

T0264  
1983/3eC

1983.1(043)3°C

# THÈSE

présentée à

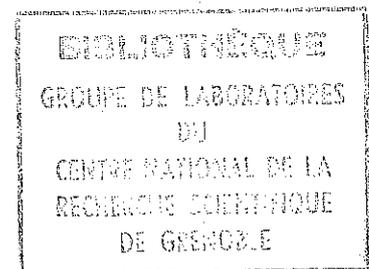
## L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade

DOCTEUR ÈS-SPÉCIALITÉ (3<sup>e</sup> cycle)  
en INSTRUMENTATION THERMIQUE

par

Monsieur Bernard RUEL



### SUJET

Calculs prévisionnels et analyse critique  
des bilans énergétiques de l'immeuble  
solaire de Bourgoin à l'aide des  
programmes de calcul E.D.F. (CLIM et MASOL)

---

Soutenue le 7 Janvier 1983 devant la commission d'Examen

Monsieur A. LACAZE           Président

Messieurs J. BRAU  
            Y. CORMARY   Examineurs  
            G. KUHN  
            A. LEBRU



Président de l'Université : M. TANCHE

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.S.M.G.

---

(RANG A)

SAUF ENSEIGNANTS EN MEDECINE ET PHARMACIE

PROFESSEURS DE 1ère CLASSE :

---

ARNAUD Paul	Chimie organique
ARVIEU Robert	Physique nucléaire I.S.N.
AUBERT Guy	Physique C.N.R.S.
AYANT Yves	Physique approfondie
BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale C.N.R.S. (labo. de magnétisme)
BARJON Robert	Physique nucléaire I.S.N.
BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose-Biologie
BARRA Jean-René	Statistiques - Maths appliquées
BELORISKY Elie	Physique
BENZAKEN Claude (Mr)	Mathématiques pures
BERNARD Alain	Mathématiques pures
BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques pures
BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques pures
BILLET Jean	Géographie
BONNIER Jean-Marie	Chimie générale
BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire I.S.N.
BRAVARD Yves	Géographie
CARLIER Georges	Biologie végétale
CAUQUIS Georges	Chimie organique
CHIBON Pierre	Biologie animale
COLIN DE VERDIERE Yves	Mathématiques pures
CRABBE Pierre (détaché)	C.E.R.M.O.
CYROT Michel	Physique du solide
DAUMAS Max	Géographie
DEBELMAS Jacques	Géologie générale
DEGRANGE Charles	Zoologie
DELOBEL Claude (Mr)	M.I.A.G. Mathématiques appliquées
DEPORTES Charles	Chimie minérale
DESRE Pierre	Electrochimie
DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
DUCROS Pierre	Cristallographie
FONTAINE Jean-Marc	Mathématiques pures
GAGNAIRE Didier	Chimie physique
GASTINEL Noël	Analyse numérique Mathématiques appliquées

GERBER Robert	Mathématiques pures
GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
GIRAUD Pierre	Géologie
IDELMAN Simon	Physiologie animale
JANIN Bernard	Géographie
JOLY Jean-René	Mathématiques pures
JULLIEN Pierre	Mathématiques appliquées
KAHANE André (détaché DAFCO)	Physique
KAHANE Josette	Physique
KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques pures
KRAKOWIAK Sacha	Mathématiques appliquées
KUPTA Yvon	Mathématiques pures
LACAZE Albert	Thermodynamique
LAJZEROWICZ Jeannine	Physique
LAJZEROWICZ Joseph	Physique
LAURENT Pierre	Mathématiques appliquées
DE LEIRIS Joël	Biologie
LLIBOUTRY Louis	Géophysique
LOISEAUX Jean-Marie	Sciences nucléaires I.S.N.
LOUP Jean	Géographie
MACHE Régis	Physiologie végétale
MAYNARD Roger	Physique du solide
MICHEL Robert	Minéralogie et pétrographie (géologie)
NOZIERES Philippe	Spectrométrie - Physique
OMONT Alain	Astrophysique
OZENDA Paul	Botanique (biologie végétale)
PAYAN Jean-Jacques (détaché)	Mathématiques pures
PEBAY PEYROULA Jean-Claude	Physique
PERRIAUX Jacques	Géologie
PERRIER Guy	Géophysique
PIERRARD Jean-Marie	Mécanique
RASSAT André	Chimie systématique
RENARD Michel	Thermodynamique
RICHARD Lucien	Biologie végétale
RINAUDO Marguerite	Chimie CERMAV
SENGEL Philippe	Biologie animale
SERGERAERT Francis	Mathématiques pures
SOUTIF Michel	Physique
VAILLANT François	Zoologie
VALENTIN Jacques	Physique nucléaire I.S.N.
VAN CUTSEN Bernard	Mathématiques appliquées
VAUQUOIS Bernard	Mathématiques appliquées
VIALON Pierre	Géologie

