T H E S E

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir

le TITRE de DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE EN ENERGETIQUE

par

Madame CLAUDE AUBERT-DASSE

COMPARAISON EXPERIMENTALE ET THEORIQUE D'UN SYSTEME DE STOCKAGE A EAU ET D'UN SYSTEME DE STOCKAGE PAR MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE SUR L'IMMEUBLE SOLAIRE EXPERIMENTAL DE BOURGOIN-JALLIEU (ISERE)

-+-+-+-
+-+
+

Soutenue le 19 Juin 1981 devant la Commission d'Examen

J U R Y

Monsieur	JOUBERT J.C.	PRESIDENT
Mademoiselle	BENARD C.	EXAMINATEURS
Messieurs	CORDIER A.	
	KUHN G.	
	SCHNEIDER M.	

TABLE DES MATIERES

Pages

CHAPITRE I : INTRODUCTION..... 1

Première partie : ETUDE ET MISE EN PLACE DU STOCKAGE A MCP

CHAPITRE II : DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE 4

II.1. Présentation de l'immeuble..... 4

II.2. Choix du produit..... 6

II.3. Conception de l'échangeur eau-MCP..... 7

II.3.1. Quantité de matériau à utiliser..... 8

II.3.2. Optimisation de l'épaisseur de matériau..... 8

II.3.3. Choix du contenant..... 13

II.3.4. Conception de la structure porteuse..... 15

II.4. Réalisation et instrumentation..... 17

II.5. Capacité énergétique de la cuve..... 17

Deuxième partie : THERMOCINETIQUE DU MCP

CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE 20

III.1. Position du problème..... 20

III.2. Description du modèle prévisionnel..... 21

III.3. Résultats..... 25

CHAPITRE IV : CHARGE ET DECHARGE DU STOCKAGE 27

IV.1. Description de l'expérience..... 27

IV.2. Etude des cuves pendant la charge seule..... 28

IV.2.1. Comparaison des températures d'eau dans chacune des cuves..... 28

IV.2.2. Comportement du PEG aux 4 niveaux de mesure..... 28

IV.2.3. Comportement du PEG dans 3 plans verticaux..... 29

IV.2.4. Comportement du PEG dans 3 plans horizontaux..... 31

IV.2.5. Récapitulatif sur le comportement des 12 thermo-couples..... 32

IV.3. Etude des cuves pendant la décharge seule..... 34

IV.3.1. Comparaison des températures d'eau de chacune des cuves..... 34

IV.3.2. Etude du PEG dans chaque plan vertical..... 36
IV.4. Recalage du modèle..... 36
IV.5. Conclusions..... 38

CHAPITRE V : MODELE ENTHALPIQUE 39
V.1. Description du modèle..... 39
V.2. Résultats..... 43

Troisième partie : STOCKAGE A CHANGEMENT DE PHASE ET SYSTEME SOLAIRE

CHAPITRE VI : COMPARAISON DES 2 SYSTEMES DE STOCKAGE SUR UN AN 45
VI.1. Bilans mensuels..... 45
VI.1.1. Discussion des mesures..... 45
VI.1.2. Analyse des résultats..... 48
VI.2. Etude de trois périodes caractéristiques..... 50

CHAPITRE VII : CONCLUSIONS..... 53
BIBLIOGRAPHIE 55
ANNEXES 58

- AVANT PROPOS -

Cette étude a été effectuée au Centre de Recherches sur les Très Basses Températures (C.R.T.B.T.) du CNRS de Grenoble.

Je remercie vivement Robert TOURNIER, Directeur du CRTBT et toute l'équipe des Basses Températures pour leur accueil sympathique et toute l'aide qu'ils m'ont apportée.

Gérard KUHN, Professeur sans chaire à l'USMG a assuré la direction de cette recherche. Je lui en suis profondément reconnaissante.

Je remercie tous les membres, provisoires ou permanents de l'équipe solaire, qui ont tous d'une façon ou d'une autre contribué à ce travail, et plus particulièrement :

Paul PATAUD, Ingénieur responsable de l'expérimentation à Bourgoin, qui a donc effectué les modifications nécessaires aux expériences avec le MCP, et m'a d'autre part consacré de longues heures pour m'expliquer le maniement du terminal de l'ordinateur ;

Claude MEYRIER qui, au cours de son stage de 1/2 C4 de maîtrise, m'a apporté une aide matérielle et morale précieuse pour le dépouillement de certaines périodes à problèmes.

J'ai trouvé également auprès des membres du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Saint-Martin-d'Hères une aide déterminante et une ambiance amicale. C'est le CSTB qui a déterminé le choix du matériau utilisé. J'ai toujours trouvé un appui sérieux auprès de Messieurs EURIN, CHEVALLIER, SALLEE et BALME. C'est grâce à leur collaboration massive que la mise en place du matériel a pu être réalisée.

Je sais gré à Michel LAURENT de l'INSA de Lyon d'avoir consacré du temps à mesurer la chaleur massique du PEG, et à l'équipe TOTAL de Honfleur d'avoir modifié la fabrication habituelle de leurs bidons pour les besoins de l'expérience.

C'est grâce à Alain CORDIER, de l'Université Paul Sabatier de Toulouse que le modèle numérique présenté dans le chapitre V a pu voir le jour et à Michel SCHNEIDER, du laboratoire d'Ecothermie Solaire de Nice où la chliarolithe a été mise au point, que l'expérimentation avec un sel comme MCP a pu être réalisée. Je les remercie d'avoir accepté de participer à ce jury, ainsi que Christine BENARD, de l'Ecole Supérieure d'Electricité de Gif-sur-Yvette.

Je remercie également le Professeur J.C. JOUBERT, responsable du 3ème cycle d'Energétique à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, d'avoir bien voulu présider ce jury.

Ma gratitude la plus profonde va a toutes les personnes qui ont réalisé la prouesse technique de faire en sorte que cet ouvrage soit achevé dans les délais, notamment Jean-Louis THOLENCE qui m'a aidée sous diverses formes et plus particulièrement au niveau des dessins, ainsi que Hervé REYNAUD, et Mesdames DEVILLERS, GODFRIN, MAZET et Mademoiselle MAHIEUX qui ont dactylographié les différentes parties de ce mémoire.

Je tiens enfin à remercier mon époux pour la patience et la compréhension dont il a dû faire preuve tout au long de ce travail.

N O M E N C L A T U R E

A	: Section de passage de l'eau entre 2 plaques (m^2)
Bi	: Nombre de Biot : $h\delta/k_s$
b_s	: Effusivité : $\sqrt{kC_p\rho}$ ($J/m^2°C$)
C_p	: Chaleur spécifique ($J/kg°C$)
d	: diamètre de la cuve (m)
D_H	: diamètre hydraulique de conduite rectangulaire (m)
Fo	: Nombre de Fourier : $\kappa\tau/\delta^2$
g	: Accélération de la pesanteur (m/s^2)
G	: Débit (ℓ/s)
Gr	: Nombre de Grashof : $\rho^2 g\lambda\theta D^3/\mu$
h	: Coefficient d'échanges convectifs ($W/m^2°C$)
k	: Conductivité ($W/m°C$)
ℓ	: largeur d'une plaque (m)
L	: Longueur de la cuve (m)
L_f	: Chaleur latente de fusion (J/kg)
m	: Masse (kg)
$\mathcal{N}u$	: Nombre de Nusselt : hD_H/k
P	: Périmètre mouillé d'une conduite : $4 \times A/D_H$ (m)
Pr	: Nombre de Prandtl : $\mu C_p/k$
$\mathcal{R}e$	: Nombre de Reynolds : $v.D_H/\mu$
$s(t)$	: Abscisse du front de fusion (m)
T	: Température (°C)
v	: Vitesse d'écoulement de l'eau (m/s)
V	: Volume (m^3)
β	: Paramètre adimensionnel : $\delta\sqrt{\pi/\kappa\tau} = \sqrt{\pi/F_o}$
γ	: Paramètre adimensionnel : $Bi/\beta = h/b_s \sqrt{\tau/\pi}$
δ	: Demi-épaisseur de plaque (m)
κ	: Diffusivité du MCP : $k/\rho C_p$
λ	: Coefficient de dilatation thermique (K^{-1})
μ	: Viscosité dynamique (Poise)

ν : Viscosité cinématique

ρ : Densité (kg/m^3)

θ : Différence de température eau-MCP (°C)

τ : Période de stockage (ou déstockage) (s)

Indices :

b : Bidon

e : Eau

f : Fusion

ℓ : MCP liquide

p : Platelage (= structure porteuse)

s : MCP solide

CHAPITRE I - INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment pour le chauffage et la fourniture des besoins en eau chaude sanitaire est toujours associée à un système de stockage dont l'optimisation est un facteur essentiel.

Les solutions utilisées actuellement dans l'habitat sont le plus souvent un stockage par chaleur sensible, soit par échauffement d'un fluide, généralement de l'eau, soit par échauffement d'un lit de roches.

Ces techniques présentent deux inconvénients majeurs :

- leur volume de stockage est important,
- la température dans les capteurs peut atteindre des valeurs élevées et leur rendement s'en trouve abaissé.

Le stockage par matériau à changement de phase (MCP) paraît quelquefois être une bonne solution puisque la chaleur latente de fusion du MCP est généralement plus élevée que la chaleur sensible sur les plages de températures utiles dans l'habitat, et qu'il est donc permis de supposer que le volume de stockage s'en trouvera diminué. D'autre part, si on choisit un MCP à température de fusion basse (autour de 30°C), le rendement des capteurs sera bon.

Morrison et Abdel-Khalik (1) ont montré qu'un système de stockage utilisant du décahydrate de sulfate de sodium (Na_2SO_4, 10 H_2O), dont la température de fusion est 52°C, occupe un volume de stockage égal à la moitié de celui d'un système de stockage à eau de même performance (fraction solaire des besoins) alors qu'un système de stockage utilisant la cire de paraffine P 112, de température de fusion 46,7°C requiert pour une performance comparable un volume de stockage légèrement plus grand que celui d'un système de stockage à eau.

Depuis les travaux de Stefan (2), de très nombreuses études théoriques ont été faites, en particulier depuis une quinzaine d'années, sur le comportement thermique des MCP lors de la fusion. Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour traiter les problèmes de transferts thermiques dans des

géométries plus ou moins simples, en prenant en compte la conduction bien sûr, mais aussi la convection dans la phase liquide, et des conditions aux limites variables. Néanmoins, aucune solution analytique n'est généralisable. Des expérimentations ont été faites en laboratoires sur quelques kilogrammes de MCP pour valider ces modèles. De nombreux colloques en France (3) et à l'étranger (4,5) font régulièrement le point de l'avancement de ces recherches.

Les expériences en conditions réelles dans l'habitat sont très peu nombreuses.

En France, quelques maisons ont été équipées de chliarolithe ($CaCl_2,6H_2O$) par l'équipe d'Ecothermie Solaire du CNRS-Nice, avec toujours un échangeur à air. Par exemple une maison de Grimaud (Alpes Maritimes) (6, 7) a un stockage de 3,2 tonnes de chliarolithe contenues dans des tubes de PVC placés dans une serre depuis Janvier 1979. Le chlorure de calcium, préparé par Dow Chemical aux USA, a été introduit dans des parois verticales de maisons. En Allemagne, une maison expérimentale de Brown Bovery à Heidelberg (R.F.A.) utilise un stockage de 2 m^3 de paraffine depuis 1976. Par ailleurs, un batiment d'élevage de poussins contenant dans sa toiture 84 kg de paraffine fondant autour de 59°C, a été réalisé au Pérou sous le contrôle de l'équipe du C.N.R.S. LSS de Gif sur Yvette (8).

L'expérimentation sur la comparaison du stockage par eau et du stockage par MCP sur l'immeuble de Bourgoin est menée en commun par 3 équipes :

- L'équipe solaire du CNRS-CRTBT de Grenoble, sous la direction de G. KUHN

- La Division Physique des Matériaux du CSTB de Grenoble, sous la direction de P. EURIN

- Le Laboratoire d'Ecothermie Solaire du CNRS de Nice, sous la direction de M. SCHNEIDER.

Le but de cette étude est de comparer sur un immeuble solaire réel et avec un même équipement, les qualités respectives d'un système de stockage à eau et d'un système de stockage à changement de phase. L'immeuble solaire de Bourgoin, constitué de deux demi-immeubles symétriques, était à priori un outil expérimental propice.

Notre étude comporte trois parties :

1ère partie : Conception de l'expérimentation

- choix du matériau de stockage
- conception de l'échangeur
- réalisation de l'ensemble échangeur - cuve de stockage et acquisition du matériel de mesure complémentaire
- mise en place.

2ème partie : Simulation des processus de transferts thermiques par voie informatique, puis recalage du modèle par rapport aux phénomènes réels.

3ème partie : Analyse des résultats de l'expérience. Etude de l'influence de certains paramètres sur le rendement du système.

P R E M I E R E P A R T I E

ETUDE ET MISE EN PLACE DU STOCKAGE A MCP

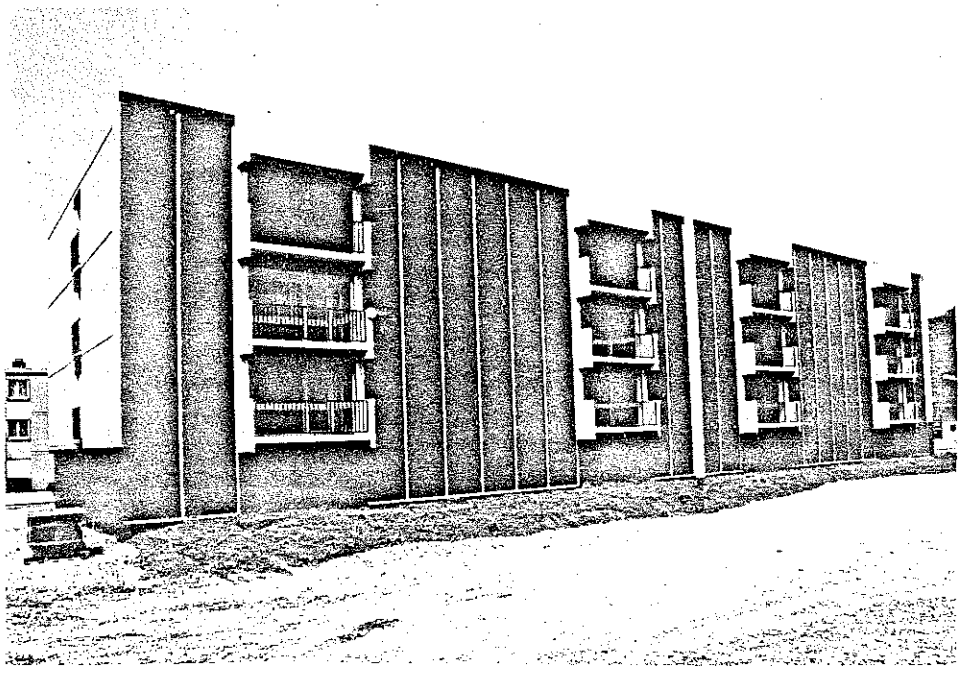
++++++++++++

CHAPITRE II - DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

II.1 PRESENTATION DE L'IMMEUBLE

L'immeuble (9,10) est situé à BOURGOIN-JALLIEU(Isère) dans la ZAC de Champfleuri. Conçu précisément dans un but expérimental, cet immeuble a la particularité d'être composé de 2 demi-immeubles identiques et thermiquement indépendants, l'un pouvant donc servir de témoin pendant que l'autre est soumis à diverses expériences. Chaque demi-immeuble comporte 6 logements sur 3 niveaux.

Dans toute la suite du rapport, les mesures données se rapporteront à un seul demi-immeuble à la fois.



Façade Sud de l'immeuble

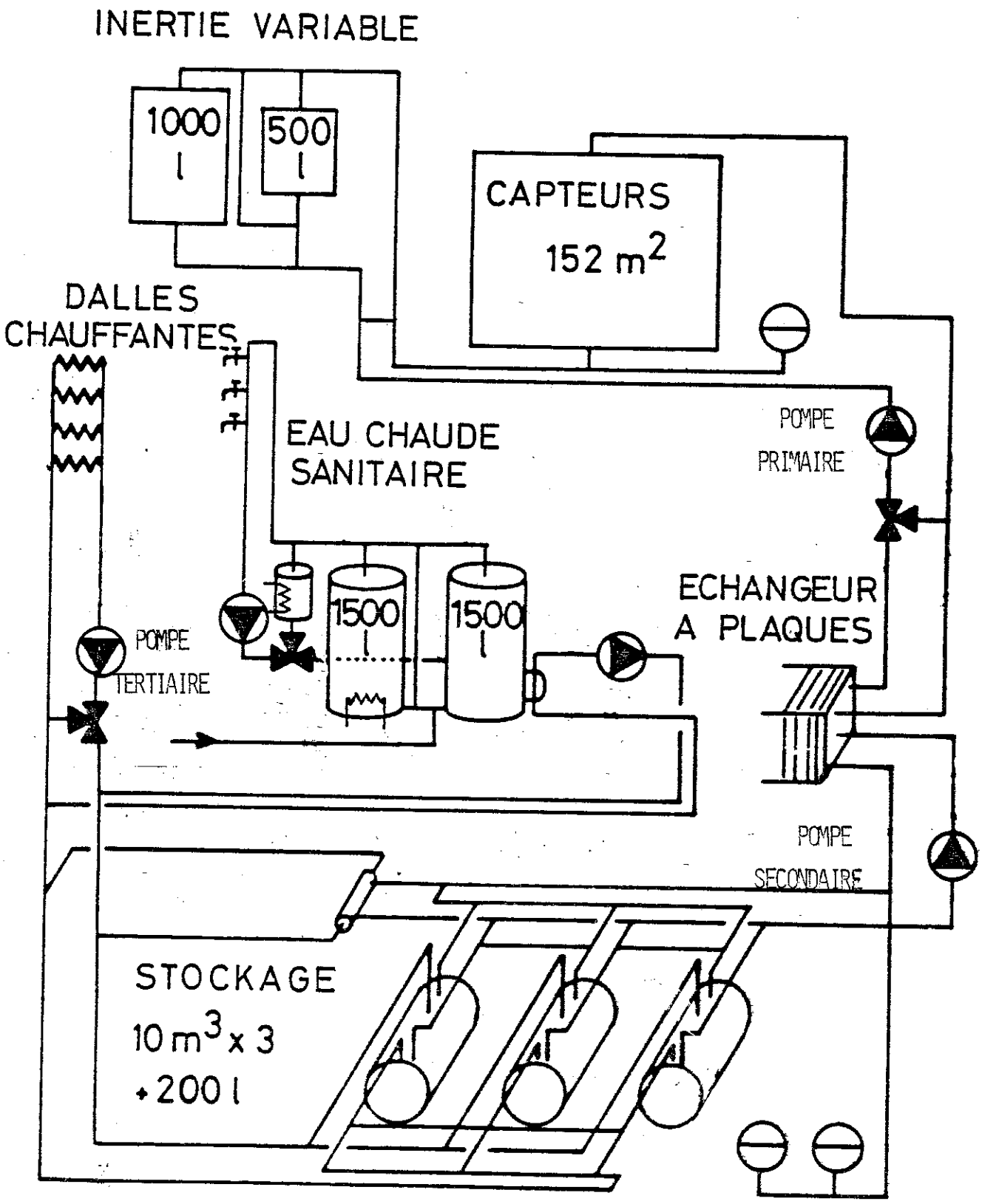


Figure II.1

Schéma de principe d'un demi-immeuble

L'énergie est absorbée par 152,5 m^2 de capteurs à eau glycolée classiques, suspendus verticalement en façade sud, dont le fonctionnement est commandé par une cellule photoélectrique placée en façade Nord. Cette énergie est ensuite transférée par l'intermédiaire d'un échangeur à plaques dans une, deux ou trois cuves de stockage de 10 m^3 chacune (fig. II.1). L'ouverture de cet échangeur est commandée par 2 sondes de régulation lorsque la différence de température entre les capteurs et le stockage atteint 5°C. L'eau chaude sanitaire (ECS) est préchauffée également par énergie solaire, le complément étant fourni par ballon électrique. Chaque logement dispose de convecteurs électriques pour le chauffage d'appoint.

La centrale d'acquisition de données permet de mesurer 64 paramètres toutes les 6 mn. Plus particulièrement sont mesurées les données suivantes :

* Données météorologiques :
  - Température extérieure, degré hygrométrique, vent (intensité et direction intégrées sur 6 mn en terrasse, et intensité seulement dans le plan des capteurs).
  - Ensoleillement global et diffus dans un plan horizonzal
  - Ensoleillement global dans le plan des capteurs (Les 3 mesures d'irradiation sont intégrées sur 6 mn).
* Bilans thermiques au niveau de la captation, du stockage et de l'utilisation (7 compteurs de calories).

* Températures en divers points de l'immeuble et des cuves.

Pour notre étude, les données utiles sont mesurées parallèlement sur une cuve à eau dans le 1/2 immeuble Ouest et la cuve contenant le MCP dans le 1/2 immeuble Est.

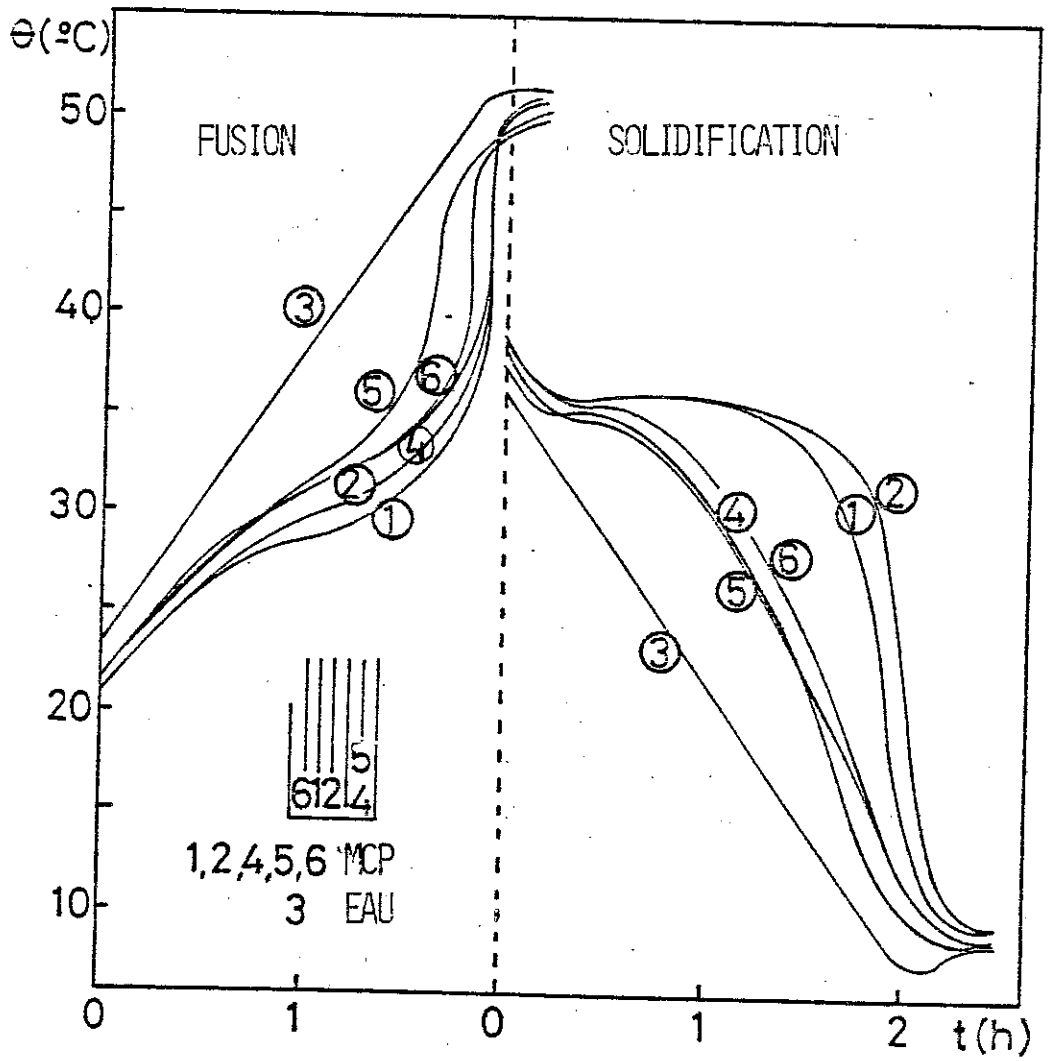


FIGURE II.2

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU PEG EN FONCTION DU TEMPS

II.2 CHOIX DU PRODUIT

Deux facteurs principaux interviennent pour le choix du produit :

- La température de fusion, qui doit être assez basse pour obtenir un bon rendement de capteurs, tout en étant compatible avec un dispositif de chauffage.

- La chaleur latente qui doit être la plus élevée possible pour diminuer le volume de stockage.

La Division "Physique des Matériaux" du CSTB à Grenoble a testé toute une série de produits, orientant d'abord ses recherches vers les sels hydratés. Toutefois, le problème de la surfusion et de l'instabilité de ces sels a fait préférer un produit organique, le polyethylène glycol 1000 (PEG 1000) dont les caractéristiques mesurées par le CSTB sont les suivantes :

- température de fusion	T_f = 35 - 36°C
- chaleur latente de fusion	L_f = 146,3 kJ/kg
- densité du MCP solide	ρ_s = 1200 kg/m^3
- densité du MCP liquide	ρ_ℓ = 1120 kg/m^3
- chaleur massique moyenne du MCP solide	$\overline{Cp_s}$ = 2,78 kJ/kg°C
- chaleur massique moyenne du MCP liquide	$\overline{Cp_\ell}$ = 3,28 kJ/kg°C
- conductivité thermique	k = 0,17 W/m°C

La figure II.2 montre l'évolution de la température du produit en fonction du temps, pour des thermocouples placés à différentes distances de la paroi sur un échantillon de 6 cm de diamètre et une montée en température de l'eau d'environ 13°C par heure. Nous observons nettement un palier entre 35 et 36°C lors du refroidissement de l'échantillon.

Les valeurs mesurées par le CSTB pour la chaleur spécifique sont des valeurs moyennes (11).

De fait, ce produit n'est pas vraiment idéal pour notre stockage

car sa chaleur latente de fusion est assez faible, comme celle de la plupart des produits organiques et sa température de fusion est un peu élevée pour l'installation telle qu'elle a été conçue sur le site de Bourgoin. Ce produit est utilisé essentiellement dans l'industrie pharmaceutique pour la fabrication des suppositoires et son prix (5 F/kg) n'en fait pas un produit intéressant pour une exploitation thermique. Cependant, pour notre expérience, ce produit présentait l'avantage d'être disponible immédiatement.

Par ailleurs, le groupe d'Ecothermie Solaire de Nice a mis au point un sel : la chliarolithe, chlorure de calcium hexahydraté stabilisé par des roches fossiles broyées. Ce sel est supérieur au PEG par ses propriétés thermophysiques et son faible coût, étant donné qu'il s'agit d'un déchet rejeté par les industries de fabrication de carbonate de soude et que le coût se réduit à celui du transport. Ce sel présente néanmoins un inconvénient non négligeable : il est assez corrosif et une fuite de ce sel dans le circuit tertiaire ou secondaire entraînerait de sérieux dommages de la tuyauterie.

Caractéristiques de la chliarolithe :

- température de fusion	T_f = 28,8°C
- chaleur latente de fusion	L_f = 135 kJ/kg
- densité du MCP solidé	ρ_s = 1600 kg/m^3
- densité du MCP liquide	ρ_ℓ = 1500 kg/m^3
- chaleur massique du MCP solide	Cp_s = 1,3 KJ/kg°C
- chaleur massique du MCP liquide	Cp_ℓ = 2,1 KJ/kg°C
- conductivité thermique	k = 0.6 W/m°C

II. 3 CONCEPTION DE L'ECHANGEUR EAU-MCP

Pour les commodités de la simulation, nous avons choisi de réaliser un échangeur plan, cet échangeur eau-MCP devant être réalisé dans une des cuves d'un 1/2 immeuble jusqu'à présent remplie de 10 m^3 d'eau, seule solution possible dans le système préexistant.

II.3.1 Quantité de matériau à utiliser

Nous avons pris l'option de stocker une énergie Q_s d'environ 10^6 kJ, c'est-à-dire de même ordre de grandeur que l'énergie libérée par une cuve de 10 m^3 d'eau se refroidissant d'une vingtaine de degrés (24°). Le volume V_s à mettre en oeuvre doit donc vérifier l'équation :

$$\rho_s V_s L_f = Q_s \qquad \text{(II.1)}$$

d'où

$$V_s = \frac{Q_s}{\rho_s L_f} \qquad \text{(II.2)}$$

* pour le PEG, $V_s = \frac{10^6}{1200 \times 146,3}$ soit environ 5,6 m^3

* pour la chliarolithe, $V_s = \frac{10^6}{1600 \times 134}$ soit environ 4,7 m^3

Nous pouvons constater que la chliarolithe, pour une énergie stockée égale, permet de gagner 19 % de volume sur le stockage, par rapport au PEG.

