service de programmation de la Politique Scientifique, Bruxelles, Contrat E/VII/4.1., 22 février 1980.

23 Comme on l'a vu, le stockage énergétique complexe mis en œuvre à la F.U.L. requiert une guidance propre afin d'en extraire des résultats significatifs utiles à la conception de systèmes économiquement et techniquement fiables. Aussi, une étude particulière va être consacrée à ce stockage saisonnier de grande dimension de l'énergie solaire par chaleur sensible, dans le cadre du programme national de R-D, de manière à atteindre quelques objectifs jugés importants :

- "Monitoring" du cycle charge - décharge, sur plusieurs cycles annuels, du stockage mixte terre - eau et comparaison à la modélisation des sous-systèmes de stockage mis en jeu : énergie injectée, énergie dissipée, énergie récupérée, distribution thermique au sein des volumes de stockage, évolution des caractéristiques d'échange.
- Optimisation thermique du concept : volumes respectifs, isolation, températures de fonctionnement, régimes de fluides, stratification, taux de récupération, utilisation des pompes de chaleur.
- Optimisation économique du concept : charge de l'investissement, évaluation économique du coût de l'énergie récupérée, amélioration des techniques de réalisation : matériaux, génie civil, volumes, pompes de chaleur.

► CONCLUSIONS

24 L'outil expérimental mis en place à l'occasion de la construction des nouveaux bâtiments de la F.U.L. comporte à de nombreux égards des solutions techniques innovantes dont les performances et la fiabilité doivent encore être démontrées.

Le système de métrologie mis en place permet d'assurer la guidance indispensable.

Les résultats expérimentaux vont contribuer à l'optimisation des stockages énergétiques de grande ampleur qui confirmeront sous notre latitude la faisabilité d'un système solaire pour le chauffage de bâtiments publics.

L'auteur remercie MM. BARBASON, BREVERS, GODART et VIGNERON, Architectes associés, qui ont créé les nouveaux bâtiments de la F.U.L., et M. LATRAN, qui a conçu le système énergétique expérimental.