II.3.2 Optimisation de l'épaisseur d'une plaque de MCP

J.P. Bardon et al (12,13)ont démontré qu'il existe une dimension optimale du stockage, pour récupérer le maximum d'énergie à la fin d'un cycle de stockage et qui dépend essentiellement des propriétés thermo-physiques du MCP et de la période de stockage. D'après cette étude, deux paramètres adimensionnels β et γ jouent un rôle prépondérant :

$$\beta = \delta\sqrt{\frac{\pi}{\kappa\tau}} = \sqrt{\frac{\pi}{Fo}} \qquad \text{(II.3)}$$

$$\text{et} \quad \gamma = \frac{Bi}{\beta} = \frac{h}{b_s}\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \qquad \text{(II.4)}$$

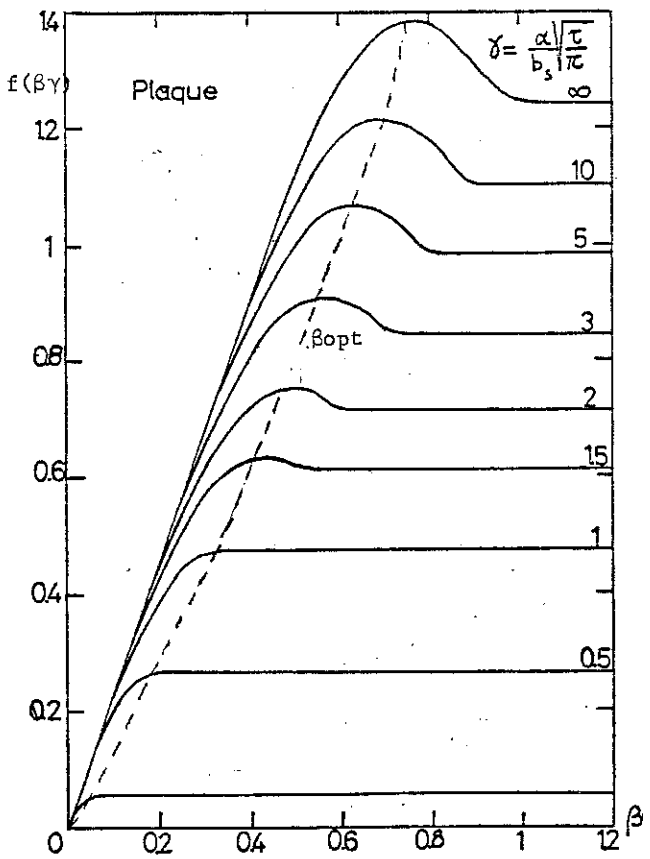


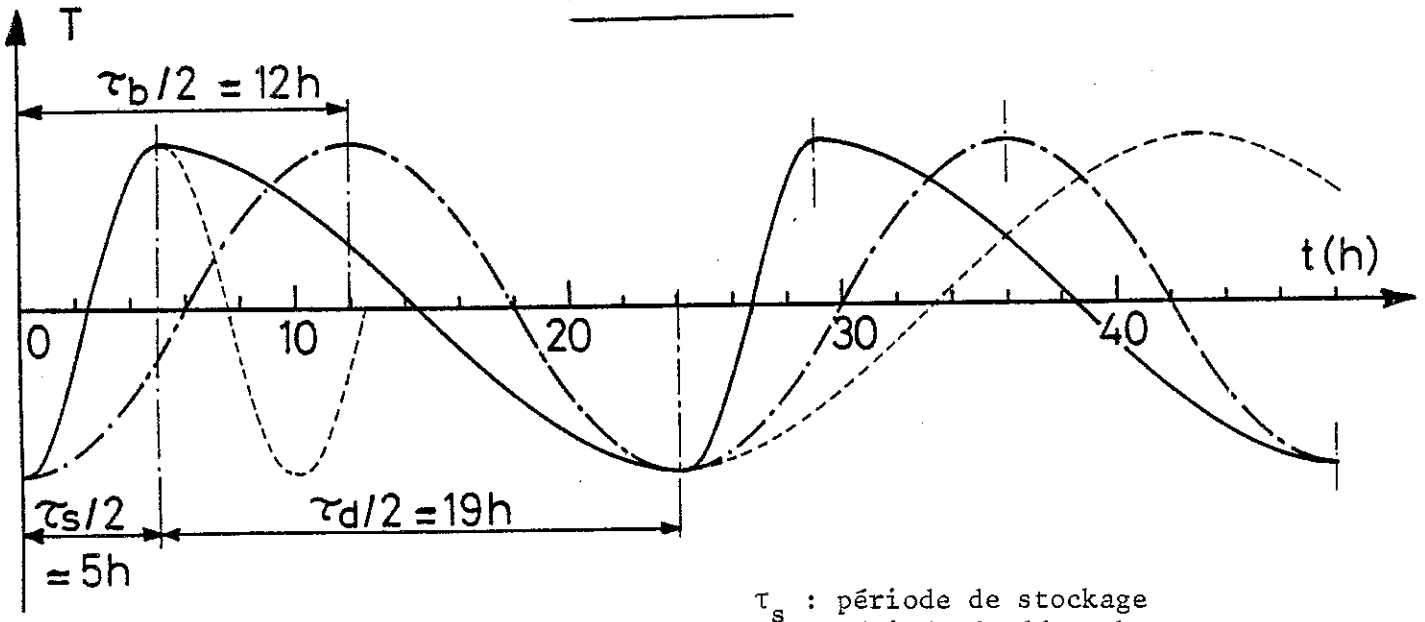
FIGURE II.3

VARIATION DE LA FONCTION $F(\beta,\gamma)$

(PROPORTIONNELLE AU TAUX

D'UTILISATION) EN FONCTION DE β

FIGURE II.4



τ_s : période de stockage
τ_d : période de déstockage

stockage et déstockage étudiés par J.P. BARDON ($\tau_s = \tau_d = 24$ h)

stockage et déstockage relatifs à Bourgoin ($\tau_s = 10$ h et $\tau_d = 38$ h)

où K = diffusivité du MCP : $\frac{k_s}{\rho_s Cp_s}$ (m^2/s)

τ = période solaire (s)

δ = 1/2 épaisseur de la plaque (m)

Fo = nombre de Fourier : $\frac{K\tau}{\delta^2}$

Bi = nombre de Biot : $\frac{h\delta}{k_s}$

h = coefficient d'échange convectif (W/m^2K)

b_s = effusivité : $\sqrt{k_s\ Cp_s\ \rho_s}$ (J/m^2K).

La figure II.3 montre la variation d'énergie récupérée en fonction de β, pour diverses valeurs de γ. Ces courbes présentent un maximum pour une certaine valeur de $\beta = \beta_{opt}$ qui nous permet de déduire l'épaisseur optimale δ_{opt} de la plaque de MCP : $\delta_{opt} = \beta_{opt}\sqrt{\frac{Fo}{\pi}}$

Bardon effectue ses calculs avec un $\mathcal{R}e$ constant et des périodes (τ_b) identiques pour le stockage (τ_s) et le déstockage (τ_d). Dans le cas de Bourgoin, nous devons distinguer 3 situations : fig. II.4.

- Régime de charge , l'eau étant débitée par une pompe de 15 m^3/h pendant 5 h, d'où τ_s = 10 h
- Régime de décharge, par pompe de 5 m^3/h pendant 19 h, d'où τ_d=38 h
- Charge et décharge simultanées (soit débit : 20 m^3/h pendant 5 h)

Nous étudierons seulement les périodes de chauffage, la température de fusion du MCP étant peu interéssante pour la production d'ECS seule, l'été.

Pour faciliter le calcul, la cuve cylindrique standard de 10 m^3 est supposée équivalente à une cuve de même volume, de même longueur mais à section carrée ($S = \pi \frac{d^2}{4} = 2,89\ m^2 = 1,7m \times 1,7m$). Nous ne connaissons pas le nombre de couches qui sera déterminé par l'épaisseur de la plaque. Nous sommes ramenés à un écoulement dans une conduite rectangulaire de largeur ℓ=1,7 m et de hauteur e inconnue, mais que nous supposons petite devant ℓ.

D'après KRETTH (14), les conditions d'écoulement le long des parois de conduites rectangulaires en régime laminaire pour des liquides ayant des nombres de Prandtl compris entre 1 et 15 sont très proches des conditions d'écoulement sur une plaque plane et la formule proposée par POLHAUSEN pour le Nusselt est applicable :

$$Nu = 0.664\ (\mathcal{R}e_D)^{1/2}\ (Pr)^{1/3} \qquad (II.10)$$

en notant toutefois que le $\mathcal{R}e$ n'est pas le même, la dimension caractéristique n'étant plus le diamètre hydraulique mais la longueur de la plaque.

$$\mathcal{R}e = \frac{vL}{\nu_e} \qquad v = \frac{G}{nA}$$

Le volume de MCP est différent selon qu'il s'agit du PEG ou de la chliarolithe (voir § II.4.1) ; la section totale de passage pour l'eau sera donc différente, ainsi que la vitesse et le Reynolds.

a) Régime de charge: $G = 15\ m^3/h$, $\tau = 10\ h$

* PEG : $nA = (10-5,6)/3,9 = 1,13\ m^2$

d'où :

$$\mathcal{R}e_{PEG} = \frac{15}{3600}\ \frac{1}{1,13} \times \frac{3,9}{10^{-6}} = 14380$$

Nous retrouvons bien sûr un $\mathcal{R}e$ d'écoulement laminaire sur une plaque plane ($\mathcal{R}e < 10^5$).

$$Nu_{PEG} = 0,664 \times \sqrt{14380} \times (7,03)^{1/3}$$

soit

$$Nu_{PEG} = 151$$

$$h = \frac{Nu.k_e}{L} \qquad (II.11)$$

d'où $h = \frac{151 \times 0,6}{3,9}$, soit $\underline{h_{PEG} = 23\ W/m^2K}$

Calculons le $\mathcal{R}e$ pour savoir la nature de l'écoulement

$$\mathcal{R}e = \frac{v.D_H}{\nu_e} \qquad (II.5)$$

Soit A la section d'un passage , n le nombre de plaques de MCP, P le périmètre mouillé du passage, G le débit total d'eau. Alors

$$v = \frac{G}{n.A} \qquad (II.6)$$

$$D_H = 4 \times \frac{A}{P} \qquad (II.7)$$

d'où

$$\mathcal{R}e = \frac{G}{n.A} \times \frac{4.A}{P} \times \frac{1}{\nu_e} \qquad (II.8)$$

soit

$$\mathcal{R}e = \frac{4G}{\nu_e.P} \times \frac{1}{n}$$

Si e << ℓ, P $\sim$ 2 ℓ et le Reynolds ne dépend plus que de <u>n</u>.

En régime de charge G = 15 m^3/h,

d'où :

$$\mathcal{R}e = \frac{4}{10^6} \times \frac{15}{3600} \quad \frac{1}{2 \times 1,7} \quad \frac{1}{n}$$

soit :

$$\mathcal{R}e = 6944 \times \frac{1}{n} \qquad (II.9)$$

Nous constatons que dès que n est supérieur à 3, ce qui est très probablement le cas, l'écoulement est laminaire. ($\mathcal{R}e$ < 2000). Pour connaitre le coefficient d'échange, nous devons calculer le Prandtl.

$$Pr = \frac{\mu_e Cp_e}{k_e} = \frac{10^{-3} \times 4,18.10^3}{0,6}$$

Soit :

$$Pr = 7,03$$

Nous calculons γ pour $\tau = 10$ h d'après l'équation (II.3)

$$\gamma = \frac{23}{\sqrt{0,17 \times 1500 \times 1200}} \sqrt{\frac{3600 \times 10}{\pi}},$$

soit : $\gamma = 4,4$

valeur qui, d'après la figure II.2, correspond à $\beta_{opt} = 0,6$.

D'après (II.3), $\delta_{opt} = \beta_{opt}\sqrt{\frac{K.\tau}{\pi}} = 0.6 \times \sqrt{\frac{0,17}{1200 \times 1500} \times \frac{10 \times 3600}{\pi}}$

soit $\delta_{opt} = 0,02$ m

* Chliarolithe

En effectuant la même démarche, nous obtenons les valeurs intermédiaires suivantes :

$$nA = 1,36 \text{ m}^2$$
$$\mathcal{R}e = 11948$$
$$Nu = 138$$
$$h = 21,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$
$$\gamma = 1,5$$
$$\beta_{opt} = 0,42$$

et $\delta_{opt} = 0,018$ m

b) Régime de décharge : $G = 5$ m^3/h, $\tau = 38$ h

* PEG

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{R}e_{PEG} = 4793 \\ Nu_{PEG} = 87 \\ h_{PEG} = 13 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \gamma = 4,9 \\ \beta_{opt} = 0,62 \end{array}\right\} \text{ d'où } \delta_{opt} = 0,04 \text{ m}$$

* Chliarolithe

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{R}e_{Cl} = 3983 \\ Nu_{Cl} = 80 \\ h_{Cl} = 12,3 \ W/m^2K \\ \gamma = 1,7 \\ \beta_{opt} = 0,47 \end{array}\right\} \text{d'où } \delta_{opt} = 0,039 \text{ m}$$

c) Régime mixte : $G = 20\ m^3/h$, $\tau = 10$ h

* PEG

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{R}e = 19173 \\ Nu = 175 \\ h = 27 \quad W/m^2K \\ \gamma = 5,22 \\ \beta_{opt} = 0,62 \end{array}\right\} \text{d'où } \delta_{opt} = 0,02 \text{ m}$$

* Chliarolithe

$$\left.\begin{array}{l} \mathcal{R}e = 15931 \\ Nu = 159 \\ h = 24,5 \quad W/m2K \\ \gamma = 1,7 \\ \beta_{opt} = 0,47 \end{array}\right\} \text{d'où } \delta_{opt} = 0,02 \text{ m}$$

Il apparait donc qu'une épaisseur de plaque de 4 cm est l'épaisseur optimale, tant en régime de charge simple qu'en charge et décharge simultanées, pour les deux matériaux.

II.3.3 Choix du contenant

Nous avons cherché des contenants se rapprochant le plus possible de la géométrie plane et d'épaisseur optimale. Les premiers tests ont porté sur des matelas noirs de PVC très fins, avec des trous destinés

à améliorer la répartition du liquide dans tout le matelas. Ces matelas sont commercialisés pour la culture des fraisiers. Nous les avons écartés car ils présentaient les inconvénients d'être trop fragiles, faciles à crever, non rigides et les trous faisaient perdre beaucoup de place. Divers autres récipients plus au moins rigides ont été envisagés et essayés, sans succès réel de fiabilité.

Le CSTB a ensuite testé des bidons en plastique rigide fabriqués par TOTAL pour conditionner l'huile de moteur. Les bidons du commerce prenaient une forme d'outre dès que la température dépassait 50°C. La firme TOTAL a accepté de fabriquer les bidons pour notre expérience, en changeant la nature du produit servant à les fabriquer et l'épaisseur des parois. Ce sont donc ces bidons qui ont été retenus, leur étanchéité étant satisfaisante avec des bouchons TOTAL classiques pour le PEG, et des bouchons spéciaux soudés pour la chliarolithe.

Schéma d'un bidon

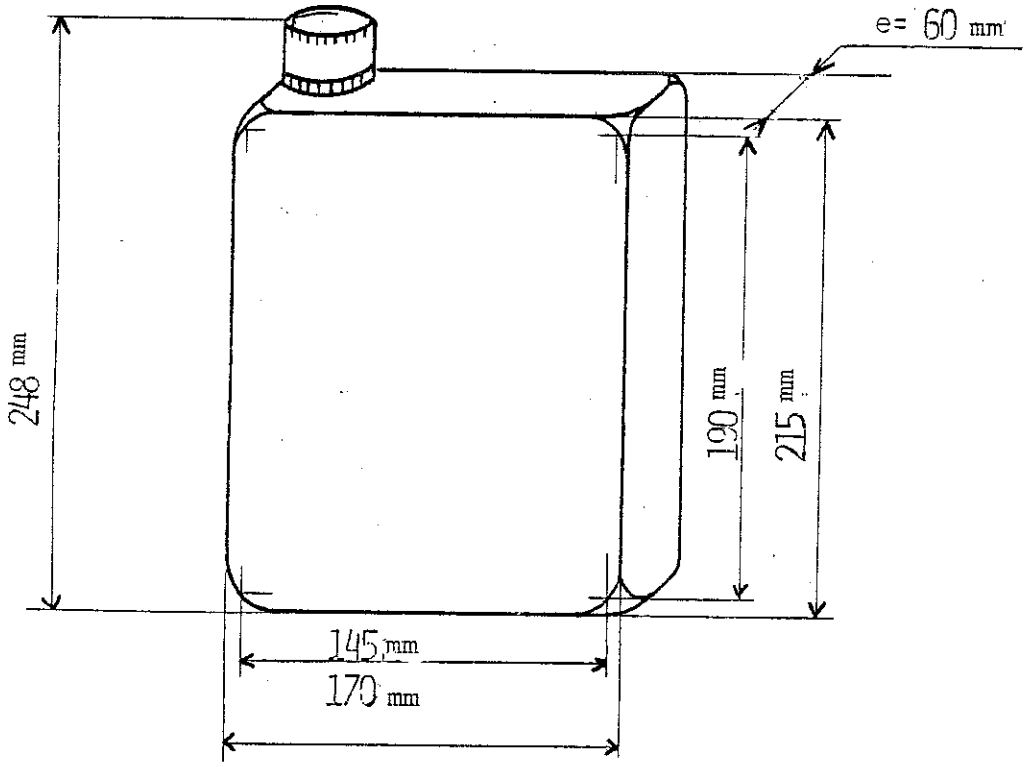
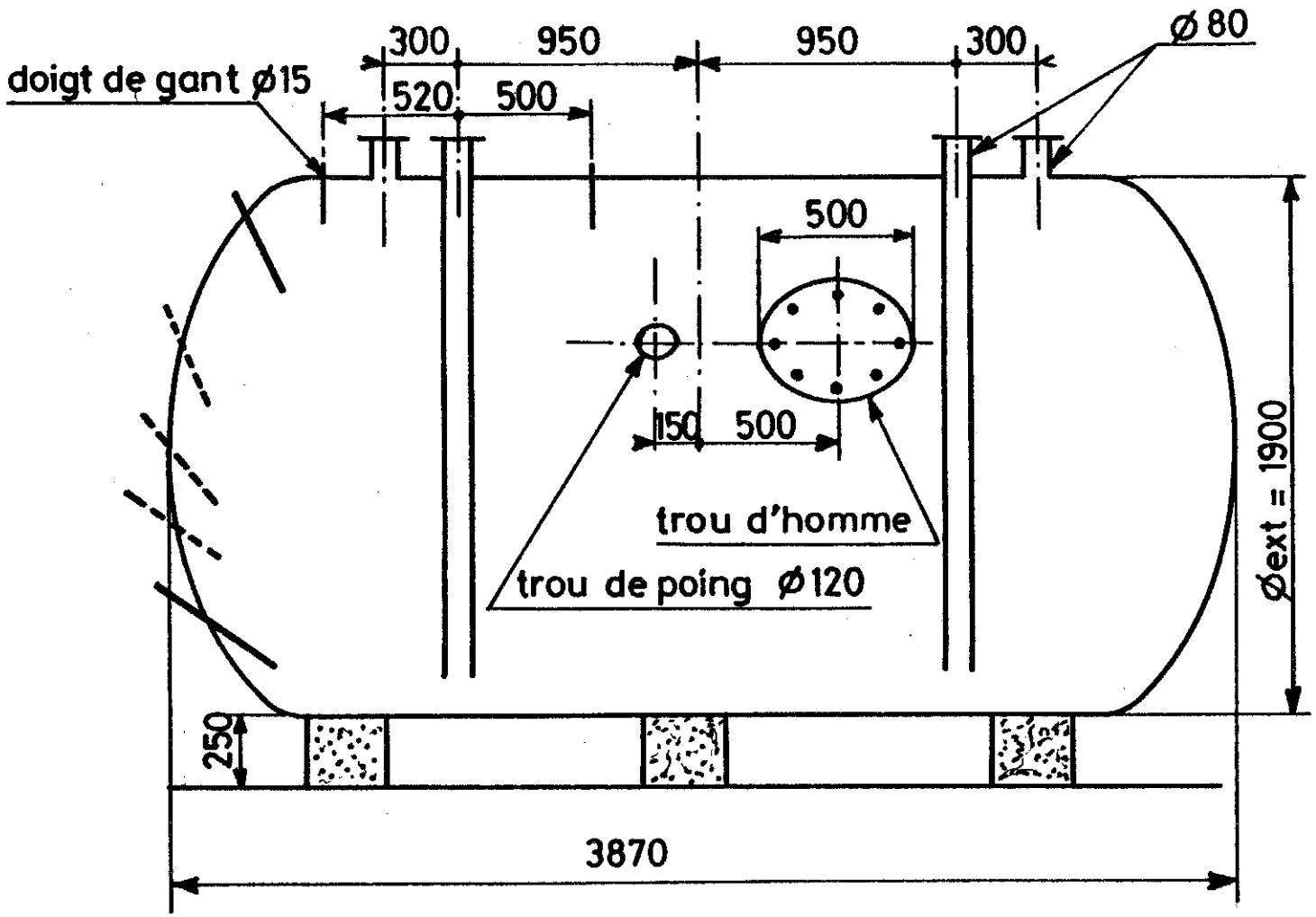


Figure II. 5

La largeur extérieure des bidons est de 6 cm, l'épaisseur des parois étant de 2 mm, ce qui laisse une "plaque" de MCP de 5,6 cm.

FIGURE II.6



Echelle 1/25e

II.3.4 Conception de la structure porteuse

La cuve standard nécessitait un aménagement spécial pour être transformée en échangeur, notamment un platelage interne pour supporter les bidons remplis de MCP.

Espacement entre 2 couches

D'après les résultats du § II.3.1, la cuve doit contenir $V_s = 5,6\ m^3$ de PEG. Chaque bidon a une capacité $V_b = 2\ \ell$. Nous aurons donc $n = \frac{V_s}{V_b}$, soit 2800 bidons. Un couple de bidons (arrangés tête-bêche à cause des bouchons) a une longueur $\ell_o = 0,248 + 0,215 = 0,463$ m. La cuve ayant une longueur L = 3,9 m, une rangée de bidons sur la longueur comporte $n_o = \frac{2L}{\ell_o}$, soit 16 bidons. Une tranche verticale unitaire de la cuve perpendiculaire à l'axe comporte donc $\frac{2800}{16} = 175$ bidons.

Nous refaisons appel pour les calculs à la cuve moyenne utilisée au § II.3.2 de longueur L = 3,9 m et de section carrée, d'arête 1,7 m. Un bidon ayant une largeur de 0,170 m, il rentre 10 bidons dans une largeur de cuve ; le nombre de couches de bidons dans une section est donc $\frac{175}{10}$, soit 18 couches. 18 couches représentent une hauteur de 18 x 0,06 = 1,08 m. Il reste donc pour l'eau un espace libre total de 1,70 m - 1,08 m = 0,62 m, soit entre 2 couches de bidons $\frac{0,62}{18} \sim 0,034$ m.

L'échangeur aura donc un pas vertical de 9,4 cm

Choix de la structure

La structure doit présenter 3 qualités essentielles :

- La robustesse, pour pouvoir supporter les 6,7 tonnes de produit avant la mise en eau de la cuve.
- La finesse, afin que les éléments de la structure ne soient pas plus gros que l'espacement pris entre 2 couches de bidons.
- La maniabilité car tout l'échangeur doit être installé à l'intérieur de la cuve par un trou d'homme de 50 cm de diamètre, situé au 2/3 de sa hauteur (fig. II.6).

La structure choisie rappelle celle des casiers à bouteilles (schéma). Les bidons reposent sur des baguettes amovibles posées sur les traverses ondulées d'échelles verticales. Ces échelles sont maintenues à leurs extrêmités par des plaques boulonnées sur la partie profilée en cornière de 2 demi-brides circulaires, elles-mêmes assemblées par ce système. Chaque bride constituée par 2 demi-brides est reliée à la suivante par des entretoises pour maintenir la structure rigide. Les échelles ont une largeur de 35 cm pour les 3 échelles centrales, et de 17,5 cm pour les 4 échelles latérales, ces largeurs correspondant respectivement à celles de 2 bidons et 1 bidon.

L'espacement entre 2 brides est calculé de telle sorte que le corps d'un bidon ne se trouve jamais directement sous une traverse d'échelle.

Vue de dessus au niveau d'une échelle (fig. II.7)

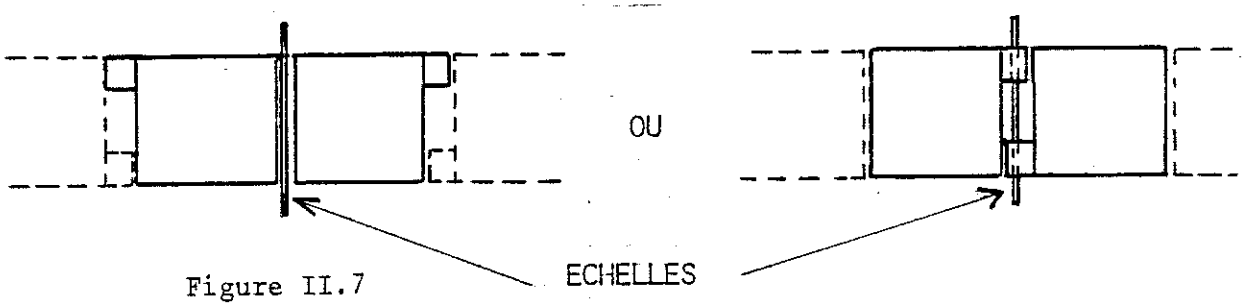


Figure II.7

SHEMA DE LA STRUCTURE

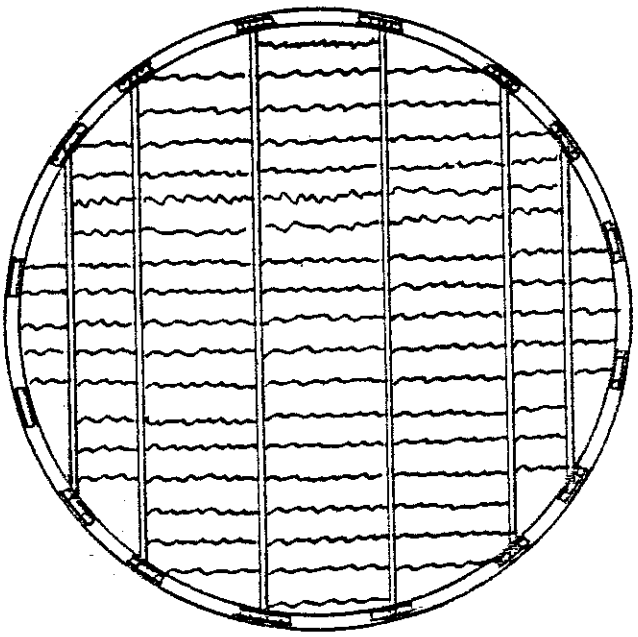
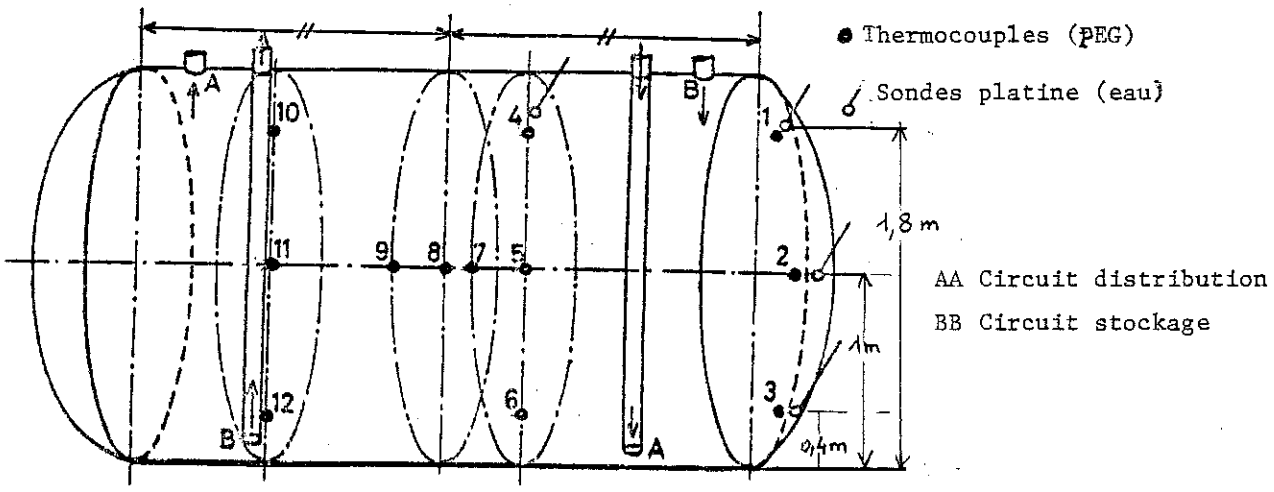


FIGURE II.8

REPARTITION DES PRISES DE TEMPERATURES A L'INTERIEUR DE LA CUVE



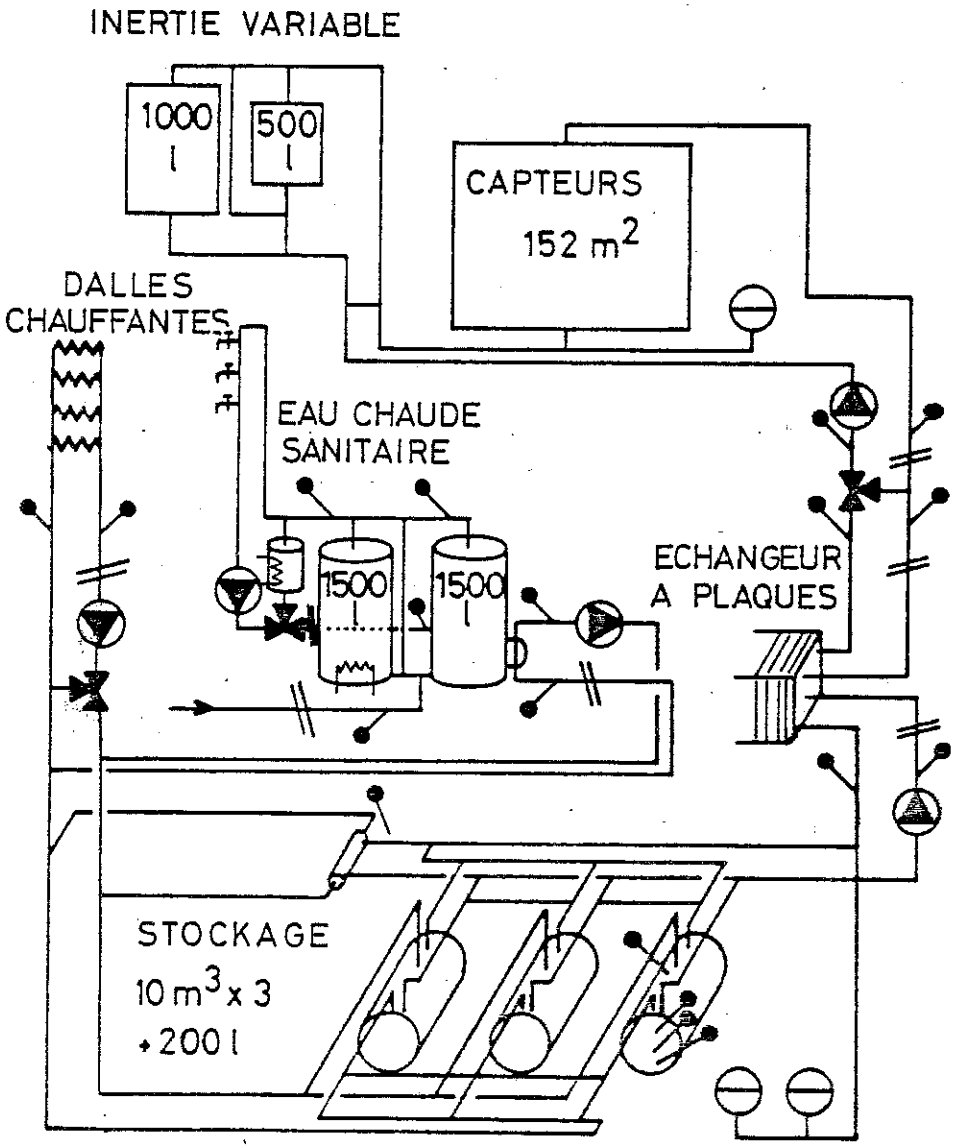


FIGURE II.9

REPARTITION DES MESURES DE TEMPERATURES ET DE DEBITS DANS LES DIFFERENTS CIRCUITS

// DEBITMETRES

THERMOMETRES

II.4 REALISATION ET INSTRUMENTATION

Les délais entre la commande et la livraison des composants de l'échangeur ont été de 15 semaines. Le conditionnement du MCP dans les bidons a duré 15 jours, dans les locaux du CSTB à Grenoble. L'installation de l'échangeur à Bourgoin a démarré le 16 Mars 1979 et la mise en eau de la cuve a eu lieu le 3 Avril 1979.

Nous avons équipé 12 bidons de thermocouples PYROCONTROL de type K. La répartition de ces bidons dans la cuve est indiquée sur la figure II.8 . La cuve de stockage comportait déjà 4 sondes de platine, dont 3 réparties sur l'axe vertical de la face avant de la cuve, et une sur la génératrice la plus haute.

Par ailleurs, la figure II.9 indique les mesures de température et de débits effectuées sur les différents circuits.

II.5 CAPACITE ENERGETIQUE DE LA CUVE

Nous pouvons calculer l'énergie stockée dans une cuve à MCP en fonction de la température lorsque tout le système eau-structure porteuse-MCP est à la même température, ce qui se produit en fin de nuit, ou les jours où l'ensoleillement n'est pas suffisant pour commander l'ouverture de l'échangeur.

Nous avons mis <u>exactement n = 2580 bidons</u> dans la cuve.

- masse de la structure $m_p = 400$ kg $\pm$ 5 kg
- masse d'un bidon vide bouché $m_b = 0{,}177$ kg $\pm$ 0,001 kg
- volume de produit dans un bidon $V_\ell = 2\ \ell \pm 0{,}01\ \ell$ (à l'état liquide)

$Cp_b = 1{,}67$ kJ/kg°C $\qquad \rho_b = 954$ kg/m^3

$Cp_p = 0{,}45$ kJ/kg°C $\qquad \rho_p = 7800$ kg/m^3

$Cp_e = 4{,}18$ kJ/kg°C $\qquad \rho_e = 998$ kg/m^3

Nous prenons comme origine des températures T = 19°C, la température de cuve descendant rarement dessous en dessous.

L'énergie stockée dans la cuve échangeur en fonction de la température est exprimée par :

$T < T_f \qquad Q_1(T) = (m_s Cp_s + m_e Cp_e + m_b Cp_b + m_p Cp_p)\,(T-19) \qquad (II.11)$

$T = T_f \qquad Q_2(T_f) = Q_1(T_f) + m_s L_f \qquad (II.12)$

$T > T_f \qquad Q_3(T) = Q_2(T_f) + (m_l Cp_l + m_e Cp_e + m_b Cp_b + m_p Cp_p)(T-T_f) \qquad (II,13)$

De plus, $V_s + V_e + V_b + V_p = 10\ m^3 \qquad (II.14)$

Calculons chacun de ces termes :

- Volume de l'eau

$V_e = 10 - (V_s + V_p + V_b)$ d'où $V_e = 10 - n(V_s + \frac{m_b}{\rho_b}) + \frac{m_p}{\rho_p}$

soit $V_e = 10 - (2580(2.10^{-3} + \frac{0.177}{954}) + \frac{400}{7800})$

$$\underline{V_e = 4,6\ m^3}$$

$(mCp)_{eq}$, capacité calorifique totale de la cuve en équilibre thermique est telle que $(mCp)_{eq} = m_s Cp_s + m_e Cp_e + m_p Cp_p + m_b Cp_b$

Les 3 derniers termes de la somme sont constants, mais le dernier terme varie.

N.B. : Pour la Chlarolithe, nous ne connaissons pas la valeur de la capacité calorifique à l'état liquide et nous la posons égale à celle de l'état solide.

* Cuve à PEG

- PEG à l'état solide

$$(mCp)_{eq} = 2580\times0,002\times1120\times2780+998\times4,6\times4,18.10^3+400\times0,45.10^3 +2580\times0,177\times1,67.10^3\ (J/°C)$$

$$(mCp)_{eq} = 36,2\ MJ/°C \quad (10,1\ kWh/°C)$$

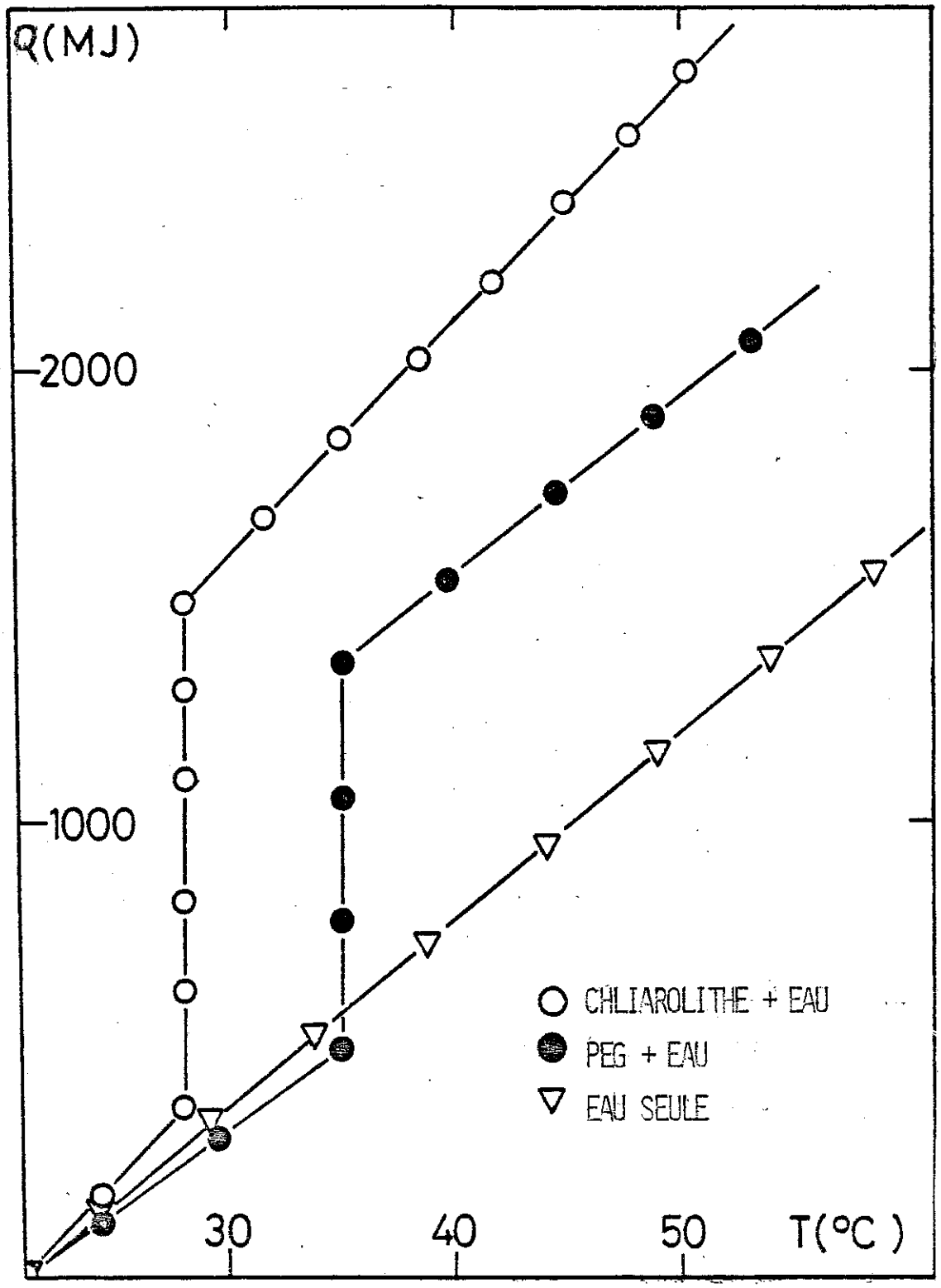


FIGURE II. 10

ENERGIE STOCKEE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

- PEG à l'état liquide,

Par le même calcul, nous obtenons

$$(mCp_{eq}) = 39,1 \quad MJ/°C \quad (11\ kWh/°C)$$

* Cuve à chliarolithe

$$(mCp)_{eq} = 39,8\ MJ/°C \quad (10,9\ kWh/°C)$$

* Cuve à eau

$$(mCp)_{eau} = 41,8\ MJ/°C \quad (11,6\ kWh/°C)$$

Nous obtenons en remplaçant ces valeurs dans les équations (II.11 , II.12 et II.13).

PEG	Chliarolithe	eau
T < 35°C	T < 28°C	
$Q_1(T) = 36,2(T-19)$	$Q_1(T) = 39,8(T-19)$	$Q(T) = 41,8\ (T-19)$
T = 35°C	T = 28°C	
$Q_2(T) = 1424.4$	$Q_2(T) = 1472.8$	
T > 35°C	T > 28°C	
$Q_3(T) = 39,1(T-14,3)$	$Q_3(T) = 39,8\ (T+8,2)$	

La figure II.10 représente les énergies stockées en fonction de la température dans chacune des trois cuves.

Nous constatons qu'au départ, les pentes des droites sont sensiblement idéntiques et les énergies stockées à peu près équivalentes. Par contre l'énergie de la cuve à eau devient inférieure à 28°C à celle de la chliarolithe, et à 35°C à celle du PEG dès que 1/10ème de celui-ci a fondu.

D E U X I E M E P A R T I E

- - -

THERMOCINETIQUE DU PEG

+++++++++

CHAPITRE III - SIMULATION NUMERIQUE DE LA FUSION DU PEG

III.1 POSITION DU PROBLEME

En raison de leur large champ d'applications, les problèmes relatifs au changement de phase intéressent de nombreux chercheurs. Ces problèmes sont quelquefois dénommés problèmes de Stefan car c'est Stefan (2,14) qui publia le premier sur ce sujet. Dans chacune des deux phases du MCP, l'équation de conduction de la chaleur est très simple si on néglige la convection dans la phase liquide, mais l'interface solide-liquide changeant continuellement de position pendant le processus de fusion ou de solidification, le système d'équations n'est plus linéaire et la solution exacte analytique est généralement impossible à obtenir, sauf dans des cas très particuliers de conditions aux limites (flux de chaleur à la surface du MCP constant par exemple).

On a alors recours, soit à des méthodes analytiques approchées (Goodman (15), Biot (16)), applicables pour certaines conditions simples de flux ou de températures à la surface du MCP, soit à des méthodes numériques que Gupta (17,18) a classées pour les problèmes de Stefan à une dimension en 2 catégories : méthodes à maille fixe et méthodes à maille variable.

Pour les premières (Cranck (19), Ehrlich (20)), le domaine espace-temps est divisé en un nombre fini de mailles de mêmes dimensions. A chaque instant, l'interface se situe quelque part entre deux noeuds, et sa position ainsi que les températures aux noeuds voisins sont calculées par différences finies.

Avec les méthodes à mailles variables, le domaine espace-temps est divisé en intervalles égaux seulement sur un axe, soit sur l'axe des temps (Murray et Landis (21)), la taille de la maille sur l'autre axe étant alors déterminée de façon à ce que l'interface coïncide toujours avec une frontière de maille, le nombre d'intervalles restant fixe, soit

sur l'axe des espaces (Douglas-Gallie (22)), le pas de temps étant alors choisi de telle sorte que l'interface partage exactement la maille en deux sur cet intervalle.

L'intérêt de toutes ces méthodes est de suivre l'évolution du front de fusion avec une très grande précision.

A Bourgoin, notre but est plus de voir l'influence du PEG sur tout le système et ce qui se passe dans la cuve, au niveau des températures et des énergies récupérées par l'eau et le MCP, que de suivre exactement le front de fusion dans chacun des 2580 bidons. La simulation choisie met donc davantage l'accent sur l'aspect "échangeur" de la cuve que sur la progression exacte du front de fusion à chaque instant.

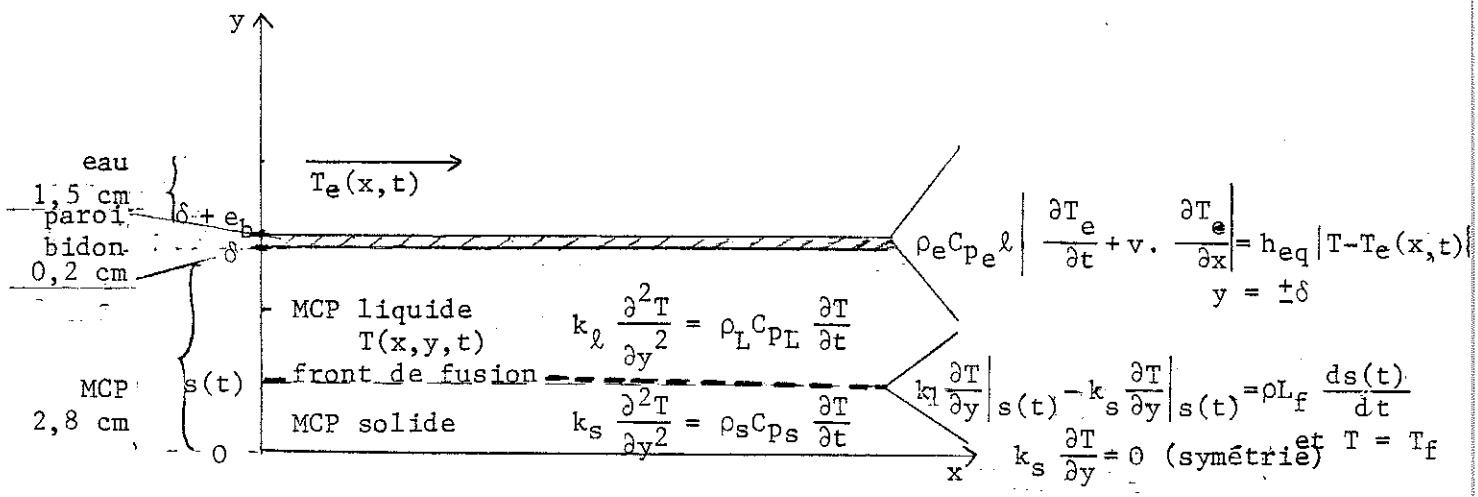
III.2 DESCRIPTION DU MODELE PREVISIONNEL

Nous simulons une cuve de même volume que la cuve réelle (10 m^3), mais contenant une seule couche de MCP, de même épaisseur 2δ qu'un bidon réel, et une couche d'eau égale au quart de l'épaisseur du bidon au-dessus et au-dessous du MCP.

Nous négligeons la convection dans le MCP fondu, pour rendre le problème symétrique et étudier seulement le 1/2 module supérieur. D'autre part, nous posons nulle la conduction parallèlement à la plaque.

Les équations traduisant les transferts thermiques entre l'eau et le MCP sont représentées sur le schéma III.1.

Schéma III.1



Nous ne savons pas résoudre ces équations analytiquement pour les raisons exposées dans le paragraphe précédent.

Nous avons adopté un modèle prévisionnel simple, déjà utilisé par Marc Bourdeau (23) du Laboratoire d'Ecothermie Solaire de Nice pour simuler la fusion d'un sel contenu dans un cylindre en posant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- à t = 0, l'ensemble eau + MCP est à la température $T = T_f$, le MCP étant entièrement solide ;
- il n'y a pas de conduction dans le solide, mais uniquement dans la partie fondue ;
- la puissance incidente sert uniquement à la fusion du MCP (et pas à l'accumulation par chaleur sensible dans la partie fondue).

Pour notre géométrie, le <u>bilan de puissance</u> peut s'écrire :

$$P_{fournie} = \rho_e V_e C_{p_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} + S h^* (T_e - T_f) \qquad \text{(III.1)}$$

avec à t = 0 $\quad h^* = h_{eq}$ et $\frac{1}{h_{eq}} = \frac{1}{h_o} + \frac{e_b}{k_b}$ (III.2)

à t > 0 $\quad \frac{1}{h^*} = \frac{1}{h_{eq}} + \frac{\delta - s(t)}{k_\ell}$ soit $h^* = \frac{h_{eq}}{1 + h_{eq} \frac{\delta}{k_\ell}(1 - \frac{s(t)}{\delta})}$ (III.3)

Le bilan d'énergie est :

$$\int_0^t P\,dt = \rho_e V_e C_{pe}(T_e - T_f) + \rho_s V_s L_f\left(1 - \frac{s(t)}{\delta}\right) \qquad \text{(III.4)}$$

d'où :

$$\frac{s(t)}{\delta} = 1 - \frac{\int_0^t P dt - \rho_e V_e C_{pe}(T_e - T_f)}{\rho_s V_s L_f} \qquad \text{(III.5)}$$

Nous sommes donc amenés à résoudre l'équation différentielle du premier ordre en T_e.

$$\rho_e V_e C_{pe} \frac{\partial T_e}{\partial t} = P - \frac{Sh_{eq}(T_e - T_f)}{1 + h_{eq}\frac{\delta}{k_\ell}\left(\frac{\int_0^t P dt - \rho_e V_e C_{pe}(T_e - T_f)}{\rho_s V_s L_f}\right)} \qquad \text{(III.6)}$$

Les paramètres adimensionnels suivants sont utiles :

$$Bi = \frac{\delta h_{eq}}{k_l} \qquad R^+ = \frac{s(t)}{\delta}$$

$$T^+ = \frac{T_e - T_f}{T_r} \quad \text{avec} \quad T_r = \frac{\rho_\ell V_\ell L_f}{\rho_e V_e C_{pe}}$$

$$t^+ = \frac{t}{t_r} \quad \text{avec} \quad t_r = \frac{\rho_e V_e C_{pe}}{Sh_{eq}}$$

$$P^+ = \frac{P}{P_r} \quad \text{avec} \quad P_r = \rho_e C_{pe} V_e \frac{T_r}{t_r} = \frac{\rho_\ell V_\ell L_f}{t_r}$$

Les équations III.5 et III.6 deviennent respectivement :

$$R^+ = 1 - \int_0^t P^+ dt^+ + T^+ \qquad \text{(III.7)}$$

et

$$\frac{\partial T^+}{\partial t^+} = P^+ - \frac{T^+}{1 + Bi(1 - R^+)} \qquad \text{(III.8)}$$

La méthode de résolution utilisée est un schéma de Runge-Kutta à deux approximations successives, soit :

$$T^+_{n+1} = T^+_n + \tau \times f(t^+_n + \frac{\tau}{2}, T^+_n + \frac{\tau}{2} f(t^+_n, T^+_n)) \qquad \text{(III.9)}$$

$$f(t^+_n, T^+_n) = P^+_n - \frac{T^+_n}{1+Bi(1-R^+_n)} = \frac{\partial T^+_n}{\partial t^+_n}$$

<u>La puissance incidente</u> est mesurée dans le plan des capteurs qui se mettent en route dès que la cellule photoélectrique de la façade Nord reçoit plus de 50 W/m^2.

Pour le rendement des capteurs, nous utilisons celui qui a été déterminé expérimentalement à Bourgoin sur plusieurs périodes, d'après l'équation III.10.

$$\underbrace{\frac{\dot{m}C_p(T_s-T_e)}{S.P_{inc}}}_{\text{rendement}} = A + B\left(\frac{\frac{T_e+T_s}{2} - T_{ext}}{P_{inc}}\right) \qquad \text{(III.10)}$$

avec
- S : Surface de captation (m^2)
- $\dot{m}$: Débit d'eau glycolée dans les capteurs (ℓ/s)
- C_p : Chaleur volumique d'eau glycolée ($J/\ell\ °C$)
- T_e, T_s : Température d'entrée et de sortie de l'eau dans les capteurs (°C)
- T_{ext} : Température extérieure mesurée sur la terrasse (°C)
- P_{inc} : Puissance incidente globale mesurée dans le plan des capteurs (W/m^2)

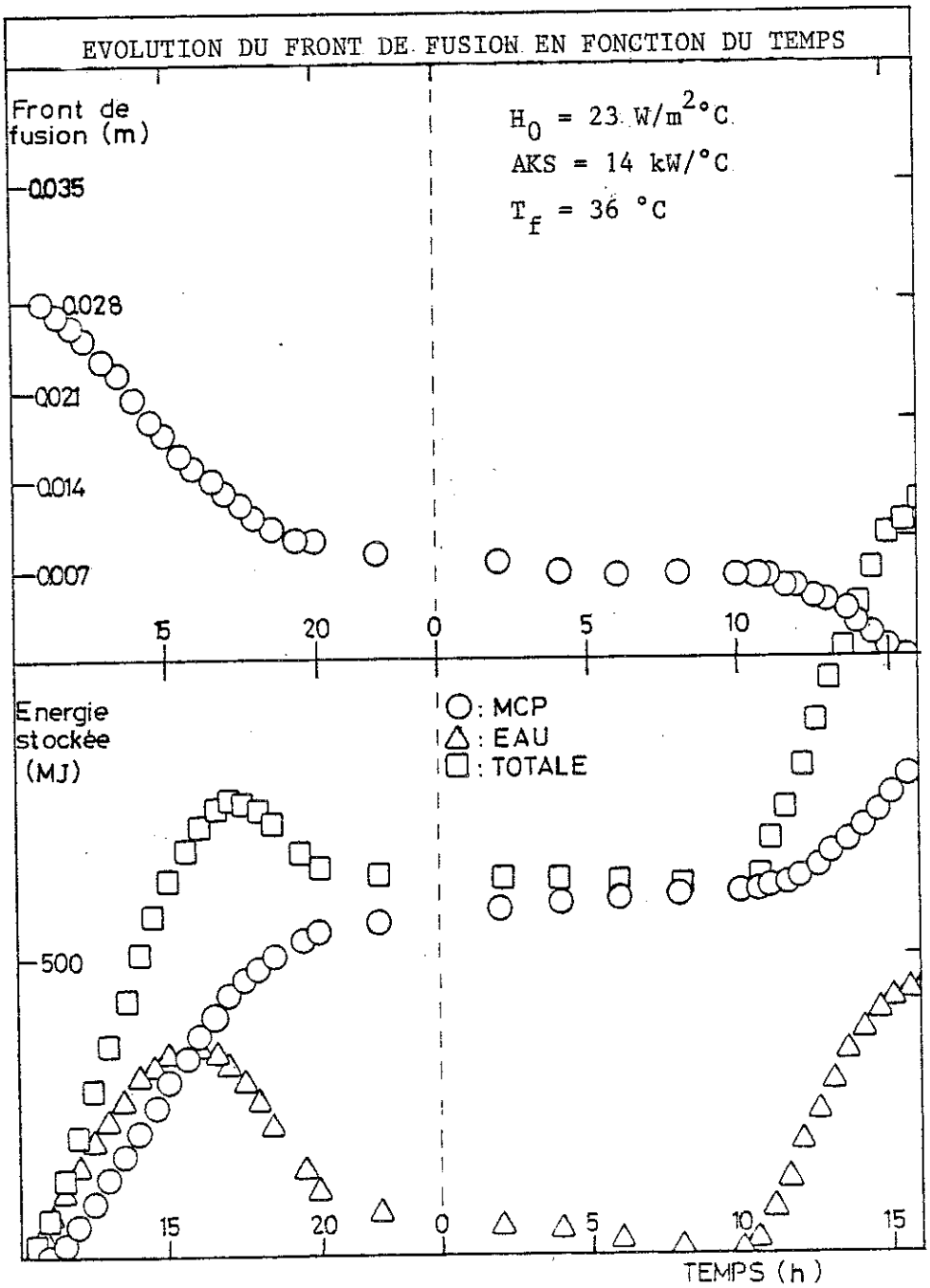
Les variables ci-dessus sont prises en compte uniquement lorsque la pompe secondaire marche. Les valeurs sont cumulées tous les jours de la période choisie, la dernière sortie correspondant donc à la période toute entière. Les coefficients A et B sont alors déterminés par la méthode des moindres carrés.
Le rendement des capteurs déterminé par cette méthode est :

$$\rho = 0,84 - 6,0 \left(\frac{\frac{T_e + T_s}{2} - T_{ext}}{P_{inc}}\right) \qquad \text{(III.11)}$$

Nous calculons l'élévation de température dans les capteurs dès que ceux-ci se mettent en marche d'après l'équation III.12 :

$$P_{capt} = \dot{m}\ C_p\ (\Delta T_{capt}) \qquad \text{(III.12)}$$

FIGURE III.1



ENERGIES STOCKEES PAR L'EAU, PAR LE PEG, ET PAR TOUTE LA CUVE EN FONCTION DU TEMPS

d'où $$T_{capt}^{n+1} = T_{capt}^{n} + \frac{P_{capt}}{\dot{m}C_p} \qquad \text{(III.13)}$$

avec $$P_{capt} = \rho_{capt}\, P_{inc}$$

Dès que la température de l'eau dans les capteurs atteint celle de l'eau dans la cuve de stockage (soit $T_{eau} = T_f$ pour le 1er jour), la température est calculée par le schéma de Runge-Kutta. Nous ne considérons pas l'échangeur secondaire, c'est-à-dire que nous posons la température moyenne de l'eau dans les capteurs égale à celle de l'eau dans la cuve. Les pertes par les tuyaux, vannes, brides dans le circuit échangeur-cuve sont prises en considération avec un coefficient de déperditions estimé à 1,4 kW/°C d'après des bilans journaliers. Lorsque le circuit secondaire est arrêté, les pertes propres à la cuve sont de 25 W/°C.

Le listing du programme est en annexe ainsi que les valeurs des paramètres utilisés.

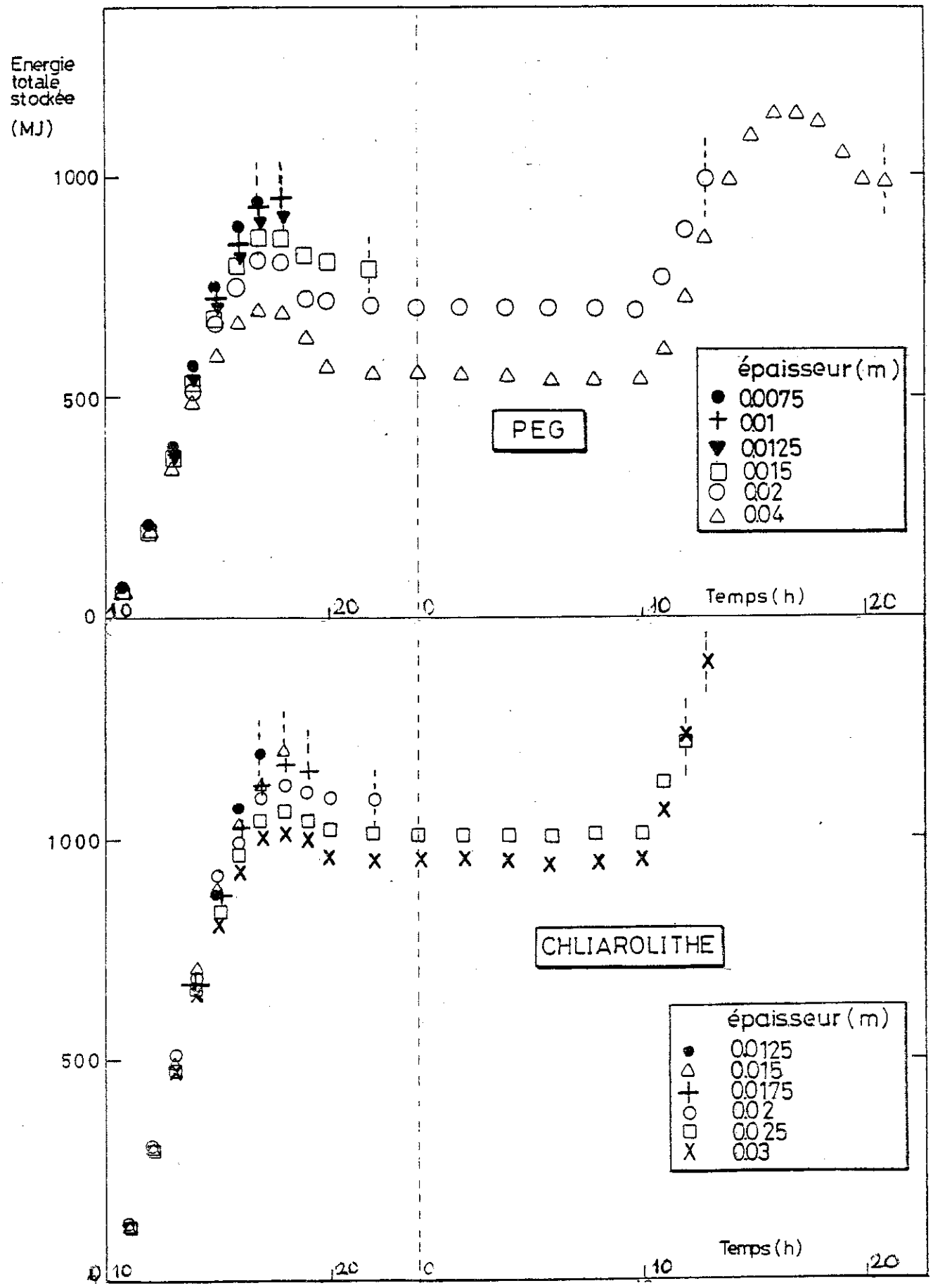
III.3 .RESULTATS

Nous avons porté sur la figure III.1 parallèlement l'évolution du front de fusion et les énergies stockées par l'eau et le PEG, et l'énergie totale en fonction du temps.

Avec nos hypothèses de calcul, pour les bidons de 6 cm et un coefficient d'échange h_0 = 23 W/m^2°C, le PEG a déjà stocké au bout de 6 heures -c'est-à-dire à la fin du stockage actif de la 1ère journée de charge- 85 % de l'énergie totale emmagasinée lorsque tout le MCP est fondu, ce qui se produit à 17 h le 2ème jour de charge, c'est-à-dire 21 heures après l'instant initial de charge (alors que la chliarolithe ne met que 17 heures à fondre dans les mêmes conditions).

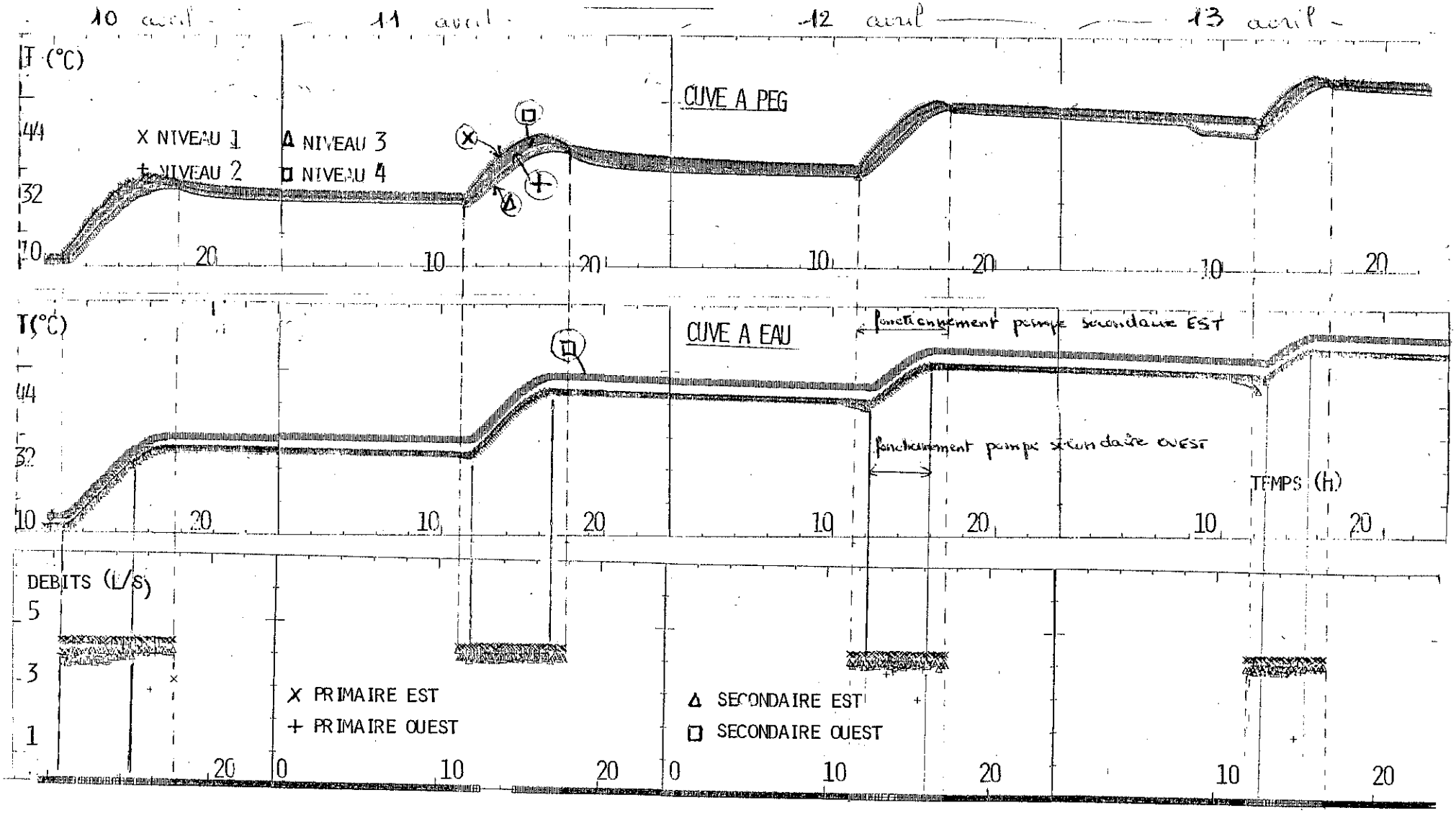
Nous voyons d'après cette figure l'intérêt qu'il y a à optimiser les dimensions pour stocker 100 % d'énergie à la fin de la journée. Nous avons essayé de retrouver la valeur optimale de BARDON (12) avec ce programme prévisionnel, et la figure III.2 montre les variations de l'énergie totale stockée en fonction du temps pour le PEG et la chliarolithe, pour

FIGURE III.2


Energie totale stockée (MJ)
1000
500
0
10
20
0
10
20
Temps (h)
PEG
épaisseur (m)
0.0075
0.01
0.0125
0.015
0.02
0.04
1000
500
0
10
20
0
10
20
Temps (h)
CHLIAROLITHE
épaisseur (m)
0.0125
0.015
0.0175
0.02
0.025
0.03

différentes épaisseurs de plaque. Nous trouvons une épaisseur optimale, pour le le cas où nous désirons que tout le MCP soit fondu à la fin d'une journée de beau temps, de 2,5 à 3 cm pour le PEG et de 3,5 à 4 cm pour la chliarolithe. Les bidons retenus pour l'expérimentation seraient donc deux fois trop épais. Néanmoins, l'épaisseur de 6 cm des bidons TOTAL semble être un bon compromis entre la qualité du stockage pur et la multiplication du nombre de bidons à mettre en oeuvre.

FIGURE IV-1


10 avril
11 avril
12 avril
13 avril
T (°C)
CUVE A PEG
X NIVEAU 1
+ NIVEAU 2
Δ NIVEAU 3
□ NIVEAU 4
44
32
10
20
T(°C)
CUVE A EAU
fonctionnement pompe secondaire EST
fonctionnement pompe secondaire OUEST
TEMPS (H)
DEBITS (L/S)
5
3
1
X PRIMAIRE EST
+ PRIMAIRE OUEST
Δ SECONDAIRE EST
□ SECONDAIRE OUEST
0

CHAPITRE IV - CHARGE ET DECHARGE DU STOCKAGE

IV.1 DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

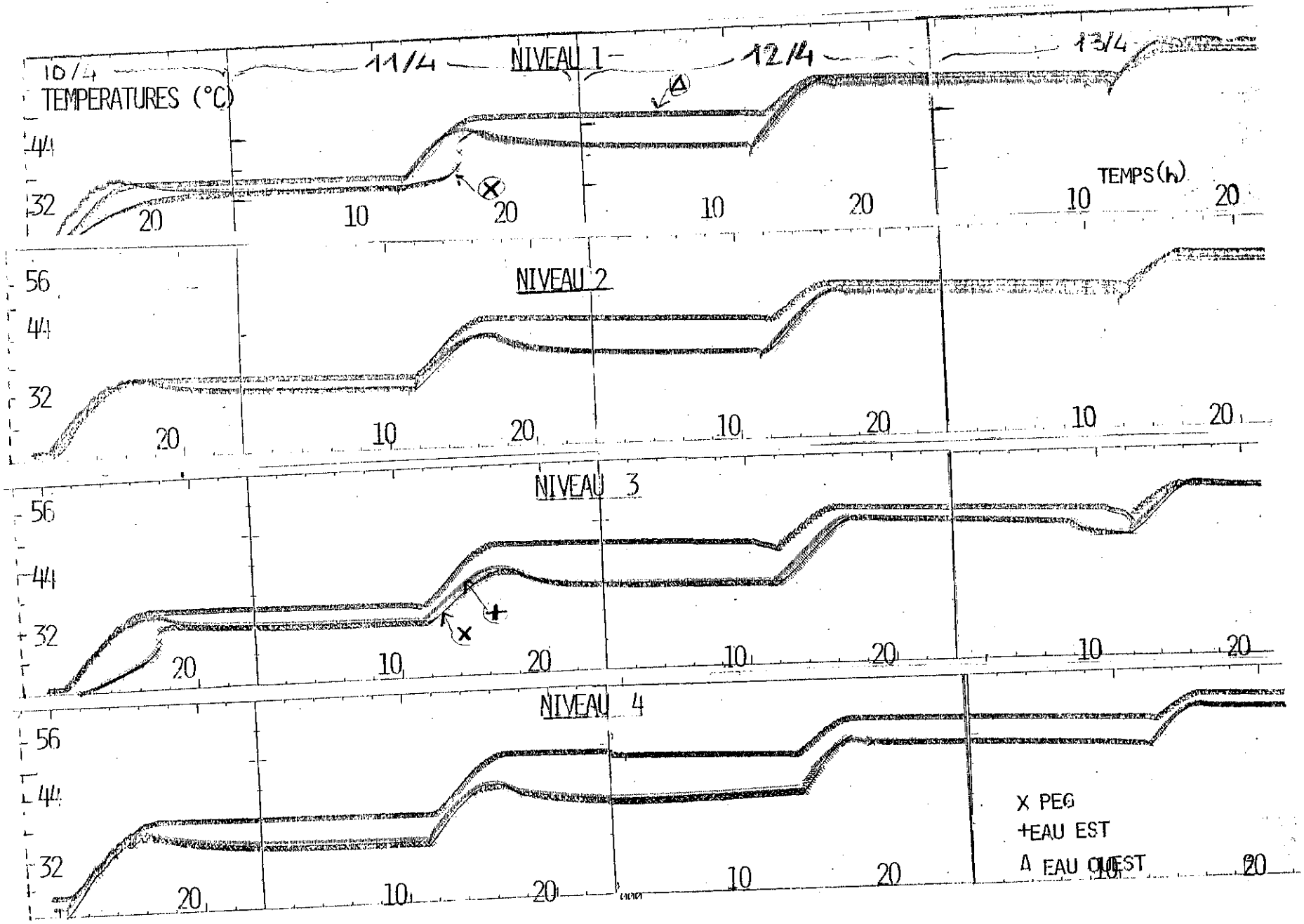
Pour isoler les phénomènes de fusion, puis de solidification du PEG, et caler le modèle décrit dans le chapitre précédent, nous avons fait une expérience de charge, puis de décharge separées.

Pendant 4 jours de beau temps consécutifs, du 10 au 13 avril 1980, nous avons chargé parallèlement la cuve à PEG dans le 1/2 immeuble Est et une cuve à eau dans le 1/2 immeuble Ouest, en arrêtant complètement la distribution du chauffage et de l'ECS, afin que le comportement aléatoire des habitants ne perturbe pas les résultats. Comme la période précédant ces 4 jours était une période de mauvais temps, les deux cuves étaient au départ au même niveau faible de température (19°C)

Pendant les 4 jours suivants (14 au 18 avril 1980), nous avons fait l'expérience inverse consistant à arrêter completement la charge, tout en assurant la distribution.

Dans cette partie réservée à la thermocinétique du PEG, nous nous intéressons uniquement aux températures mesurées dans les cuves.

FIGURE IV.2


10/4
11/4
12/4
13/4
NIVEAU 1
TEMPERATURES (°C)
TEMPS (h)
NIVEAU 2
NIVEAU 3
NIVEAU 4
X PEG
+EAU EST
Δ EAU OUEST

IV.2 ETUDE DES CUVES PENDANT LA CHARGE SEULE

IV.2.1 Comparaison des températures d'eau dans chacune des cuves

La figure IV.1 montre l'évolution des températures d'eau dans chacune des cuves aux 4 niveaux équipés de sondes , repérés sur la figure II.8.

Nous constatons que la présence des bidons favorise une légère stratification dans la cuve Est, l'écart entre le haut et le bas étant de 2°C lorsque la pompe secondaire est arrêtée et atteignant 4°C lorsqu'elle fonctionne.

En Ouest, les 3 températures à l'avant de la cuve sont entièrement confondues et la 4ème est environ 2 à 3°C au-dessus des 3 autres. Contrairement à la cuve Est, c'est lorsque la pompe secondaire fonctionne que l'écart diminue. Les températures d'eau en Ouest sont toujours supérieures aux températures d'eau dans la cuve à PEG.

IV.2.2 Comportement du PEG pour les 4 niveaux

La figure IV.2 indique pour chacun des 4 niveaux étudiés précédemment la température du PEG, la température d'eau dans la cuve à PEG et la température d'eau dans la cuve à eau au niveau correspondant pour les 4 jours.

Au niveau 1, la température du PEG traduit une saturation le 1er jour autour de 32°C, la fusion survenant le 2ème jour de charge, caractérisée par le creusement de la courbe comme sur la figure II.2. Les courbes relatives au PEG pour les niveaux 2 et 4 suivent de près celle de l'eau sans changement de phase apparent. Au niveau 3, le changement de phase survient dès le Ier jour de charge et ensuite l'évolution de la température du PEG est la même que celle de l'eau.

Comme nous l'avions remarqué dans le paragraphe précédent, la température en Ouest pour chaque niveau est supérieure à la température Est correspondante, l'écart grandissant jusqu'au 2ème jour de charge -jour où

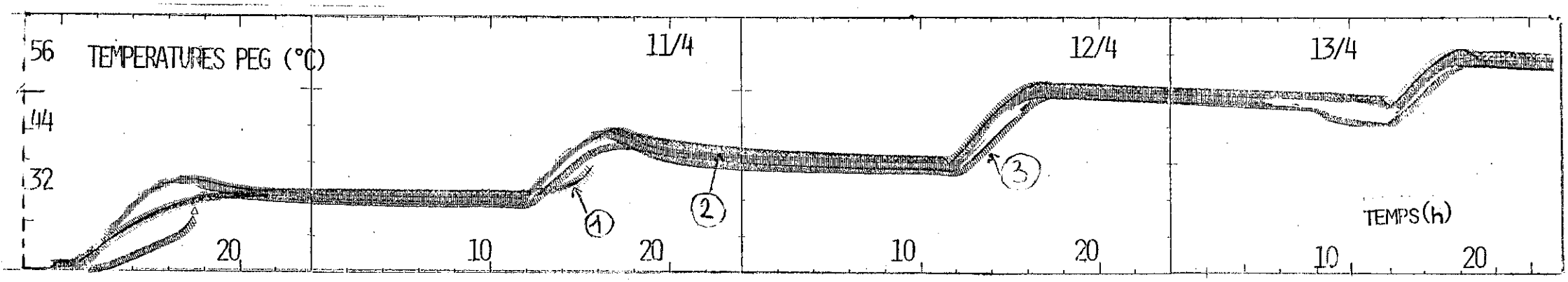


FIGURE IV.3

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DU PEG SOUS L'ARRIVEE DES CAPTEURS, X : 1 , + : 2 , ▲ : 3

le modèle prévoyait la fusion du MCP dans tous les bidons - puis diminuant ensuite pour devenir presque nul.

IV.2.3 Etude du comportement du PEG dans des plans verticaux

a) Plan vertical sous l'arrivée d'eau chaude

L'évolution de la température du PEG dans le plan situé juste sous le tuyau d'eau arrivant de l'échangeur est portée sur la figure IV.3.

Le 1er jour, les thermocouples n'indiquent pas l'ordre attendu pour les niveaux de températures. En effet, le n° 1, bien que situé immédiatement sous l'arrivée d'eau chaude, est toujours à un niveau de température inférieur à celui du n°2 et c'est le n°3 qui présente le premier un phénomène de fusion, bien que situé le plus au bas de la cuve.

A partir de la fusion du PEG dans le bidon équipé du thermocouple n° 1, l'évolution des températures correspond à notre attente.

Les courbes de la figure IV.3, traduisent plusieurs phénomènes difficilement différenciables qui sont :

- la stratification dans la cuve
- l'effet très localisé des transferts thermiques

Nous avons calculé un coefficient d'échange convectif moyen entre l'eau et les bidons, mais ce coefficient doit varier énormément selon que la zone est turbulente ou "morte".

- la position peu précise des thermocouples à l'intérieur des bidons.

Par exemple, la fusion rapide indiquée par le n° 3 avant le n° 1 alors que l'eau avoisinante est inférieure de 4°C à celle entourant le n° 1 peut être expliquée, soit par le fait que le thermocouple 3 est peut-être

plus proche de la paroi du bidon que le n°1, soit par le fait que les échanges convectifs sont bien meilleurs autour du bidon 3 qu'autour du bidon 1.

Après la fusion, il est normal que le profil de température du PEG soit confondu avec celui de l'eau avoisinante car les échanges à l'intérieur du MCP fondu sont plus grands que dans le MCP solide, des mouvements convectifs pouvant prendre naissance.

D'après KREITH (14), la quantité déterminante pour la création de la convection naturelle est le produit $G_r P_r$ avec

P_r = nombre de Prandtl = $\frac{\mu Cp}{k}$

G_r = nombre de Grashof = $\frac{\rho^2 g \lambda \theta D^3}{\mu}$

μ = viscosité = 0.1 Poise

Cp = chaleur spécifique du MCP liquide : 1,8 kJ/kg°C

ρ = densité liquide = 1 120 kg/m^3

k = conductivité = 0,19 W/m°C

g = accélération de la pesanteur 9,81 m/s^2

λ = coefficient de dilatation thermique = 7.10^{-4} K^{-1}

$\theta = T_{MCP} - T_{eau} \sim 1°C$

D = longueur caractéristique

Pour 1 bidon, D vérifie l'équation IV.1

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{L} + \frac{1}{\ell} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{D} = \frac{1}{21,5.10^{-2}} + \frac{1}{6.10^{-2}} \qquad \text{(IV.1)}$$

d'où $D = 5.10^{-2}$ m

$$Pr = \frac{0,1}{1120} \frac{1850}{0,19}, \quad \text{soit } P_r = 0,9$$

$$G_r = \frac{(1120)^2 \times 9,81 \times 7.10^{-4} \times 1 \times (5.10^{-2})^3}{(0,1)^2}, \quad \text{soit } G_r \simeq 108$$

Donc $G_r P_r \sim 100$.

FIGURE IV.4

EVOLUTION DES TEMPERATURES DU PEG DANS LE PLAN VERTICAL MEDIAN (4,5,6)

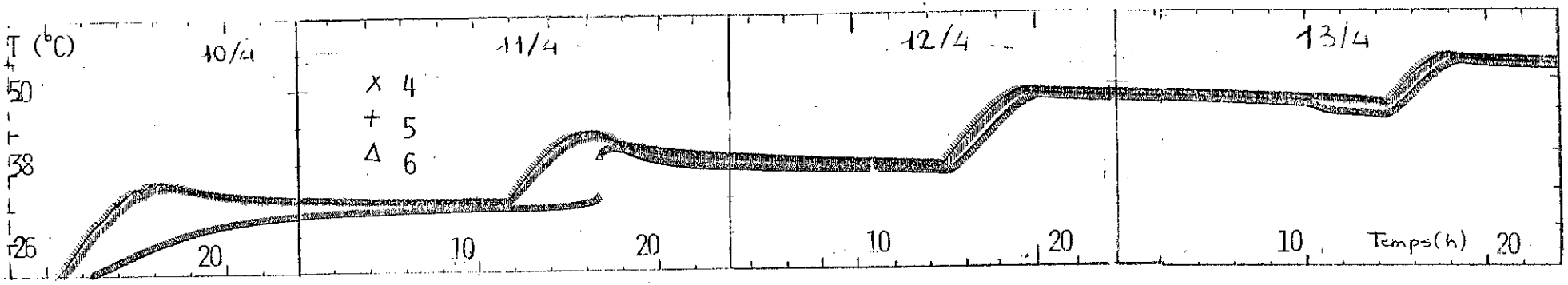
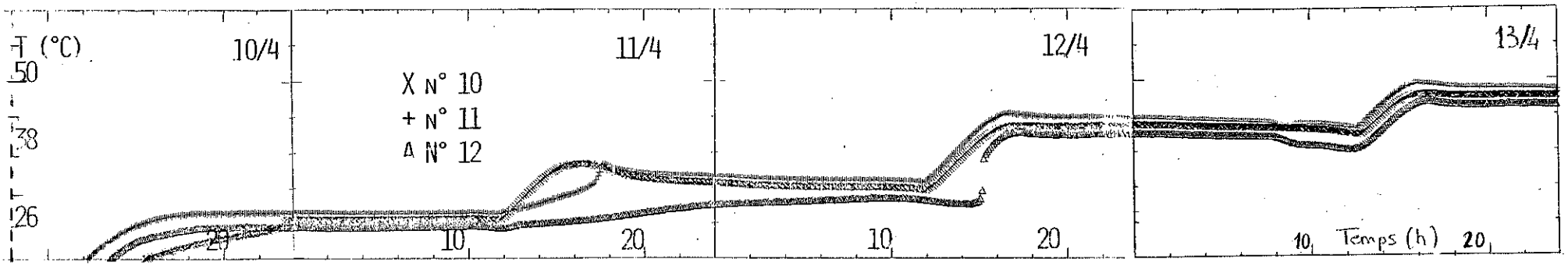


FIGURE IV.5

EVOLUTION DES TEMPERATURES DU PEG DANS LE PLAN VERTICAL DU RETOUR VERS LES CAPTEURS



Le régime de convection est établi pour $GrPr > 10^2$ et il se peut que, pour certains régimes $10^{-3} < GrPr < 10^2$, la convection ne s'établisse pas. Nous sommes donc à la limite mais la figure IV.3 semble prouver que la convection existe, les températures du MCP et de l'eau avoisinante étant presque confondues lorsque le MCP est fondu.

b) La figure IV.4 présente l'évolution des températures du PEG dans le plan vertical médian (voir figure II.8) .

La montée en température du thermocouple 6 est plus lente que les autres le 1er jour. Le 4e et le 5e se suivent de près, sans indiquer de phénomène de fusion. Après la fusion indiquée par le thermocouple 6, nous retrouvons le phénomène de stratification étudié au paragraphe IV.2.1 avec augmentation de l'écart de température lorsque la pompe secondaire fonctionne.

c) La figure IV.5 présente les températures du PEG le long du tuyau de retour de l'eau de la cuve vers l'échangeur (voir figure II.8) .

Il semblerait d'après cette figure que la stratification soit inversée dans cette zone de la cuve, le 10 étant toujours inférieur au 11 en température. La fusion du PEG dans le bidon 12 ne survient que le 3ème jour de charge, l'eau étant probablement plus froide qu'ailleurs.

IV.2.4 Comportement du PEG dans 3 plans horizontaux

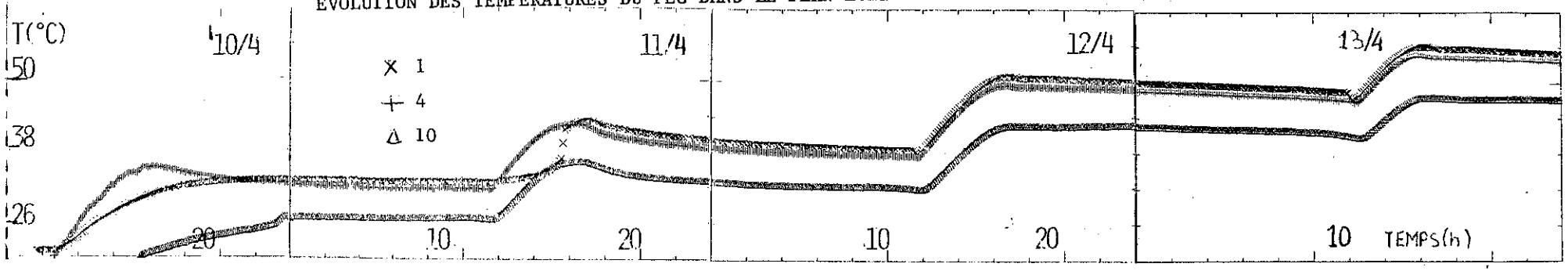
La figure IV.6 montre l'évolution des températures du PEG dans le plan horizontal supérieur.

Cette figure, ainsi que les deux suivantes sont à commenter avec précaution . En effet, nous observons un grand écart de températures entre les thermocouples 1 et 10, mais nous ne pouvons pas en déduire que le gradient de température transversal est important.

En effet, les 12 thermocouples sont reliés par groupes de 6 à 2 sources froides et un contrôle a permis de constater que les 6 derniers thermocouples (6 → 12) avaient été deplacés au niveau de la source froide, probablement au cours d'une visite de l'immeuble, ce qui fait que le point froid de ces thermocouples n'était plus à 0°C.

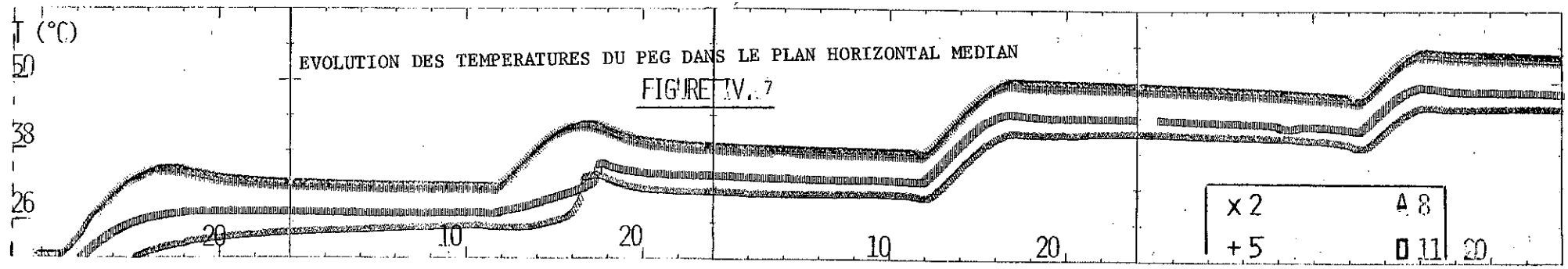
FIGURE IV. 6

EVOLUTION DES TEMPERATURES DU PEG DANS LE PLAN HORIZONTAL SUPERIEUR (voir figure II.8)



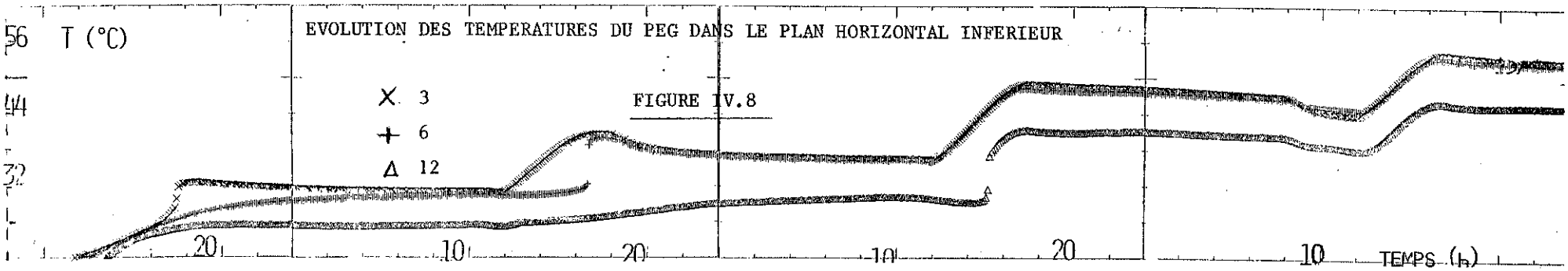
EVOLUTION DES TEMPERATURES DU PEG DANS LE PLAN HORIZONTAL MEDIAN

FIGURE IV. 7



EVOLUTION DES TEMPERATURES DU PEG DANS LE PLAN HORIZONTAL INFERIEUR

FIGURE IV.8



Néanmoins, les six thermocouples étant regroupés à la même source froide et déplacés de la même façon, la comparaison reste possible entre ces six thermocouples, sans pouvoir attacher de crédit à la valeur absolue des températures. C'est l'allure des courbes de températures pendant le déstockage qui nous a permis de détecter cette perturbation (voir paragraphe suivant).

Les courbes de températures de thermocouples placés dans le plan horizontal médian sont présentées sur la figure IV.7.

Le 2 et le 5, sans changement de phase apparent ont un comportement tout à fait similaire. Les 8 et 11 indiquent un changement de phase le 11 avril, et présentent un écart de 2°C.

Pour le plan horizontal inférieur (fig. IV.8), nous retrouvons un comportement identique des 2 thermocouples situés à l'avant de la cuve (3 et 6) sauf au moment de la fusion.

Cette étude plan par plan nous permet de constater un gradient vertical de température à peu près constant de (2° - 3°C) et ne nous permet pas de conclure à un gradient transversal, qui ne pourra être déterminé que par l'étude des températures d'entrée et sortie de l'échangeur, côté secondaire.

IV.2.5. Recapitulatif sur le comportement des 12 thermocouples

Nous avons pu observer sur les figures précédentes que sur les 12 thermocouples, 7 seulement présentaient des allures comparables aux courbes de la figure (II.2). Les 5 autres ressemblent à des courbes de montée en température par chaleur sensible pure. De plus, sur les 7 thermocouples témoignant d'un changement de phase, certains (comme le n°7) présentent une fusion anticipée avec une température de fusion bien inférieure à celle annoncée par le CSTB.

Le tableau IV.1 résume la température de fusion apparente pour les 12 thermocouples.

Tableau IV-1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10.04.80	-	-	27-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11.04.80	37,40	-	-	-	-	32-37	-	30-34	-	-	33-36	-
12.04.80	-	-	-	-	-	-	31-34	-	-	-	-	30-34
13.04.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FIGURE IV.10

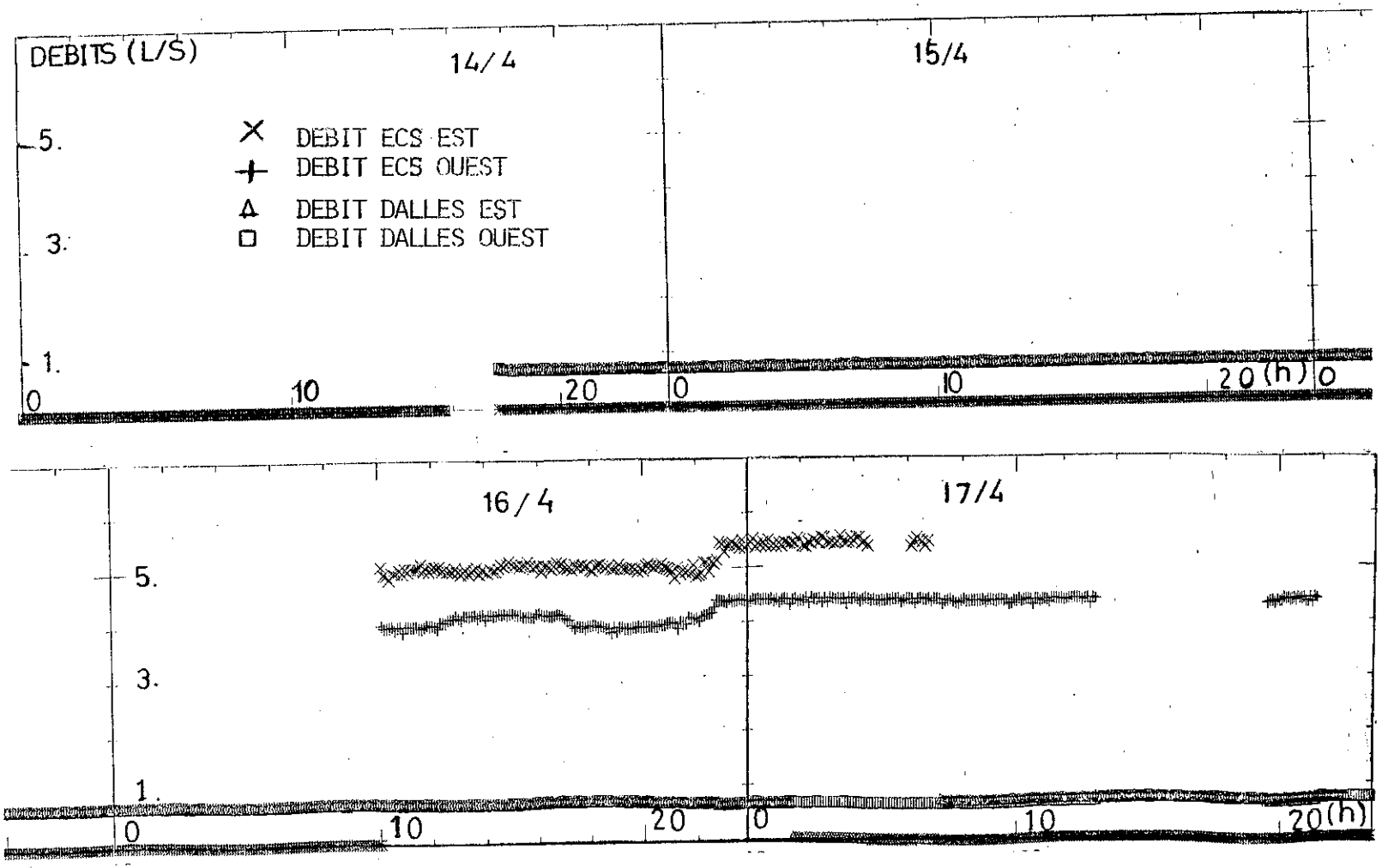

DEBITS (L/S)
14/4
15/4
16/4
17/4
5.
3.
1.
0
10
20
(h)
DEBIT ECS EST
DEBIT ECS OUEST
DEBIT DALLES EST
DEBIT DALLES OUEST

FIGURE IV.11

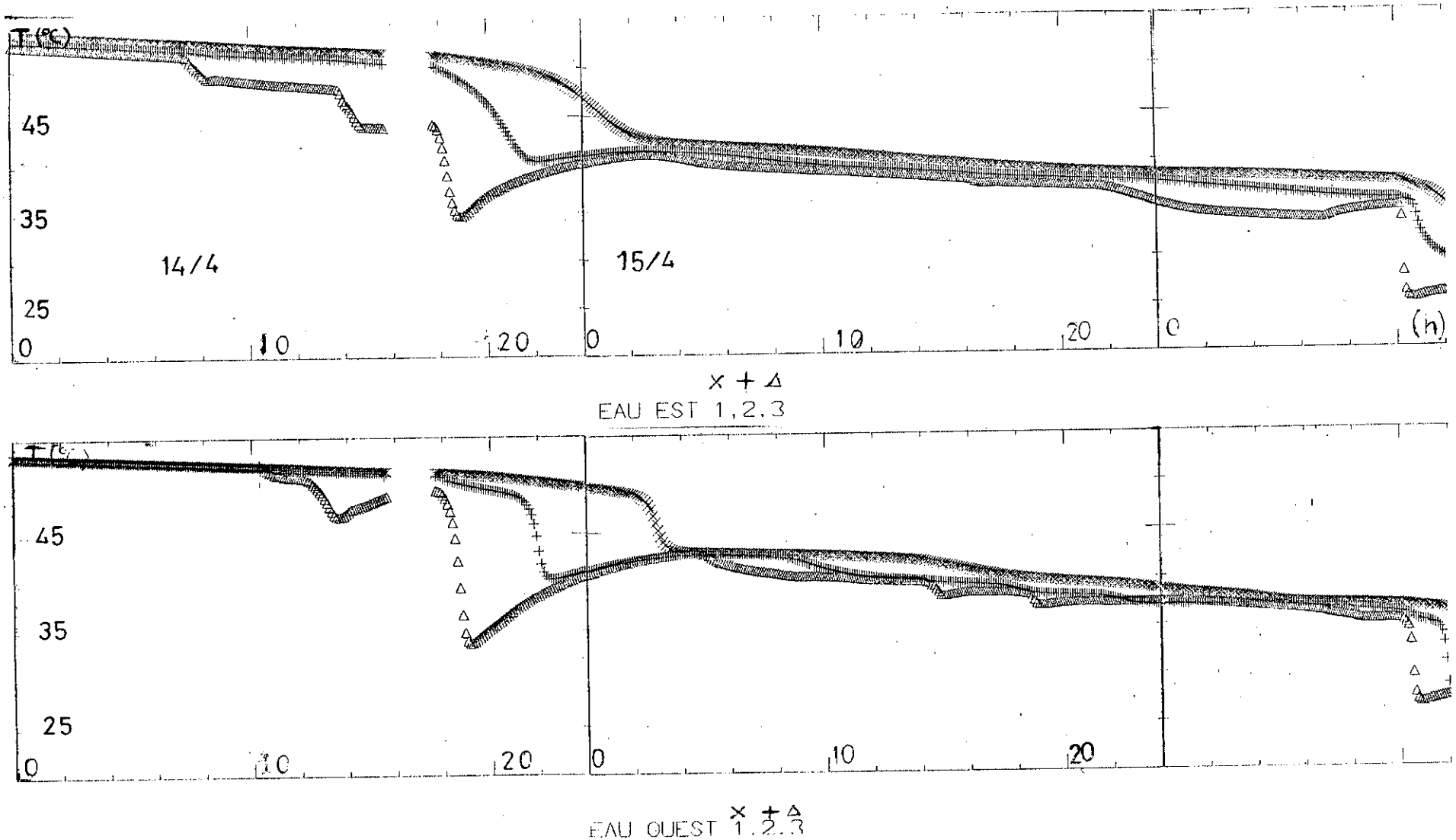
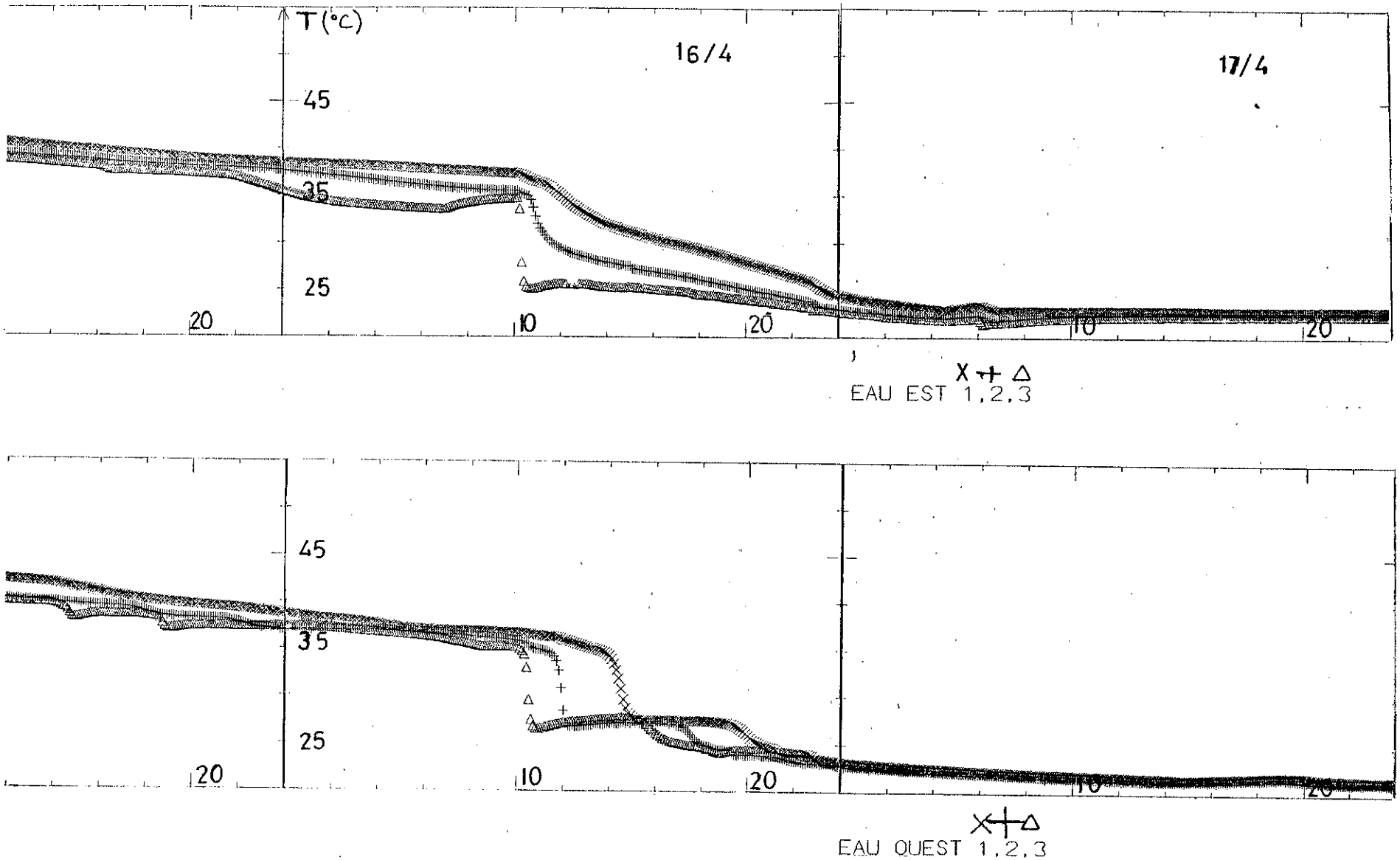

T (°C)
45
35
25
14/4
15/4
0
10
20
0
10
20
0
(h)
× + Δ
EAU EST 1,2,3
T (°C)
45
35
25
0
10
20
0
10
20
× + Δ
EAU OUEST 1,2,3

FIGURE IV.11(SUITE)



Le fait que, sur 12 bidons, 5 semblent contenir de l'eau ne doit pas nous amener à croire que la proportion de bidons remplis d'eau est la même dans toute la cuve. En effet, la présence du thermocouple augmente considérablement les chances de "fuite" au niveau du bouchon. Par ailleurs, une analyse de l'eau dans le circuit secondaire n'a indiqué aucune présence de PEG.

IV-3 ETUDE DES CUVES PENDANT LA DECHARGE SEULE

Après la dernière fermeture de l'échangeur secondaire le 13 avril, les cuves sont restées fermées sur elles-mêmes jusqu'au 14 avril à 18 heures.

Du 14 avril à 18 heures jusqu'au 15 avril à 20 heures, nous avons réchauffé le ballon solaire de l'ECS, mais sans autoriser de soutirage sur ce ballon.

Le 15 avril à 20 heures, l'ECS solaire fonctionne normalement, la distribution de chauffage par les planchers restant toujours interdite.

Le 16 avril à 10 heures, nous avons mis en route la distribution de chauffage dans les dalles.

La figure IV-10, indiquant les débits de l'eau pour les deux demi-immeubles dans le circuit tertiaire et le circuit de préchauffage d'ECS, illustre l'expérimentation.

IV- 3-1 Comparaison des températures d'eau dans chacune des cuves

La figure IV-11 montre l'évolution des températures d'eau pour les 4 niveaux de mesure dans les deux cuves.

Cette figure appelle une remarque préliminaire, indépendamment de la comparaison des comportements des deux cuves. En effet, bien que les cuves soient fermées sur elles-mêmes le 14 avril, nous observons de grosses perturbations sur les températures d'eau au bas de la cuve, à des moments différents. Nous suppu-

FIGURE IV.12

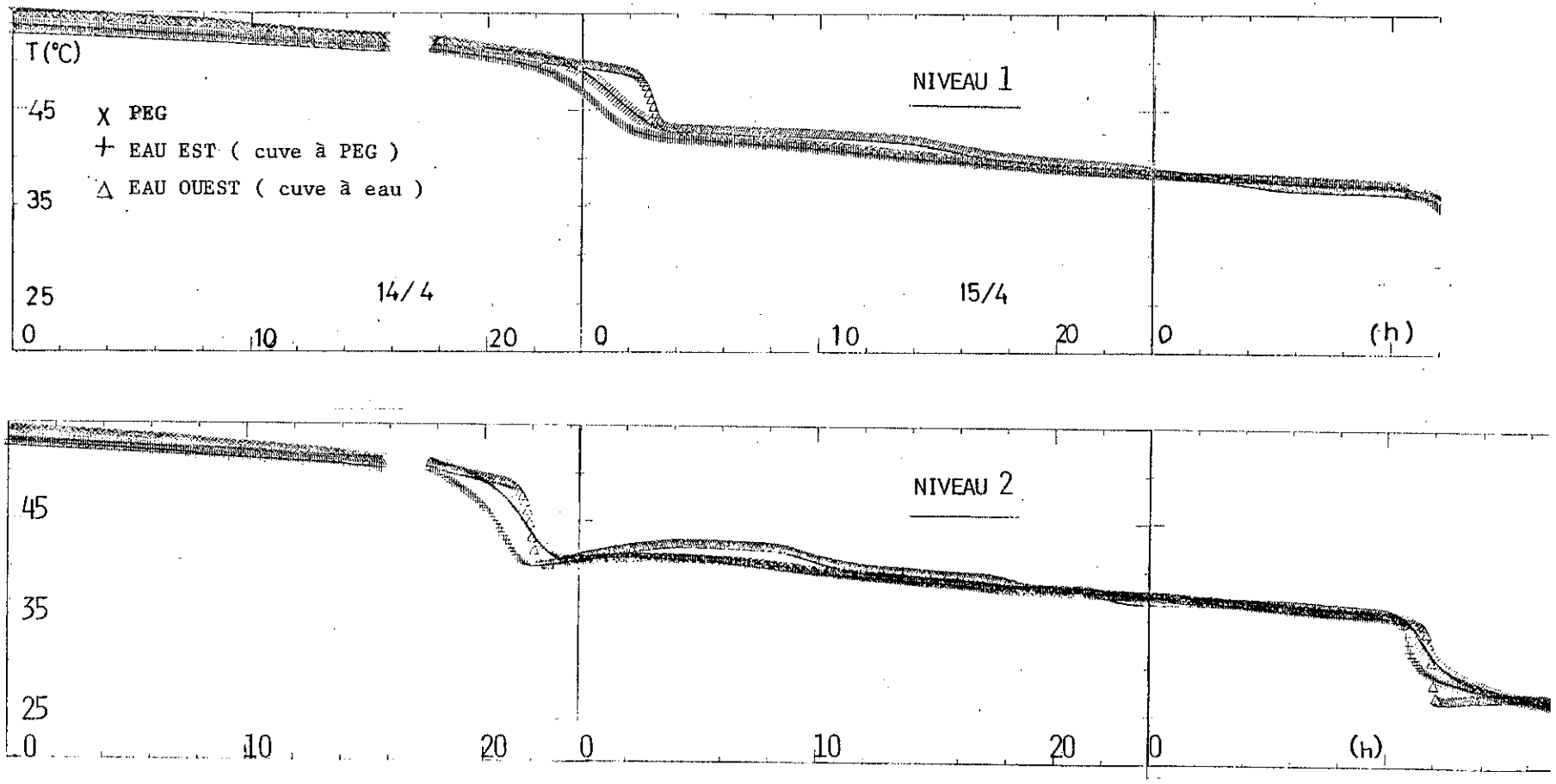

T(°C)
45
35
25
X PEG
+ EAU EST (cuve à PEG)
△ EAU OUEST (cuve à eau)
14/4
15/4
NIVEAU 1
0
10
20
0
10
20
0
(h)
NIVEAU 2
45
35
25
0
10
20
0
10
20
0
(h)

FIGURE IV.12 (SUITE)

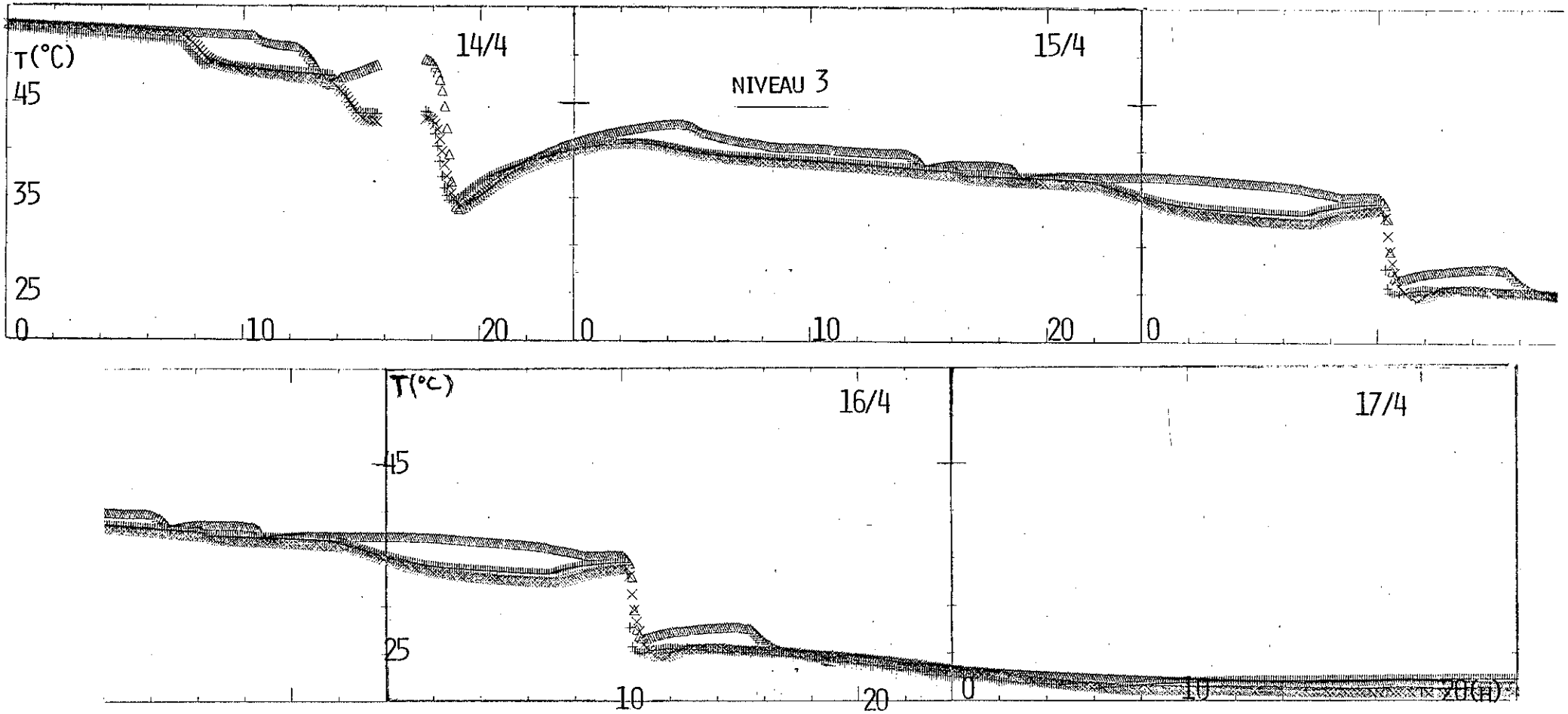
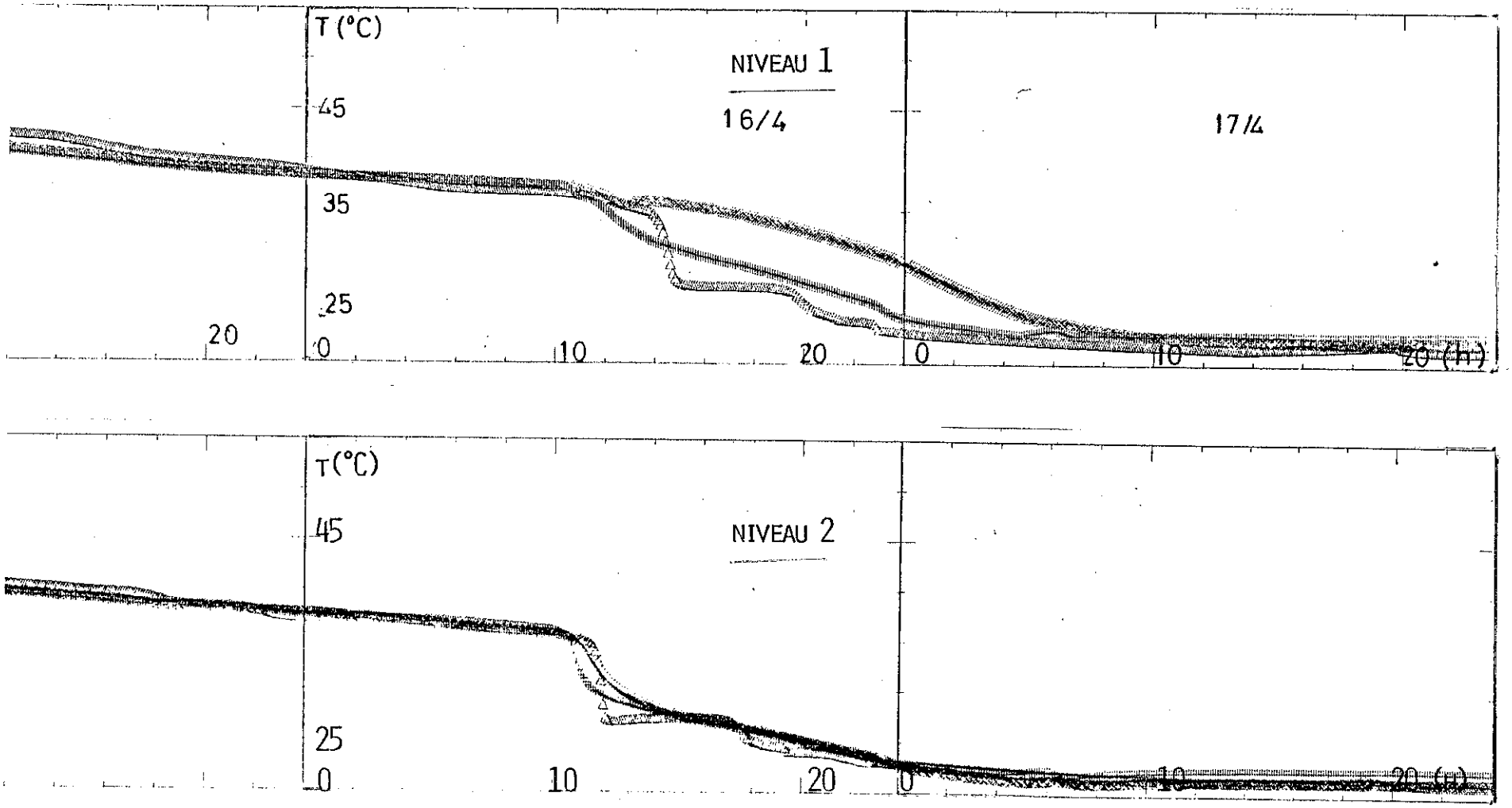


FIGURE IV.12 (SUITE)



tons que ces perturbations sont dues au refroidissement de l'eau dans la tuyauterie extérieure, par l'intermédiaire des brides qui sont à la même température que la chaufferie, soit environ 20°C. Cette eau étant plus lourde que celle du bas de la cuve qui est à environ 50°C, elle descend au fond de la cuve, abaissant la température à cet endroit.

Nous notons que l'équilibre statique des cuves est atteint assez rapidement, les températures d'eau étant tout à fait confondues en Ouest, sauf pour le niveau 4, alors qu'elles sont légèrement décalées en Est. Les deux cuves sont au même niveau de température au départ. Lorsque la pompe solaire ECS se met en marche, les températures de bas de cuve descendent au même niveau, car les ballons solaires sont à la même température des deux côtés. Nous visualisons ensuite très bien dans la cuve Ouest l'eau froide remplacer progressivement l'eau chaude au cours du soutirage, le déphasage étant de deux heures entre les deux niveaux inférieurs et 5 heures entre les deux niveaux supérieurs. La descente en température est très brusque dès qu'elle est amorcée pour redevenir stationnaire ensuite. Par contre en Est, si le phénomène est aussi brutal qu'en Ouest pour le niveau 3 qui est directement sous le retour d'eau froide du tertiaire, nous notons un amortissement de plus en plus net au fur et à mesure que le niveau s'élève dans la cuve.

L'équilibre entre les ballons solaires et les cuves de stockage est atteint le 15 avril vers 6 heures, soit 12 heures après la mise en marche de la pompe.

Lorsque la distribution de chauffage dans les planchers démarre, nous retrouvons les mêmes allures de courbes que lors du démarrage de la pompe solaire ECS, les déphasages entre chaque niveau de cuve étant environ deux fois plus courts, du fait que le débit d'eau dans le circuit tertiaire-dalles est bien supérieur à celui de l'ECS solaire.

La figure IV-12 montre pour les quatre niveaux de mesure les températures de PEG, de l'eau en Est et de l'eau en Ouest, au niveau correspondant. Les courbes du niveau 1 sont très intéressantes car le phénomène de solidification du PEG est très net le 16 avril. Le PEG stationne autour de 35°C alors que la température d'eau diminue beaucoup plus rapidement, l'écart atteignant 5°C. Nous constatons que l'écart entre les températures du PEG et de l'eau avoisinante est plus faible lors de la solidification que lors de la fusion (∿ 8°C). Ceci est dû en partie au fait que les échanges eau-bidon sont moins bons lors de la distribution, le débit d'eau du circuit tertiaire étant inférieur à celui du circuit secondaire, et que, d'autre part, les mouvements de convection naturelle dans le PEG sont absents lors de la solidification.

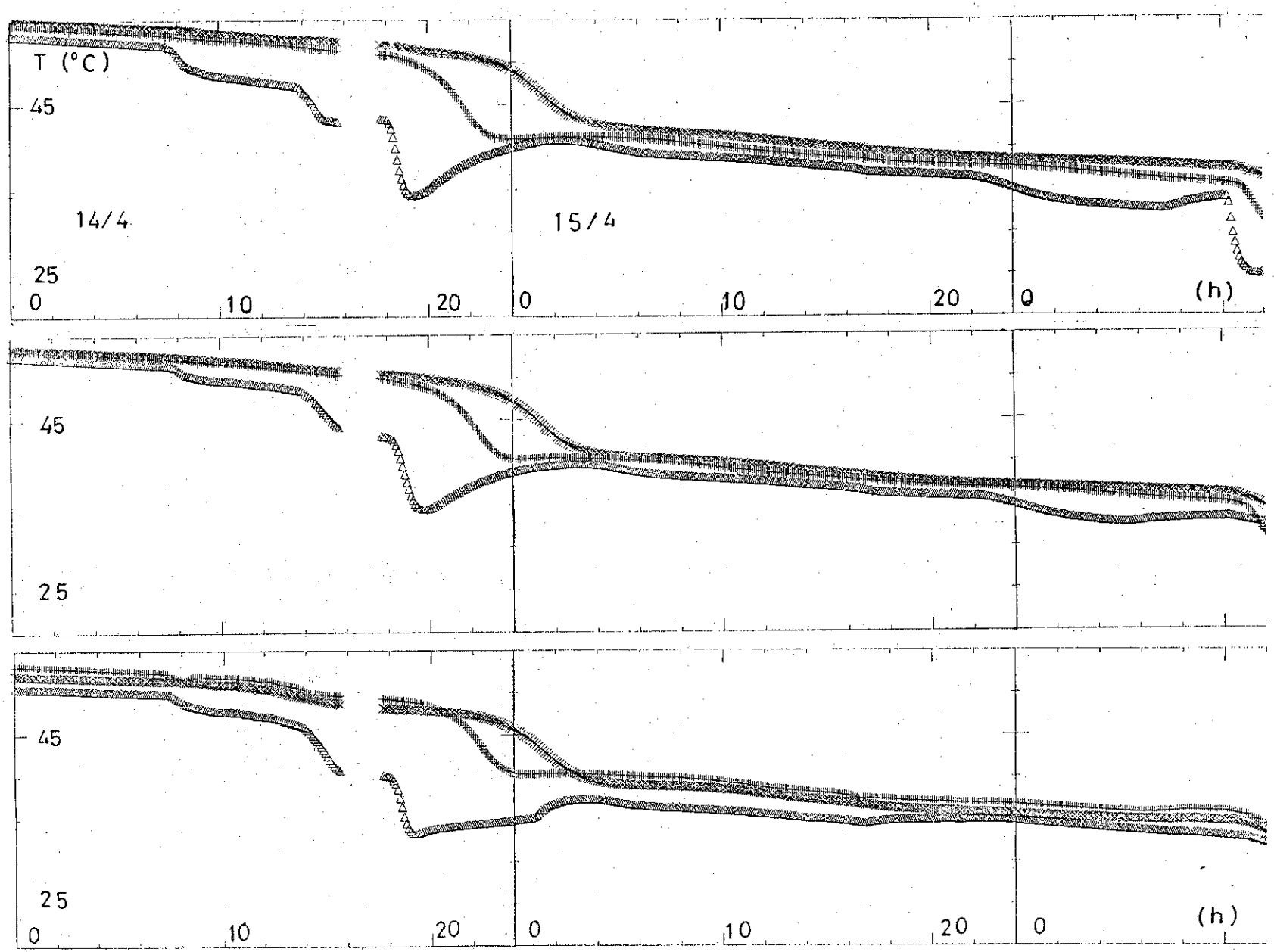


FIGURE IV.13

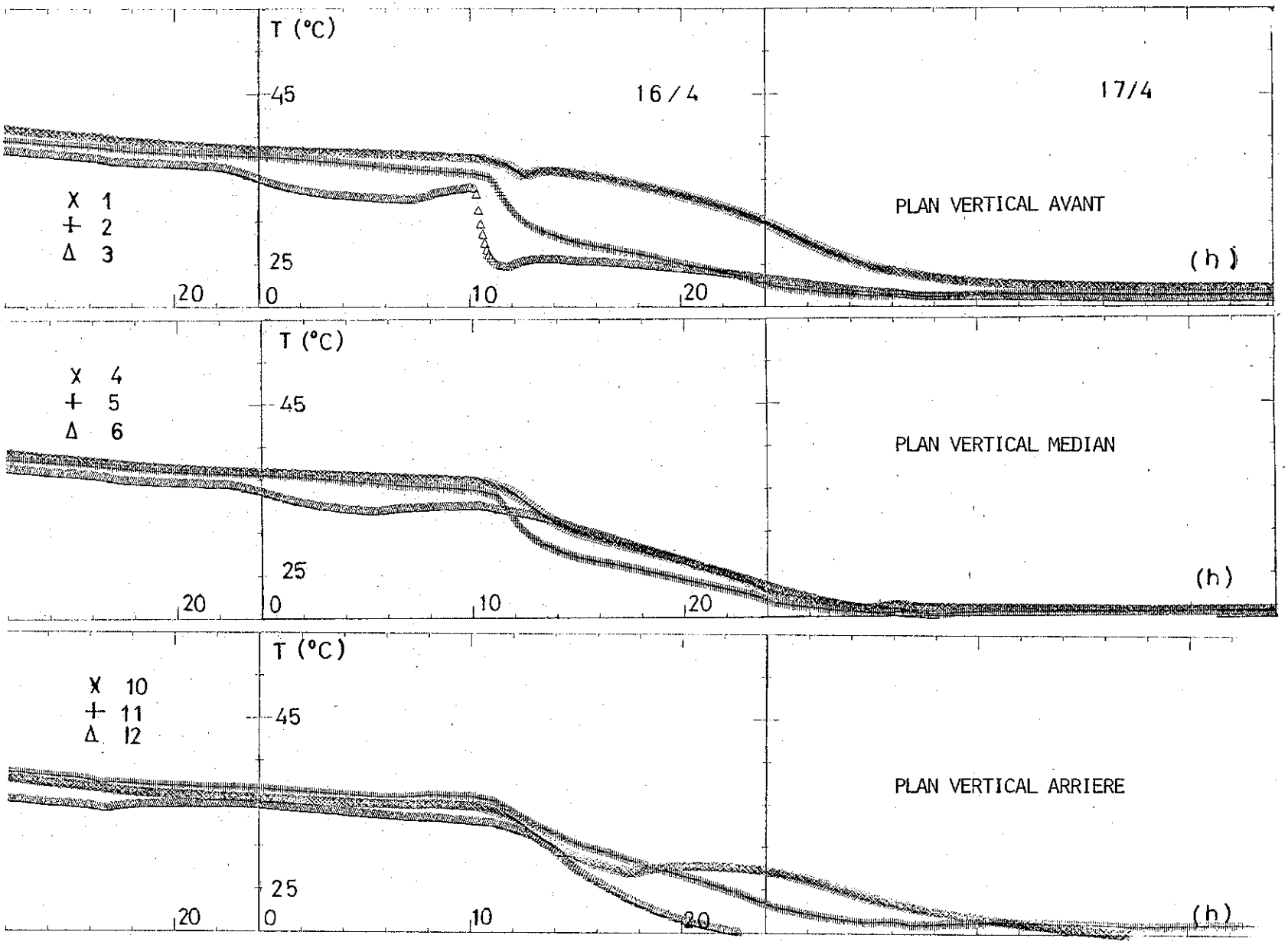


FIGURE IV-13 (suite)

Au niveau 3 le phénomène de solidification est masqué par l'équilibre général de la cuve autour de 35°C avant que le chauffage ne soit distribué dans les dalles.

IV-3-2 Etude du PEG dans chaque plan vertical

La figure IV-13 montre l'évolution des températures de PEG pour trois plans verticaux. Nous remarquons une anomalie en ce qui concerne les courbes de températures des thermocouples 10 - 11 - 12. En effet, la température dans les trois bidons est très basse par rapport aux autres et il serait étonnant que le PEG à cet endroit soit à 15°C le 17 avril alors que tout le reste de la cuve est à 20°C.

De même, nous observons pour le thermocouple 10 le même phénomène de solidification observé pour le thermocouple 1, mais à 28°C, ce qui est certainement faux. L'explication de ces anomalies donnée dans le paragraphe IV.24, est attribuée à une mauvaise définition de la source froide.

Nous remarquons que pour chaque plan vertical, les courbes ont exactement la même allure, tant que l'eau ne circule pas dans les planchers, avec des amplitudes décroissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'avant de la cuve.

Lorsque l'eau se met à circuler dans les dalles, la ressemblance cesse car les phénomènes de solificiation interviennent, comme nous pouvons le constater notamment pour les thermocouples 1, 6 et 10.

IV.4 RECALAGE DU MODELE

Nous avons testé le modèle prévisionnel décrit dans le chapitre III sur la journée du 11 avril, qui présentait une bonne similitude avec les conditions initiales imposées par le modèle : MCP entièrement solide à la température de fusion et eau également à la température de fusion.

Au lieu d'utiliser la puissance irradiée comme donnée, nous injectons la puissance effectivement entrée dans la cuve.

La figure IV14 montre l'évolution de la température d'eau calculée pour différentes valeurs du coefficient d'échange h_0 entre l'eau et les bidons, la valeur de la température d'eau mesurée étant portée en pointillés.

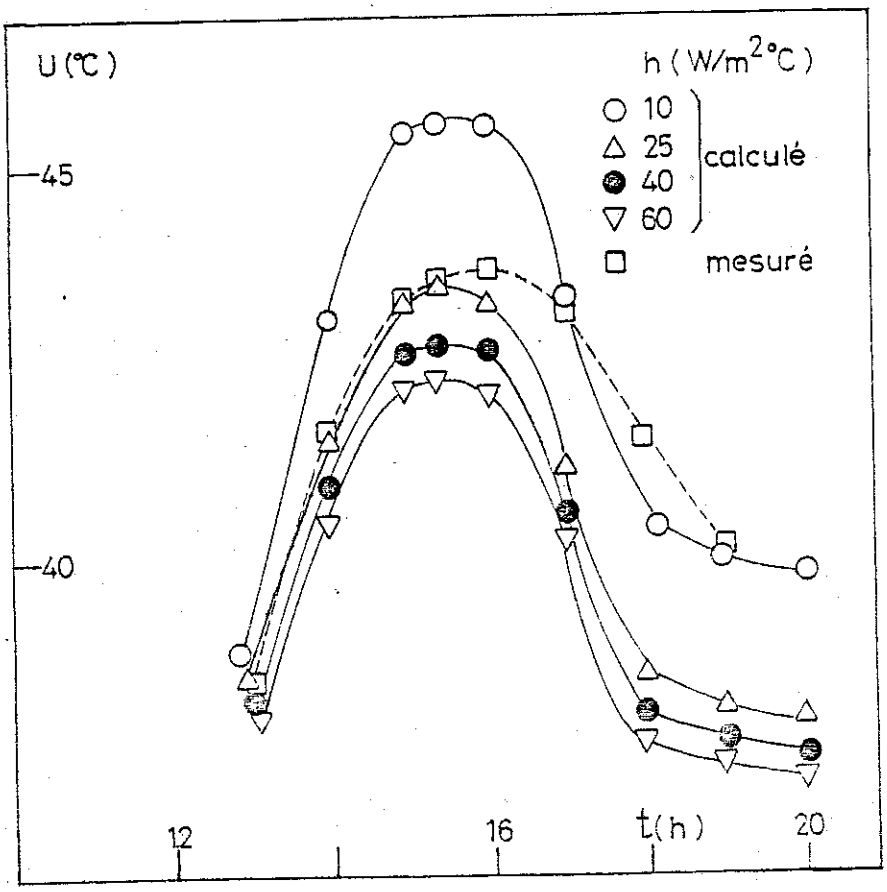
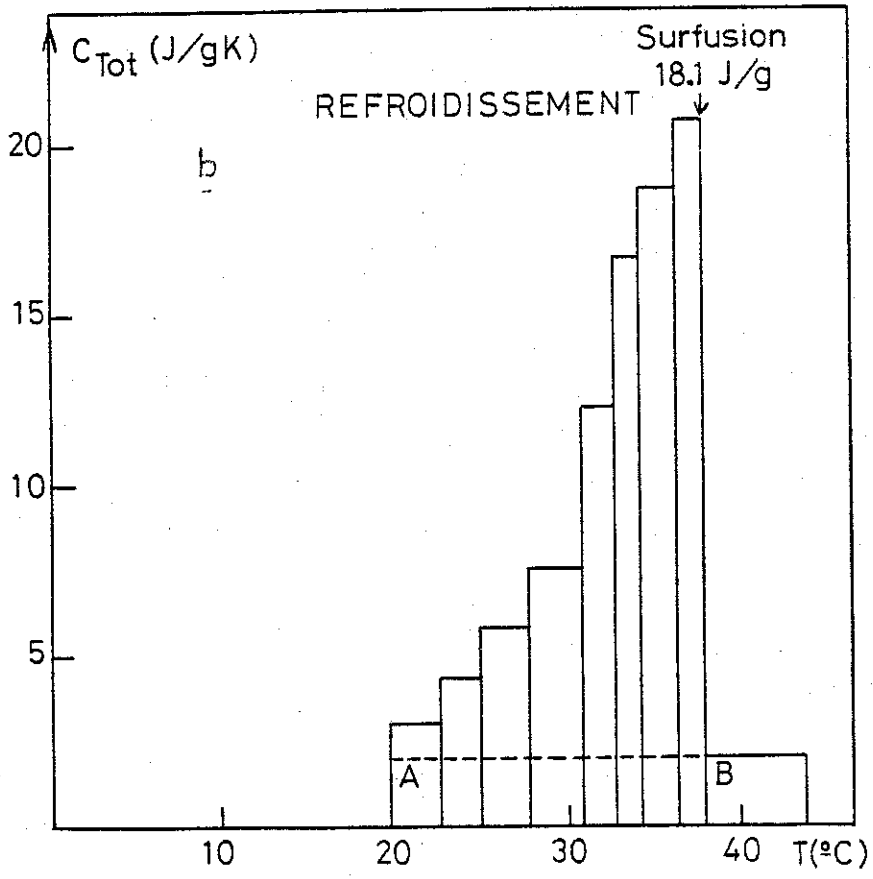


FIGURE IV.14

Températures de cuve calculées en fonction du temps



Nous constatons que la meilleure corrélation est obtenue, lors de la montée en température, pour h_o = 23 W/m°C. Nous retrouvons donc bien la valeur moyenne calculée dans le chapitre III.

Dès que la pompe secondaire s'arrête, les températures calculées et mesurées évoluent très différemment. La température calculée par le modèle redescend beaucoup plus rapidement que celle mesurée. L'explication est simple lorsque nous observons les figures du chapitre IV. En effet, le MCP ne reste jamais à sa température de fusion pendant la montée en température, mais est soumis également à une élévation de température. Cela signifie que la fusion ne s'effectue pas franchement à 35-36°C, mais sur un palier beaucoup plus large et que l'énergie stockée dans le MCP est un mélange de chaleur latente de fusion et de chaleur sensible. Cela explique également les difficultés rencontrées par le CSTB pour mesurer au calorimètre différentiel la chaleur spécifique du PEG, celle-ci variant à chaque mesure (10) et le CSTB ne nous a donné que des valeurs moyennes pour la chaleur spécifique (Ch.II). Nous nous sommes alors adressés à M. Laurent du Laboratoire de Physique Industrielle de l'INSA de Lyon pour refaire les mesures des caractéristiques du produit, avec le calorimètre spécifiquement conçu par lui-même pour les matériaux à changement de phase (24).

La figure IV.15 montre les variations de la chaleur spécifique apparente en fonction de la température.

FIGURE IV.15

a- fusion ⟶

b- solidification ⟵

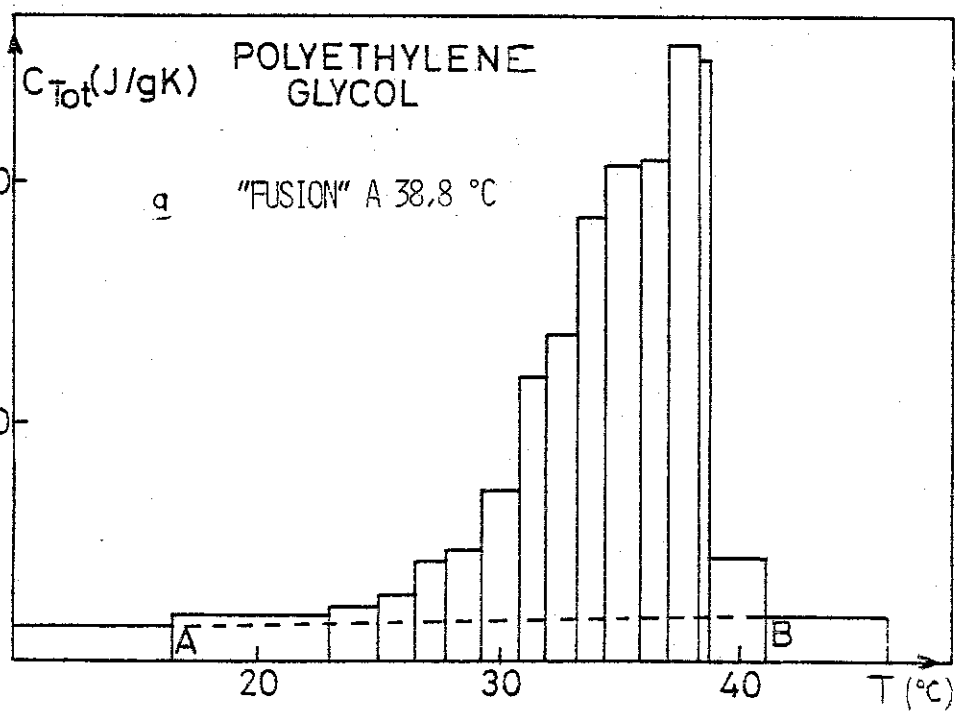
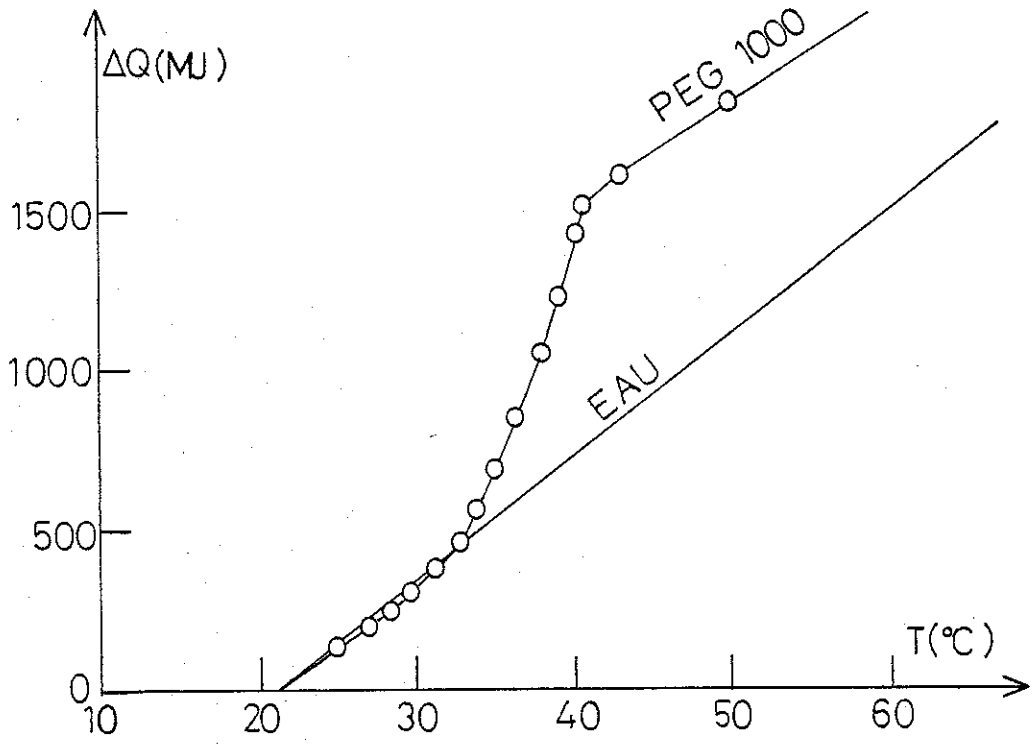


FIGURE IV.16

ENERGIE STOCKEE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CUVE



Ces mesures, faites sur un échantillon d'environ 100 g de matériau, avec une vitesse de montée en température de 1°C/h, donnent des résultats assez différents de ceux obtenus par le CSTB, pour de faibles quantités de matériau et sur cycle rapide.

Nous observons en effet un étalement de la fusion de 23 à 38,8°C, probablement dû à un mélange de polymères de masses moléculaires différentes.

L'énergie stockée correspondante n'est plus celle indiquée par la figure II.3 , mais celle représentée sur la figure IV.16.

IV.5 CONCLUSIONS

Il ressort 3 points essentiels de ce chapitre sur l'expérience de charge et décharge séparées du stockage :

- La présence du MCP abaisse effectivement la température moyenne de la cuve pendant la charge, même quand le matériau est fondu, et abaisse par conséquent la température de fonctionnement des capteurs, donc leur rendement.

- Pendant la décharge, au contraire, le PEG retarde l'abaissement de température de l'eau dans la cuve, à cause du processus de solidification.

- Les phénomènes d'échanges entre l'eau et les bidons présentent un caractère très localisé à cause des vitesses variables de l'eau à l'intérieur de la cuve et soulignent l'inutilité d'utiliser un modèle qui suivrait de très près une cinétique de fusion en le généralisant à tous les autres bidons.

Par ailleurs les mesures nous ont permis de critiquer les prévisions de notre premier modèle de calcul des temps de fusion et des températures d'eau, et d'élaborer un modèle plus complet, décrivant mieux les processus réels et faisant l'objet du chapître suivant.

CHAPITRE V - MODELE ENTHALPIQUE

Le modèle précédent présente plusieurs inconvénients majeurs :

- Les conditions initiales ne correspondent pratiquement jamais aux conditions réelles.
- La fusion seule du MCP est considérée(à température constante), alors que le phénomène est doublé d'élévation de température du MCP par chaleur sensible, et se fait sur une plage de 15°C.
- La température calculée pour l'eau est une température moyenne de cuve sans tenir compte séparément des températures d'entrée et de sortie de l'"échangeur eau-MCP".

Nous avons cherché un modèle décrivant les échanges de la cuve en tenant compte de tous ces facteurs, et permettant de calculer, à la fois l'évolution de la température d'eau à la sortie de la cuve et la température du MCP (qui ne reste donc plus à la température de fusion), ainsi que les énergies stockées par l'eau et le MCP, en injectant la température de l'eau à l'entrée de la cuve mesurée toutes les 6 minutes.

V.1 DESCRIPTION DU MODELE

Dans la cuve réelle, deux couches de bidons successives, de 6 cm d'épaisseur chacune, sont séparées par 3 cm d'eau. La cuve simulée est une cuve de même longueur que la cuve réelle (L = 3,90 m), contenant comme pour le modèle précédent une seule couche de MCP de 6 cm entourée de deux couches d'eau de 1,5 cm chacune (fig. V.1), et de largeur telle que le volume reste inchangé.

- La circulation d'eau se fait par nappe le long de l'axe Ox et nous négligeons les gradients de températures dans les plans transversaux ($\partial T_e/\partial y = \partial T_e/\partial z = 0$), les gradients réels ne dépassant pas 3°C comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent.

- Seule la conduction perpendiculaire à l'écoulement est considérée.

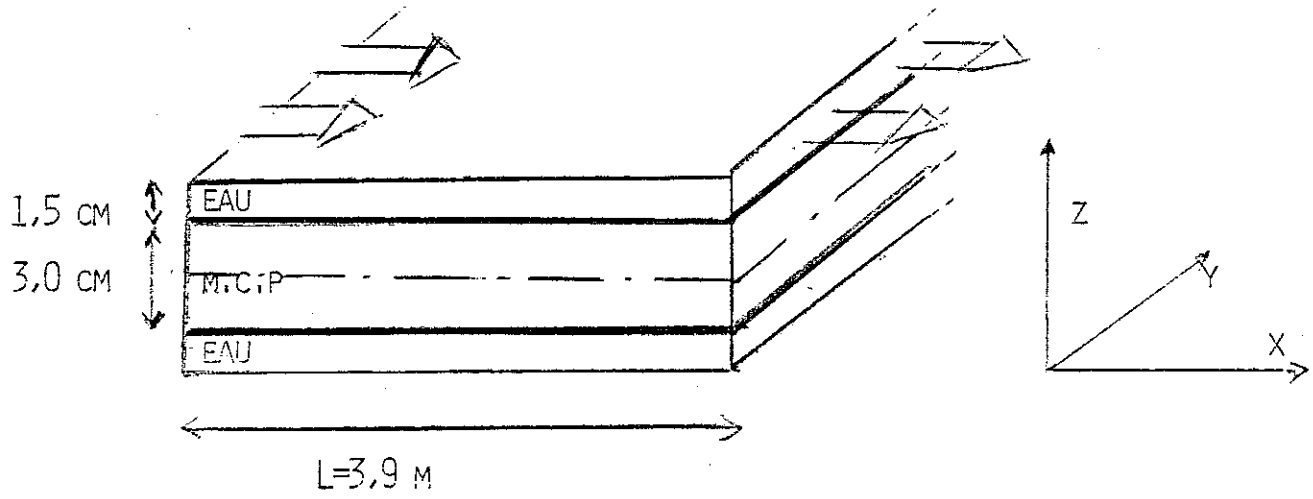


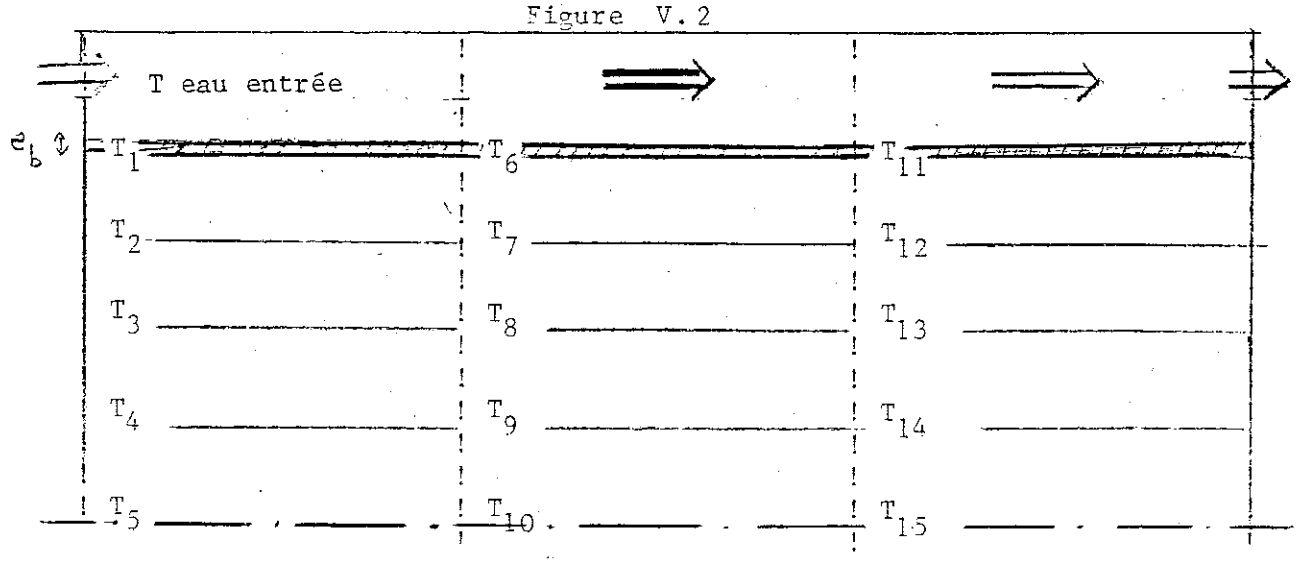
FIGURE V.1

SCHEMA DE LA CUVE SIMULEE

- Les phénomènes de convection naturelle sont négligés et la cuve simulée comporte une symétrie par rapport au plan médian horizontal.

Pour le calcul, nous découpons la cuve en 3 tranches verticales, l'eau parcourant 1/3 de la cuve pendant les 6 minutes séparant 2 mesures. La température de l'eau est supposée uniforme dans chaque tranche. Dans chacune des tranches, le MCP est découpé en 4 couches horizontales (fig. V.2), la température du MCP étant supposée uniforme dans chacune des couches.

Figure V. 2



Nous n'utilisons pas de chaleur latente de fusion mais une chaleur spécifique variable CP(J,N), le 1er indice se rapportant à l'espace, le 2ème au temps . (Les notations non spécifiées ci-dessous sont les mêmes que pour le chapitre III).

TE (I,N) = Température de l'eau dans la $i^{ème}$ tranche (I = 1 à 4) pour la $n^{ème}$ mesure (N = 1 à 240),

avec TE(1,N) : Température mesurée de l'eau entrant dans la cuve lorsque la pompe secondaire fonctionne.

TE(2,N),T(3,N) : Température d'eau calculée dans la 2ème et 3ème tranche.

TE(4,N) : Température de l'eau calculée à la sortie de la cuve.

TMCP(J,N) = Températures de MCP pour la $n^{ième}$ mesure,

avec J = 1 à 5 pour la 1ère tranche verticale
J = 6 à 10 pour la 2ème tranche verticale
J = 11 à 15 pour la 3ème tranche verticale

QMCP(I) = Energie stockée dans la $i^{ème}$ tranche verticale (I = 1 à 3).

QP(I) = Pertes vers la chaufferie pour la $i^{ème}$ tranche verticale (I = 1 à 3).

La répartition des températures d'eau et de MCP est connue à t = 0. Les équations décrivant les transferts thermiques sont les suivantes :

Pour le MCP

- Interface MCP-bidon (T(1,N))

$$m_s C_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = hS(T_e - T_s) - k_s S \frac{\partial T_s}{\partial z} \qquad (V.1)$$

avec $\frac{1}{h} = \frac{1}{h_o} + \frac{e_b}{k_b}$ quand la pompe secondaire marche

$h = \frac{k_b}{e_b}$ à l'arrêt

L'équation (V.1) discrétisée devient :

$$MS \times CP(1) + \left| \frac{TMCP(1,N+1)-TMCP(1,N)}{\Delta t} \right| = H*S* \left| TE(1,N) - TMCP(1,N) \right| - COND*S* \left| \frac{TMCP(1,N)-TMCP(2,N)}{EP} \right| \qquad (V.2)$$

CP(J,N) est calculé d'après la température moyenne de la $i^{ème}$ couche

$$TM(I,N) = \frac{TMCP(I,N)+TMCP(I+1,N)}{2} \qquad (V.3)$$

Pour les couches suivantes, l'équation classique de conduction de la chaleur :

$$\rho_s C_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

se traduit par :

$$DENS*CP(J) + \left| \frac{TMCP(I,N+1)-TMCP(I,N)}{\Delta t} \right| = \frac{COND*}{(EP)^2} \left| \begin{array}{l} TMCP(I+1,N)-2* \\ TMCP(I,N)+TMCP(I-1,N) \end{array} \right| \qquad (V.4)$$

Energie stockée dans le MCP

Connaissant la répartition de la température dans les 4 couches de MCP de la 1ère tranche, nous pouvons calculer l'énergie stockée par le MCP dans cette tranche.

$$QMCP(I,N) = \sum_{J=1,4} MS*CP(J)*(TM(J,N)-TM(J,N-1)) \qquad (V.5)$$

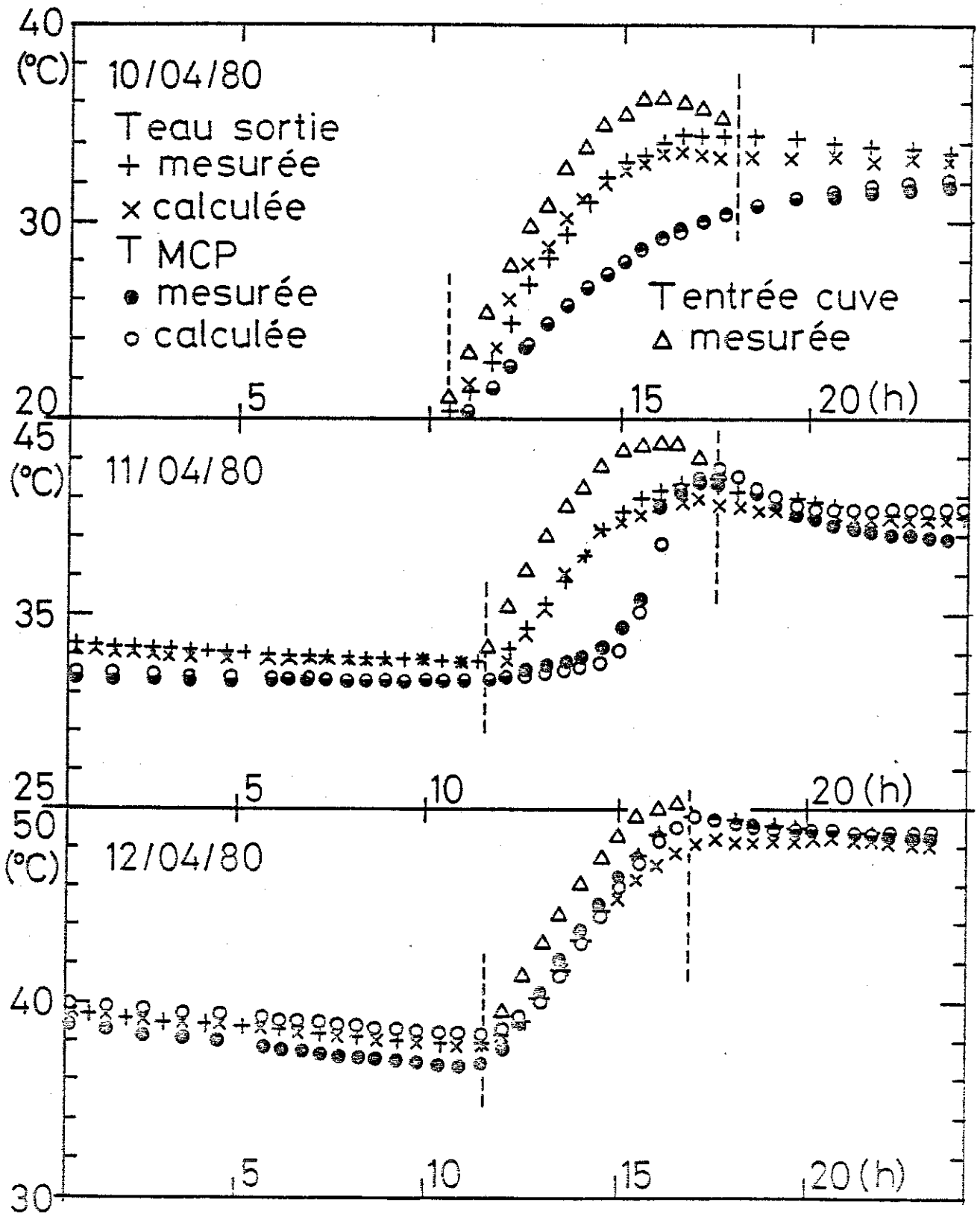
Pertes latérales de la cuve

$$QP(I,N) = hS* \left| TE(I,N) - TCH(N) \right| *\Delta t \qquad (V.6)$$

hS : Coefficient de pertes de la cuve, de même valeur que dans le chapitre III en W/m^2, de valeur différente selon que la pompe fonctionne ou non.

TCH(N) : Température de chaufferie.

FIGURE v.3


40
(°C)
10/04/80
Teau sortie
+ mesurée
× calculée
T MCP
● mesurée
○ calculée
Tentrée cuve
△ mesurée
30
20
5
15
20 (h)
45
(°C)
11/04/80
35
25
5
10
20 (h)
50
(°C)
12/04/80
40
30
5
10
15
20 (h)

Température d'eau

Nous pouvons déduire des équations précédentes la température de l'eau dans la tranche suivante, à l'instant suivant quand la pompe fonctionne :

$$TE(I+1,N+1) = TE(I,N) - \frac{QMCP(I,N)}{m_e C_{p_e}} - \frac{QP(I,N)}{m_e C_{p_e}} * \Delta t \qquad (V.7)$$

Lorsque la pompe ne fonctionne pas, la température d'eau dans la cuve est supposée uniforme, et la température d'eau à l'instant suivant est calculée par l'équation V.7 en remplaçant le premier membre par TE(I,N+1).

L'organigramme et le listing du programme sont en annexe.

V.2 RESULTATS

La figure (V.3) montre les températures d'eau et de MCP, calculées par le modèle, et les mêmes températures mesurées (au niveau 1 pour le MCP).

La température d'entrée de l'eau mesurée dans la cuve est également représentée.

Ces résultats appellent plusieurs commentaires :

- L'écart entre les températures mesurées et calculées n'excède pas 1°C.
- L'écart lors de la montée en température commence à apparaître lorsque la température d'entrée ne s'élève presque plus. La température d'eau mesurée continue à monter jusqu'à l'arrêt de la pompe secondaire alors que la température calculée redescend. Le 11 et le 12 avril, la température du MCP calculée devient alors supérieure à la température d'eau.

Ce modèle donne donc une bonne corrélation avec les mesures pour la charge seule du stockage et la décharge statique de la cuve (c'est à dire par pertes latérales, sans distribution dynamique d'énergie). Nous ne pouvons pas tester ce modèle tel quel, pour la décharge seule ou pour la charge et la décharge simultanées, à cause des difficultés de simulation de la vanne 3 voies du circuit tertiaire-dalles.

Néanmoins, l'intérêt du modèle est justement de pouvoir s'intégrer comme subroutine dans un programme de simulation de systèmes solaires actifs tels que TRNSYS.

Nous nous proposons de l'utiliser pour étudier l'influence de la température de consigne de départ de l'eau dans les planchers, et comparer le polyethylène glycol et la chliarolithe.

T R O I S I E M E P A R T I E

STOCKAGE A CHANGEMENT DE PHASE

ET SYSTEME SOLAIRE

+++++++++

MOIS	Coté	Nb. de jours de mes.	$\overline{T_{ext.}}$	ENERGIE SOLAIRE (MJ) Irrad. globale vertic.	Energie stockée	Energie distribuée Dalles	E.C.S.	Total	$\overline{T_{cuve}}$	ELECTRICITE FOURNIE Chauff.	E.C.S.	Total	Pompe	Cons. domest	BILANS Cons. totale	Apports solaires %	Rend.l système %
Avril 1979	E	26	9.9	36 833	16 658	10 058	1 003	11 061	25.8	2 182	4 484	6 666	8 460	3 332	25 289	43.7	29.2
	O				15 609	13 149	2 492	15 641	26.2	2 695	5 748	8 437		3 332	31 640	49.4	38.8
Mai	E	30	14.9	43 376	14 258	7 051	1 755	8 806	32.1	651	4 816	5 417	10 800	2 340	21 813	39.4	19.2
	O				13 908	8 834	2 580	11 414	32.6	1 038	6 488	7 526		3 600	27 940	40.9	23.9
Juin	E	28	18.3	42 109	7 006		1 968	1 968	42.7	0	2 742	2 742	8 280	3 276	12 126	16.2	5
	O				8 671		2 371	2 371	38.8	43	3 881	3 924		2 700	13 135	18.1	6.3
Juillet	E	16								0	2 622	2 622	7 341	2 783			
	O									0	4 090	4 090		1 807			
Aout	E	7								22	2 558	2 680	6 494	2 538			
	O									0	3 672	3 672		1 544			
Septemb.	E	29	16.5	64 573	11 556		3 929	3 929		95	2 992	3 087	6 280	3 719	13 875	28.3	6.3
	O				10 004		957	957		845	4 762	5 607		3 121	12 825	7.5	14.8
Octobre	E	29	13.7	30 009	10 467	7 059	1 877	8 936	33.2	423	4 381	4 804	7 866	4 205	17 945	65	29.8
	O				10 951	9 408	1 732	11 140	30.6	1 477	4 808	6 285		4 134	21 559	63.9	36.5
Novembre	E	25	5.7	20 172	9 574	7 411	827	8 239	19.9	12 100	5 866	17 966	6 593	4 208	30 412	31.4	40.8
	O				8 079	7 310	981	7 291	21.1	14 486	5 501	19 987		3 874	31 552	26.7	36.1
Décembre	E	30	5.8	25 181	14 350	11 955	1 290	13 245	20.3	7 600	4 896	12 496	6 333	12 180	37 921	51.1	52.6
	O				12 115	11 535	1 149	12 684	22.1	9 551	5 968	15 519		10 742	38 945	45.0	50.4
Janvier 80	E	31	2.3	23 022	8 523	6 037	1 550	7 587	19.3	23 734	5 504	29 238	6 485	2 164	38 989	20.6	33.0
	O				8 538	6 069	1 328	7 397	19.3	25 855	6 413	32 268		4 301	43 966	18.6	32.1
Février	E	29	7.4	41 220	18 131	16 593	1 690	18 283	21.7	10 256	4 799	15 055	6 905	3 355	36 693	54.8	44.4
	O				18 002	18 564	1 581	20 145	22.7	10 411	5 764	16 175		1 040	37 360	55.5	48.9
Mars	E	29	7.1	32 731	14 310	11 284	1 474	12 758	20.4	10 940	4 707	15 647	7 465	3 365	31 770	44.9	39.0
	O				13 404	9 984	1 316	11 300	21.4	10 987	5 909	16 896		3 453	31 649	40.1	34.5
Total ou Moyenne	E			359 231	113 277	77 446	13 434	90 882	26.1	67 886	42 195	110 081	69 187	38 425	252 968	40.8	32.6
	O				100 277	83 853	15 530	99 383	26.1	76 543	50 474	127 557		37 176	277 746	39.8	34.2

TABLEAU VI.1

CHAPITRE VI - COMPARAISON DES DEUX SYSTEMES DE STOCKAGE SUR UN AN

Du 3 avril 1979 au 30 mars 1980, le système solaire a fonctionné symétriquement dans les 2 demi-immeubles, avec la cuve de stockage à MCP en Est et une cuve à eau de 10 m^3 en Ouest.

La distribution de chauffage dans les planchers a été arrêtée du 20 mai au 19 octobre, période pendant laquelle le stockage n'a donc fourni que la base d'eau chaude sanitaire.

Nous n'avons pas de résultats comparatifs de juillet à septembre, à cause d'incidents de mesure et l'arrêt du système solaire en Ouest, consécutif à une panne du moteur de la pompe du circuit primaire.

VI .1. BILANS GLOBAUX MENSUELS

Les bilans globaux mensuels apparaissent dans le tableau VI .1, ainsi que les rendements et les températures mensuelles de cuve , à l'exclusion des mois de juillet et août. Les mesures indiquées pour l'électricité sont effectuées sans interruption par compteurs électriques.

VI.1.1 : Discussion des mesures

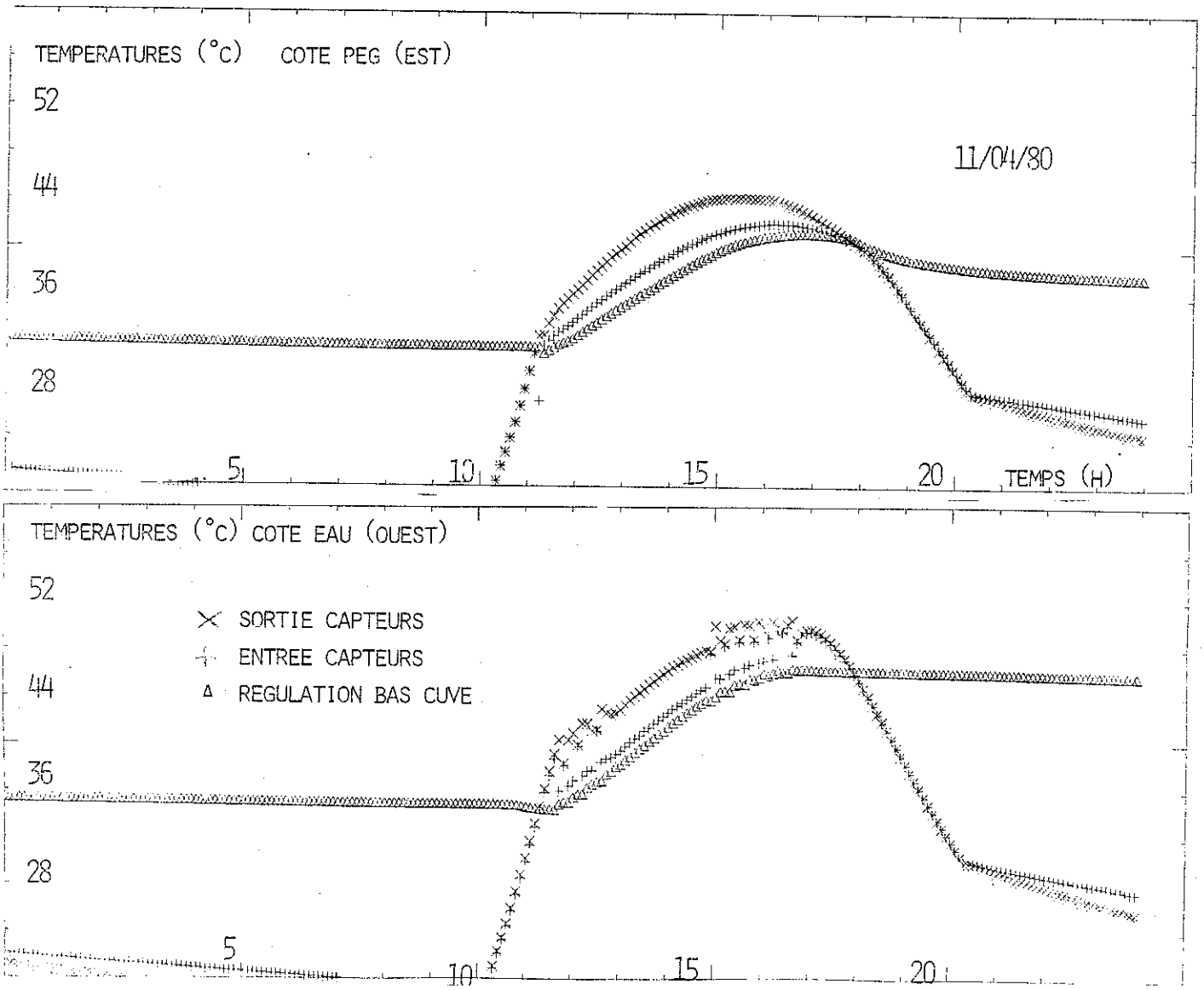
Tout au long de cette année de mesures, les multiples difficultés rencontrées ont fait que certaines des mesures indiquées pour les énergies solaires ne sont pas vraiment fiables.

a) Au niveau du mode d'acquisition des données :

Jusqu'en juin 1979, les données étaient stockées sur des bandes de papier perforé, qui s'arrêtaient souvent et les mesures comportaient de nombreux "trous". En été 1979, l'adaptation de la nouvelle interface pour le stockage des données sur bandes magnétiques a été longue et le système d'acquisition des données n'a été vraiment au point qu'en

FIGURE VI 1

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DES CAPTEURS ET DU BAS DE LA CUVE (REGULATION), DANS CHAQUE 1/2 IMMEUBLE POUR LA JOURNEE DU 11 AVRIL



octobre 1979. Après cette date, nous avons en règle générale, effectivement des mesures toutes les 6 mn sans interruption, sauf en cas de panne fortuite ou lors du changement des bandes, qui ont une autonomie de 15 jours.

b) Au niveau de la régulation :

Nous rappelons le fonctionnement du système de régulation captage-stockage.

La pompe primaire se met en marche dès que la cellule photoélectrique reçoit un ensoleillement supérieur à 50 W/m^2. L'eau glycolée circule alors dans le circuit capteur sans échanger avec le circuit secondaire, jusqu'à ce que la différence de températures de l'eau sortant des capteurs et de l'eau mesurée à 40 cm du bas de la cuve de stockage atteigne un certain ΔT pouvant varier, fixé en général à 5°C, mais théoriquement réglé à 2°C en avril 1979. Dès que ces degrés d'écart sont atteints, la vanne 3 voies du circuit primaire doit s'ouvrir sur l'échangeur et la pompe du circuit secondaire se mettre en marche jusqu'à ce que la différence des deux températures précédentes soit nulle. La pompe du circuit secondaire s'arrête alors et la vanne 3 voies se remet dans la position fermée sur le circuit des capteurs.

La figure VI.1 montre pour la journée du 11 avril 1980, l'évolution des températures d'entrée et de sortie d'eau des capteurs et de la température d'eau dans le bas de cuve de stockage, c'est-à-dire la plus proche de celle sur laquelle est basée la régulation, pour les deux demi-immeubles.

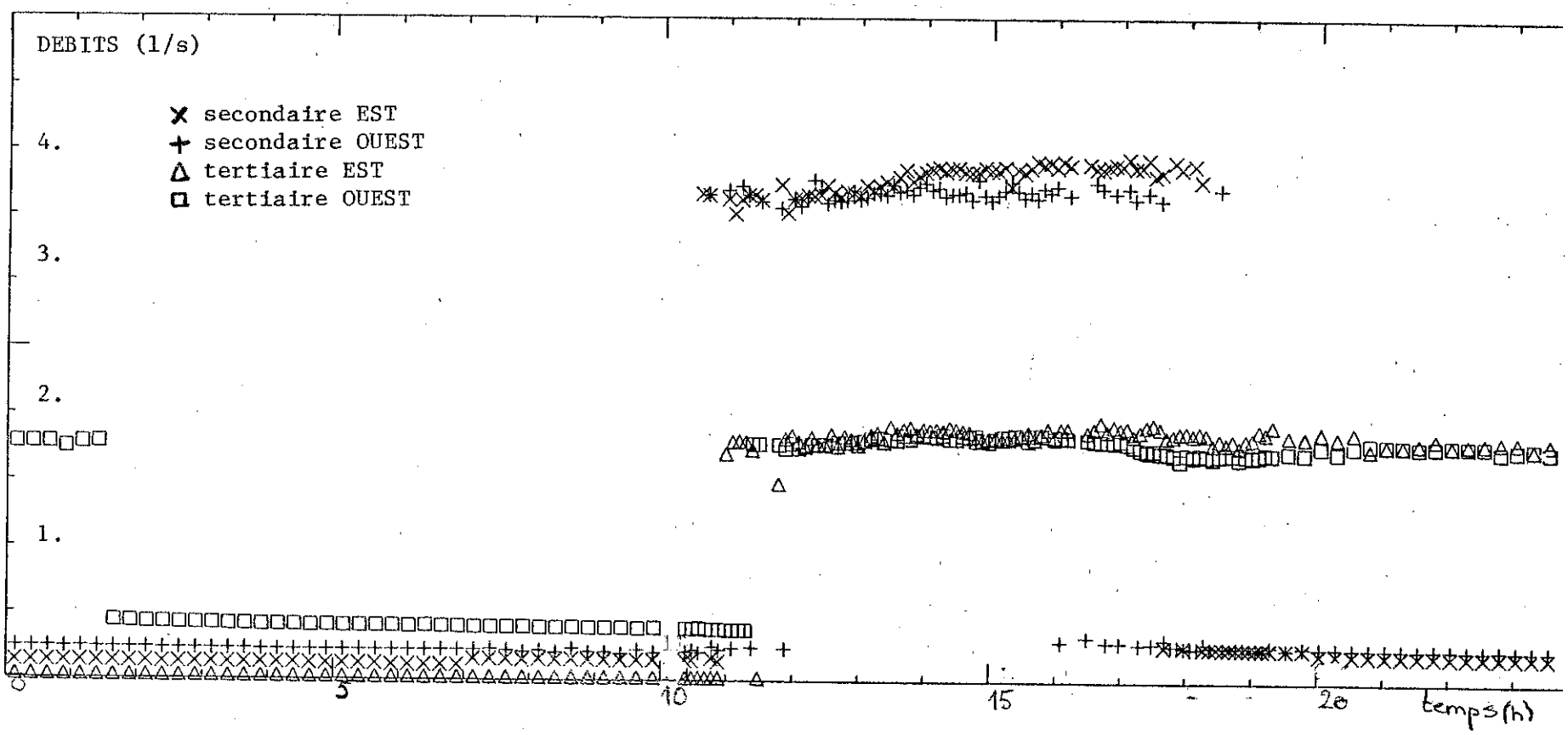
Nous pouvons observer sur cette figure que pour le demi-immeuble Est, les températures de capteurs sont très lisses, indiquant que la pompe secondaire a fonctionné de façon ininterrompue.

Par contre, en Ouest, nous observons de nombreuses discontinuités pour les températures des capteurs. Lorsque la pompe secondaire s'arrête, les températures d'entrée et de sortie sont confondues, et la puissance irradiée continuant à faire élever la température de l'eau dans les capteurs tournant sur eux-mêmes, celle-ci présente de brusques sauts lors du redémarrage de la pompe.

FIGURE VI.2

Débits des circuits secondaires et tertiaires-planchers pour les 2 demi-immeubles

(8 avril 1979)



Or, les énergies sont calculées en supposant que le débit est le même pendant les 6 mn suivant une prise de mesures. Lorsque le fonctionnement de la pompe est continu, comme c'est pratiquement toujours le cas en Est, les énergies calculées ont une précision satisfaisante. Par contre, lorsque la pompe s'arrête et redémarre fréquemment comme nous avons pu le constater en Ouest presque tous les jours, la précision est vraiment mauvaise ; surtout lorsque les intervalles de mesure sont de 15,30 ou même 60 mn comme cela a été quelquefois le cas avant juillet 1979.

Par ailleurs, la figure VI.1 met en évidence des anomalies qui peuvent apparaître dans la régulation. Par exemple, en avril 1980, nous avons constaté que la pompe secondaire se met en marche en Est pour un écart de températures nul entre la sortie des capteurs et le bas de la cuve, en Ouest pour un écart de 4°C, et s'arrête pour ces mêmes écarts.

En Ouest, à cause du $\Delta T = 4°C$, la pompe secondaire démarre généralement 20 mn après la pompe Est et s'arrête une heure plus tôt et si nous étudions par exemple la journée du 11 Avril 1980, de 11h30 à 12h30 et de 14h40 à 16h40, la pompe Ouest s'arrête environ une mesure sur deux, ce qui entraîne un temps de fonctionnement de la pompe secondaire Est double de celui d'Ouest, alors que l'énergie récupérée est pratiquement la même , d'après les mesures .

Ces problèmes de régulation font donc que d'une part les 2 demi-immeubles ne présentent pas la symétrie prévue, rendant très délicate l'interprétation des résultats concernant l'influence du MCP par rapport à celle de la régulation, et que d'autre part nous ne pouvons accorder qu'une confiance limitée aux énergies secondaires mesurées en Ouest.

c) Au niveau des débitmètres :

La figure VI.2 montre les débits d'eau dans les circuits secondaires et tertiaires-dalles pour les deux demi-immeubles le 8 avril 1979. Nous constatons que les débits secondaires Est et Ouest, et tertiaire Ouest ont un zéro non nul . La correction baisserait le débit

mesuré pour les dalles OUEST de 5 %.De plus, ce zéro dérive au cours du temps. Le programme de dépouillement des données n'a pris ce facteur en considération qu'en juillet 1980.

Là encore, le maximum des débits tertiaires étant similaires et les zéros ne l'étant pas, le fonctionnement du système n'est pas symétrique non plus au niveau de la distribution.

d) Au niveau des écarts de températures:

Si les intervalles de mesure et les débits posent des problèmes, la précision sur les mesures de température est correcte (0,1°C), mais les débits étant assez élevés dans les circuits, les différences de température d'entrée et de sortie intervenant dans les calculs d'énergie sont faibles (1 à 4°C) et la précision sur l'énergie varie de 5 à 10 %, rien que par ces faibles écarts.

Tous ces facteurs nous mènent à considérer le tableau VI.1 avec une certaine réserve en ce qui concerne les mesures solaires effectuées sur le demi-immeuble Ouest ; les mesures en Est devant être fiables à 10 % près.

VI.1.2. Analyse des résultats

Si nous essayons d'analyser ces résultats, avec toutes les réserves faites précédemment sur les mesures solaires en Ouest, et malgré la dissymétrie de régulation des deux demi-immeubles, nous remarquons qu'au niveau des énergies solaires, et des températures moyennes de stockage, les résultats sur l'année sont similaires.

Par contre, une étude détaillée mois par mois montre que la température moyenne de cuve est toujours inférieure en Est, comme prévu sauf pour les mois de Juin et Octobre. Nous nous attendons donc à ce que l'énergie stockée soit toujours supérieure en Est, sauf pour les 2 mois mentionnés précédemment, et c'est effectivement ce que les mesures font apparaître.

Lorsque nous considérons les énergies stockées et distribuées, il semble qu'il faille dissocier 3 types de périodes :

- les périodes pendant lesquelles l'ensoleillement est faible (< 30 000 MJ) et la demande élevée (> 30 000 MJ) comme novembre, décembre et janvier. Les énergies stockée et distribuée sont alors supérieures en Est. Les températures moyennes de cuve sont inférieures à 25°C ;

- les périodes pendant lesquelles l'ensoleillement est fort (> 30 000 MJ) et la demande faible, comme juin et octobre. La température de cuve (très élevée) est supérieure en Est et les énergies stockées et distribuées sont au contraire inférieures ;

- les périodes intermédiaires comme avril et mai pendant lesquelles l'énergie stockée est légèrement supérieure en Est alors que l'énergie distribuée est inférieure.

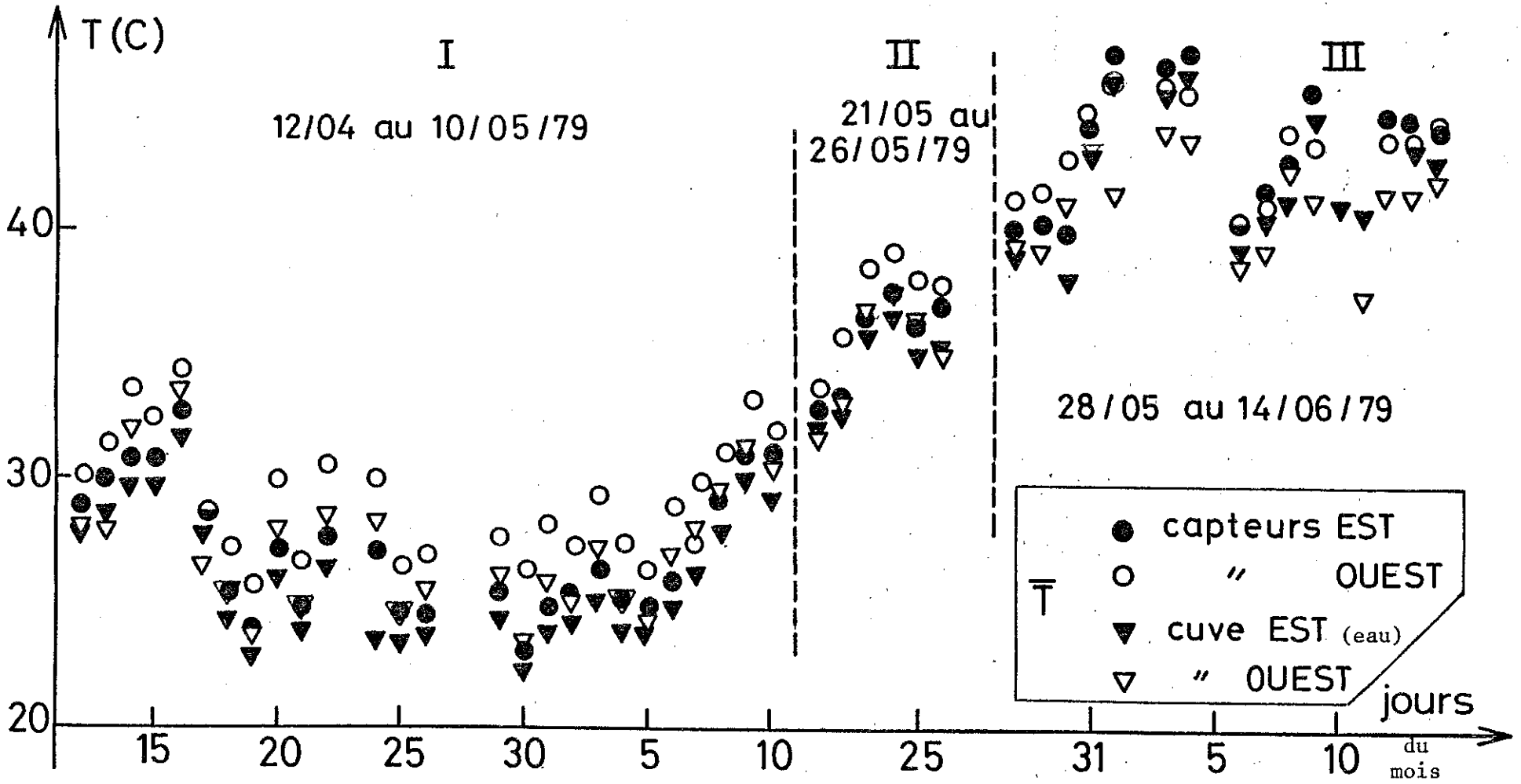
En ce qui concerne l'énergie d'appoint, nous pouvons remarquer :

- l'importance de l'électricité fournie pour l'ECS par rapport à celle fournie pour le chauffage ;
- l'importance de l'électricité consommée par les pompes (69 187 MJ).

Certaines de ces pompes existeraient dans un circuit non solaire, notamment les pompes de circulation d'eau dans les planchers. Par contre, la consommation des pompes des circuits primaires pourrai être réduite, car actuellement, la pompe des capteurs fonctionne toute la journée, même si la puissance n'est pas suffisante pour faire ouvrir l'échangeur. Un asservissement identique à celui permettant l'ouverture de la vanne 3 voies du circuit primaire et la mise en route de la pompe du circuit secondaire permettrait de diminuer de façon considérable les consommations des pompes.

Vu les problèmes de mesures en Ouest, il est difficile de commenter davantage les résultats de ce tableau et nous allons essayer de mettre en évidence les différences de comportement du système pour 3 périodes illustrant les 3 situations décrites précédemment.

FIGURE VI.3



Températures moyennes d'eau pendant le fonctionnement de la pompe du circuit secondaire.

VI.2. ETUDE DE 3 PERIODES CARACTERISTIQUES

Les 3 situations évoquées dans le paragraphe précédent correspondent à une température moyenne de cuve T_m particulière ;

- 1er type de situation : $T_m \leqslant T_{fi}$
- 2e type de situation : $T_{fi} < T_m < T_{fs}$
- 3e type de situation : $T_m \geqslant T_{fs}$

T_{fi}, T_{fs} étant les températures de début et de fin de fusion que nous avons fixées à 30°C pour T_{fi} et 38°C pour T_{fs}. Nous avons sélectionné pour illustrer ces 3 types de situation les périodes du 17 Avril au 8 Mai 1979 pour le 1er, du 21 au 26 Mai 1979 pour le 2ème et du 28 Mai au 14 Juin 1979 pour le 3ème.

La figure VI.3 montre jour par jour, pour ces 3 périodes, la température moyenne de fonctionnement des capteurs pendant le fonctionnement du circuit secondaire, et la température de l'eau de cuve pendant ce même temps, pour les 2 demi-immeubles.

Nous constatons que la température de capteurs en Est est inférieure d'environ 2°C en moyenne à celle d'Ouest pendant la 1ère période, que pendant la 2e l'écart diminue à peine, et que au cours de la 3ème période les températures Est-Ouest s'inversent le 1er juin et les températures EST deviennent supérieures d'environ 1°C à celles d'OUEST.

Nous observons un phénomène similaire pour les températures de cuve pendant le fonctionnement des capteurs. Pour les 3 périodes, l'écart de température cuve-capteurs est toujours plus important en Ouest qu'en Est.

Le tableau VI.2 montre les températures moyennes pour chaque période et les différences de température d'entrée et de sortie des capteurs pendant le fonctionnement de la pompe secondaire, ainsi que les températures moyennes de cuve à minuit, et l'énergie moyenne journalière stockée.

généralement réglé à 5°C. Cette température T_{fi} est donc très vite atteinte dès que les capteurs échangent de l'énergie avec le stock. Par ailleurs, en période de chauffage, la distribution d'énergie dans les planchers permet de toujours maintenir la température de cuve en dessous de T_{fs}, et les bilans énergétiques de stockage montrent effectivement que pour les périodes de chauffe, le PEG semble favorable. Par contre, la seule distribution d'ECS ne permet pas l'été de maintenir la température de cuve inférieure à T_{fs} et le PEG joue un rôle néfaste et n'est pas du tout adapté à cet usage.

CHAPITRE VII - CONCLUSIONS

Nous avons réalisé une des rares expériences (faites à l'heure actuelle dans le monde) d'intégration d'un stockage à changement de phase dans un sytème solaire actif à eau.

Nous avons pu résoudre les problèmes de mise en oeuvre et d'emballage, et de la réalisation d'un échangeur plan eau - MCP, simple à modéliser.

Nous avons pu établir un modèle du comportement du MCP lors du changement de phase et obtenir un accord très raisonnable entre les calculs et l'expérience quant aux cinétiques de fusion - solidification, au coefficient d'échange eau MCP et au comportement général de la cuve.

L'objet essentiel de notre étude était cependant l'influence globale du stockage à MCP sur les performances du système global. Des problèmes de mesure nous empêchent de tirer une conclusion définitive sur l'intérêt du PEG. Un dépouillement correctif des mesures devrait nous permettre de confirmer le rôle positif joué par le stockage à changement de phase pour les mois froids d'hiver, malgré des conditions de fonctionnement qui ne sont pas optimales pour plusieurs raisons :

- la température de fusion relativement élevée du PEG. Un MCP ayant une température de fusion plus basse, serait certainement plus performant.

- le dimensionnement des bidons ne permet pas de récupérer l'énergie maximale pendant un cycle stockage - déstockage.

Pendant les mois de janvier et février 1981, nous avons mis en oeuvre la chliarolithe, dont nous rappelons la température de fusion : 28°C et la chaleur latente : 133 kJ/kg.

Les résultats sont en cours de dépouillement et nous espérons mettre en évidence l'intérêt de ce MCP par rapport au PEG.

Nous avons également fait avec le PEG une étude de l'influence de la température de consigne pour le départ de l'eau dans les planchers, du 1er octobre au 31 décembre 1980, en fixant successivement cette température à 30, 33, 35, et 37°C, le fonctionnement se faisant jusqu'alors avec une température de consigne de 22°C.

Les bilans d'énergie ont été obtenus pour ces périodes successives mais l'ensoleillement, la demande énergétique, les températures initiales de cuve ayant changé simultanément, seule une simulation utilisant le programme décrit dans le chapitre IV, intégré dans TRNSYS permettra de tirer des conclusions sur l'influence de la température de consigne.

Ce travail sera poursuivi par l'équipe solaire du C.N.R.S. - C.R.T.B.T., pour son intérêt fondamental, bien que économiquement l'emploi de matériaux organiques ne soit pas envisageable dans l'immédiat.

Cependant, nos efforts porteront à l'avenir plutôt sur la chliarolithe qui a un avenir commercial probable et une température de fusion mieux adaptée au chauffage par plancher.

BIBLIOGRAPHIE

(1) D.J. MORRISSON, S.I. ABDEL-KHALIK
Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems.
Solar Energy, 20, n° 1 (1978), p. 57-68.

(2) K. STEPHAN
Schmelzen und Erstarren geometrisch einfacher körper.
Kältetechnik - Klimatisierung, 23, n° 2 (1971), p. 42-46.

(3) Séminaire Stockage d'Energie par Chaleur Latente.
La Baule, 12,13 juin 1980.
GUT, Université de Nantes, Laboratoire de Thermocinétique, 44072 Nantes Cédex.

(4) International Congress on Building Energy Management.
Povoa de Varzim (Portugal), 12-16 mai 1980.
Pergamon Press, à paraître.

(5) International TNO symposium. Thermal storage of solar energy.
Amsterdam (Hollande), 5,6 novembre 1980.
C. Den Ouden et Martinus Nighoff Publishers, La Hague (1981).

(6) J.J. HENRY, X. BERGER
Performance of the Grimaud solar house.
Communication au Colloque d'Izmir, août 1979.
Ecothermie Solaire, Observatoire de Nice, BP 252, 06007 Nice.

(7) L. GIRE, J.J. HENRY, X. BERGER, A. JAFFRIN, L. BOURDEAU, J.D. SYLVAIN, D. SCHNEIDER
La maison solaire de Grimaud.
Réunion CDSP Groupe Méditerranéen, Florence, 1979.
Laboratoire d'Ecothermie Solaire, Observatoire de Nice, BP 252, 06007 Nice.

(8) C. BENARD, D. GOBIN, M. GUTIERREZ
Experimental results of a latent heat solar roof, used for breeding chickens.
Solar Energy, 26, n° 4 (1981), p. 347-360.

(9) B. RUEL, G. KUHN
Immeuble solaire expérimental de Bourgoin-Jallieu (Isère). Bilans prévisionnels.
Promoclim, 9E, n° 3, juin 1978, p. 173-203.

(10) G. KUHN, B. RUEL, P. CHAVIN
Utilisation de l'énergie solaire dans l'habitat.
CAST INSA Lyon, septembre 1977, 20 av. Einstein, 69621 Villeurbanne Cédex.

(11) M. SMOTER
Rapport de stage IUT Génie Thermique, juin 1979.
C.S.T.B., Domaine Universitaire, 38400 Saint Martin d'Hères.

(12) J.P. BARDON, B. FOURCHER, J. BRANSIER, B. CASSAGNE
Etude fondamentale du transfert périodique de chaleur entre un fluide caloporteur et un matériau de stockage.
Rapport ATP n° 2520. Laboratoire de Thermocinétique, 2, rue de la Houssinière, 44072 Nantes Cédex.

(13) B. FOURCHER, J. BRANSIER, B. CASSAGNE, J.P. BARDON
Stockage périodique de chaleur. Aspects fondamentaux liés à la cinétique des transferts.
Communication au Congrès "Energie Solaire" de Toronto, août 1978.

(14) KREITH
Transmission de la chaleur et thermodynamique.
Masson 9e édition.

(15) GOODMAN
The heat balance integral and its applications to problems involving change of phase.
Trans. Am. Soc. Mech. Engrs n° 80 (1958), p. 335-342.

(16) BIOT
Further developments of new methods in heat flow analysis.
J. Aerospace Science, 26 (1959), p. 367-381.

(17) R.S. GUPTA
Some numerical and integral methods for solving moving boundary problems in heat flow and diffusion.
Ph. D. Thesis, Brunel University, Uxbridge (1972).

(18) R.S. GUPTA, K. LUMAR
Variable time step methods for one-dimensional Stefan problem with mixed boundary conditions.
Int. J. Heat Mass Transfer, 24 (1981), p. 251-260.

(19) J. CRANCK
Two methods for the numerical solutions of moving boundary problems in diffusion and heat flow.
J. Mech. Appl. Math. 10 (1957), p. 220-231.

(20) L.W. EHRLICH
A numerical method of solving a heat flow problem with moving boundary.
J. Assn. Com. Math. 5 (1958), p. 161-176.

(21) W.D. MURRAY, F. LANDIS
Numerical and machine solutions of transient heat conduction problems involving melting or freezing.
J. Heat Transfer 81 (1959), p. 106-112.

(22) J. DOUGLAS, T.M. GALLIE
On the numerical integration of a parabolic differential equation subject to a moving boundary condition.
Duke Math. J1, n° 22 (1955),p. 557-570.

(23) M. BOURDEAU
Etude expérimentale et théorique d'un stockage centralisé utilisant un matériau à chaleur latente.
Rapport de stage de fin d'étude à l'Ecole Centrale de Paris, juin 1978.
Laboratoire d'Ecothermie Solaire, Observatoire de Nice.

(24) M. LAURENT
Précautions à prendre lors de la mesure de chaleurs spécifiques de certains matériaux de stockage par chaleur latente.
Communication au Congrès de la Baule, juin 1980 (3).

(25) Mac ADAMS
Heat Transmission.
Masson, 3ème Edition (1953).

(26) H.S. CARSLAW, J.C. JAEGER
Conduction of Heat in Solids.
Clarendon Press, 2nde Edition, Oxford (1959).

Programme principal ANNEXE 1

```
      DIMENSION DONNE(240,64),KRACT(32),LONT(240),INSTA(240)
 6    WRITE(8,1000)
1000  FORMAT( ' JOUR' )
      READ(8,2000) JOUR
2000  FORMAT(A5)
      CALL IFILE(30,JOUR)
C
C
C                 LECTURE DONNEES SUR KENNEDY
C                 ---------------------------
C
      LONG=240
      READ(30,3000) (((DONNE(I,J),J=1,64),I=1,LONG),(KRACT(I),I=
     1(1,32)))
3000  FORMAT(240(64(1X,E11.5)/),2(16I5/))
      KDEB=1
      KFIN=0
      DO 21 I1=1,KRACT(2)
      L1=I1*3
      JHEUR=KRACT(L1)
      INT=KRACT(L1+1)
      NBM=KRACT(L1+2)
      KFIN=KFIN+NBM
      DO 22 J1=KDEB,KFIN
 22   INSTA(J1)=(JHEUR+INT*(J1-KDEB))
 21   KDEB=KFIN+1
C
C
C                 ------------
C                 DONNEES THERMOPHYSIQUES
C                 ------------
      WRITE(6,4000)
 4    WRITE (8,4000)
4000  FORMAT( ' HO ' )
      READ(8,400) HO
 400  FORMAT(F)
      WRITE (8,4001)
4001  FORMAT ('PX')
      READ (8,400) PX
      WRITE(8,4002)
4002  FORMAT ( ' UX')
      READ(8,400) UX
      WRITE(8,4003)
4003  FORMAT (' ENERGIE SEC' )
      READ(8,400) QS
      V0=10.
      EP=0.03
      EPE=0.03
      E0=0.002
      CSE=4.18
        CLS=143.6
        DE=998
      DS=1120
      CNDS=0.17
      CNDE=0.4
      CNDB=0.42
      UF=36.
      VS=4.85
      VB=0.55
      VE=4.6
```

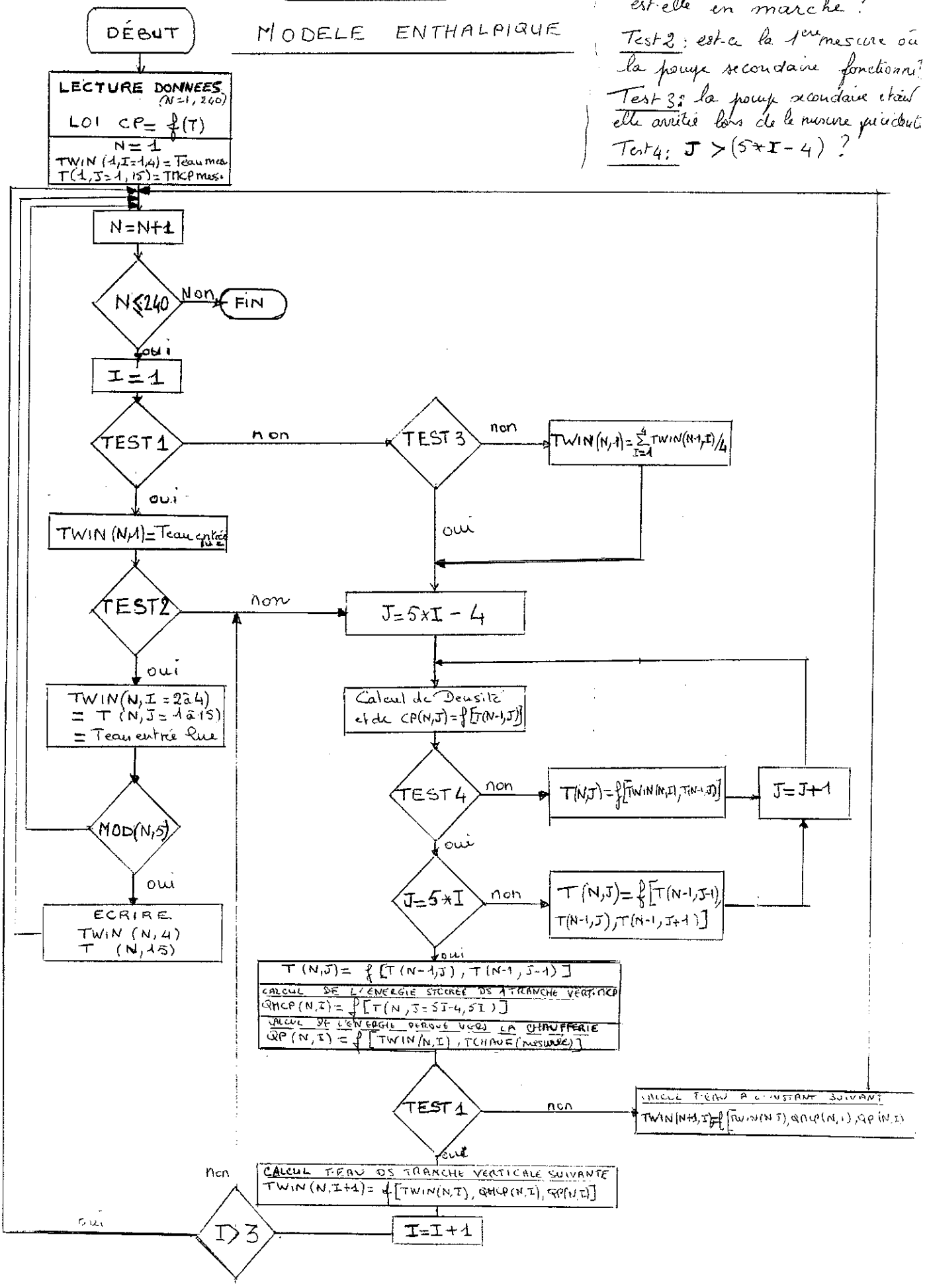
```
C
C          ------------
C          PASSAGE AUX PARAMETRES ADIMENSIONNELS
C          ------------
C
      S=VS/EP
      UR=DS*CLS*VS/DE/CSE/VE
C
C          ------------
C          INITIALISATION DES PARAMETRES
C          ------------
C
      N=0
      N1=0
      R=PX/EP
C
      U=(UX-UE)/UP
C
C          ------------
C          SCHEMA DE RUNGE KUTTA
C          ------------
C
      WRITE(8,112)
      T=INSTA(1)
      DO 100 I=2,FFIN
      IF (DONNE(I,3)) 10,10,20
   20 PINC=DONNE(I,33)*0.152/360
      N=N+1
      IF (N-10) 10,33,31
   33 UCAPT=(DONNE(I,19)+DONNE(I,11))/2
      WRITE(8,32) PINC
   32 FORMAT(E14.7)
   31 IF(N1.LE.1) GO TO 24
      UCAPT=UX
   24 PCAPT=PINC*(0.8-7.9*(UCAPT-DONNE(I,29))/PINC/1000)
      UCAPT=UCAPT+PCAPT/3.75/DONNE(I,3)
      IF (UCAPT-UX) 10,23,23
   23 N1=N1+1
      IF(PCAPT-PE)10,10,8
   10 N0=20
      AKS=0.025
      H1=EPE/CNDE+E0/CNDB
      HEQ=1/H1
      PI=0
      GO TO 7
    8 AKS=1.4
      N0=5
      H1=1/H0+E0/CNDB
      HEQ=1/H1
      PI=PCAPT
    7 BI=(EP+E0)*HEQ/CNDS
      TR=DE*CSE*VE/S/HEQ
      PR=0.001*DS*CLS*VS/TR
      IF (I.GT.2) GO TO 9
      AIO=DS/PP/TP
    9 TAU=INT*0.006/TR
      TREF=INSTA(I)
      PE=AKS*(U*UP+UE-DONNE(I,27))
      P=(PI-PE)/PP
    3 F=P-U/(1+BI*(1-P))
```

```
      U1=U+TAU*F/2
      AI1=AI0+TAU*P/2
      R1=1-AI1+U1
      PE1=AKS*(U1*UR+UF-DONNE(I,27))
      P1=(PI-PE1)/PP
      F1=P1-U1/(1+BI*(1-P1))
      AI0=AI0+P*TAU
      U=U+TAU*F1
      R=1-AI0+U
      RPF=1-R
      T=T+TAU*TP/0.06
      IF (T.LT.TREF) GO TO 3
      IF(MOD(I,N0))100,1,100
    1 TX=T/60
      RX=R*EP
      UX=U*UR+UF
      IQT=IFIX(AI0*PR*TR)
      IQE=IFIX(U*PR*TR)
      IQS=IFIX(RPF*PR*TR)
      TE=DONNE(I-1,51)
      WRITE(6,113)TX,RX,UX,IQT,IQE,IQS,TE
      WRITE(8,113) TX,RX,UX,IQT,IQE,IQS,UCART
      IF (R) 6,6,100
  100 CONTINUE
      GO TO 6
   70 STOP
  112 FORMAT(/,10X,76HTEMPS(H)    RAYON(M)    TEMP.EAU(DEG)
     1ENERG.TOT(MJ) ENERG.EAU(MJ) ENERG.SEL(MJ),//)
  113 FORMAT(10X,F6.2,5X,F6.3,7X,F5.2,9X,I4,10X,I4,10X,I4,10X,F5.2
      END
```

ANNEXE 2

ORGANIGRAMME

MODELE ENTHALPIQUE



Test 1 : la pompe secondaire est-elle en marche ?

Test 2 : est-ce la 1ère mesure où la pompe secondaire fonctionne ?

Test 3 : la pompe secondaire était-elle arrêtée lors de la mesure précédente

Test 4 : J > (5*I - 4) ?

```
      GO TO 391
 38   CP=1850
 391  DENS=1120
 100  IF (TWIN(N,1)-TWIN(N-5,1)) 110,110,111
 111  HEQ=1/HO+EPB/CONDB+4*EP/COND
      GO TO 112
 110    HEQ=EPB/CONDB+4*EP/COND

 112  H=1/HEQ
      RTH=H*TAU/DENS/CP/4/EP
      AM=4*EP*DENS*S
      T(N,I)=T(N-1,I)+RTH*(TWIN(N-1,I)-T(N-1,I))
      TM(N,I)=(T(N,I)+TWIN(N,I))/2
C
C   Q CEDEE AU MCP POUR CHAQUE TRANCHE
C
       QMCP=AM*CP*(TM(N,I)-TM(N-1,I))
C    Q CEDEE A LA CHAUFFERIE POUR CHAQUE TRANCHE
C
 114  QP=UEX*(TWIN(N,I)+TWIN(N-1,I)-DONNE(N,27)-DONNE(N-1
     1,27))/4
C
C    CALCUL DE LA TEMPERATURE DE L'EAU DANS LA TRANCHE SUIVANTE
C
      IF(NM.GT.3) GO TO 3
      IF(NM.GT.1) GO TO 4
 6    TWIN(N,I+1)=TWIN(N-1,I+1)
      GO TO 104
 4    IF(NM.GT.2) GO TO 5
      IF(I.EQ.1) GO TO 3
      GO TO 6
 5    IF(I.GT.2) GO TO 6
 3    TWIN(N,I+1)=TWIN(N,I)-(QMCP+QP*TAU)/AME/CPE
 104  CONTINUE
C
C     ECRITURE DES RESULTATS TOUTES LES DEMI-HEURES
C
      IF(MOD(N,NO)) 101,2,101
 2     TEMPS=TEMP(N)
      TENTR=TWIN(N,1)
      TOUTCA=TWIN(N,4)
        TOUTDO=DONNE(N,13)
      TMCPCA=T(N,1)
      TMCPDO=DONNE(N,37)*40./38.56
      WRITE(8,1001)TEMPS,TENTR,TOUTCA,TOUTDO,TMCPCA,TMCPDO
 101  CONTINUE
      GO TO 700
      STOP
 4000 FORMAT(/,10X,65HTEMPS(H)  TEAUIN  TEAUEXCALC. TEAUEXDON. T
     1MCPCALC. TMCPDON. TMCPS,//)
 1001 FORMAT(11X,F6.2,4X,F5.2,5X,F5.2,5X,F5.2,5X,F5.2,5X,F5.2)

      END
```

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'article 3 de l'arrêté du 16 avril 1974,

Vu le rapport de présentation de :

- Monsieur KUHN, Professeur à l'U.S.M.G.

Madame AUBERT - DASSE Claude

est autorisée à présenter une thèse en soutenance pour l'obtention du titre de DOCTEUR de TROISIEME CYCLE, spécialité : "Energétique".

Fait à Grenoble, le 1er juin 1981

Le Président de l'I.N.P.G.