-----  
PROFESSEURS DE 2ème CLASSE :  
-----

ADIBA Michel	Mathématiques pures
ARMAND Gilbert	Géographie
AURIAULT Jean-Louis	Mécanique
BEGUIN Claude (Mr)	Chimie organique
BOEHLER Jean-Paul	Mécanique
BOITET Christian	Mathématiques appliquées
BORNAREL Jean	Physique
BRUN Gilbert	Biologie
CASTAING Bernard	Physique
CHARDON Michel	Géographie
COHENADDAD Jean-Pierre	Physique
DENEUVILLE Alain	Physique

DEPASSEL Roger	Mécanique des fluides
DOUCE Roland	Physiologie végétale
DUFRESNOY Alain	Mathématiques pures
GASPARD François	Physique
GAUTRON René	Chimie
GIDON Maurice	Géologie
GIGNOUX Claude (Mr)	Sciences nucléaires I.S.N.
GUITTON Jacques	Chimie
HACQUES Gérard	Mathématiques appliquées
HERBIN Jacky	Géographie
HICTER Pierre	Chimie
JOSELEAU Jean-Paul	Biochimie
KERCKOVE Claude (Mr)	Géologie
LE BRETON Alain	Mathématiques appliquées
LONGEQUEUE Nicole	sciences nucléaires I.S.N.
LUCAS Robert	Physiques
LUNA Domingo	Mathématiques pures
MASCLE Georges	Géologie
NEMOZ Alain	Thermodynamique (CNRS - CRTBT)
OUDET Bruno	Mathématiques appliquées
PELMONT Jean	Biochimie
PERRIN Claude (mr)	Sciences nucléaires I.S.N.
PFISTER Jean-Claude (détaché)	Physique du solide
PIBOULE Michel	Géologie
PIERRE Jean-Louis	Chimie organique
RAYNAUD Hervé	Mathématiques appliquées
ROBERT Gilles	Mathématiques pures
ROBERT Jean-Bernard	Chimie physique
ROSSI André	Physiologie végétale
SAKAROVITCH Michel	Mathématiques appliquées
SARROT REYNAUD Jean	Géologie
SAXOD Raymond	Biologie animale
SOUTIF Jeanne	Physique
SCHOOL Pierre-Claude	Mathématiques appliquées
STUTZ Pierre	Mécanique
SUBRA Robert	Chimie
VIDAL Michel	Chimie organique
VIVIAN Robert	Géographie



## REMERCIEMENTS

Les travaux rapportés dans cette thèse ont été effectués au sein de l'équipe solaire du Centre de Recherche sur les Très Basses Températures (C.R.T.B.T.), laboratoire du C.N.R.S., à Grenoble. Je tiens à remercier sincèrement D. THOULOZE, Directeur actuel du C.R.T.B.T., et R. TOURNIER, son prédécesseur, de m'avoir accueilli dans leur laboratoire. Je remercie aussi tous les membres de l'équipe des Basses Températures parmi lesquels j'ai eu grand plaisir à travailler.

G. KUHN, Professeur à l'Université de Grenoble et responsable de l'équipe solaire du C.R.T.B.T., a assuré la direction de mes travaux. Il a toujours su me proposer une documentation abondante. Il a excellé pour organiser les contacts avec les personnes ou organismes compétants. Il m'a souvent aidé à critiquer les résultats de la simulation ou à analyser les mesures. Je lui en suis profondément reconnaissant. Il a accepté de faire partie de mon jury, ce dont je le remercie.

Je remercie Monsieur le Professeur A. LACAZE pour l'intérêt soutenu et actif qu'il a toujours manifesté pour notre groupe au sein du laboratoire. Je le remercie tout particulièrement pour l'honneur qu'il me fait de bien vouloir présider mon jury de thèse.

Je remercie aussi tous les membres de l'équipe solaire de Grenoble et en particulier P. PATAUD, Ingénieur responsable de l'expérimentation sur l'immeuble solaire de Bourgoin. Outre le mérite de m'avoir supporté dans le même bureau, il n'a pas eu son pareil pour débrouiller l'écheveau des mesures et pour associer le bon dépouillement avec les conditions réelles de l'expérience, et ce plusieurs mois, voire quelques années plus tard.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance pour leur accueil sympathique

et leur aide efficace à tous les membres de l'équipe de recherche E.D.F. que j'ai cotoyés à Moret-sur-Loing :

- à M. H. MICHEL, qui m'a largement ouvert l'accès au département "Applications de l'Electricité" (A.D.E.) qu'il dirigeait, tout en s'intéressant de près à mon travail,
- à tous les ingénieurs qui m'ont donné de leur temps (et prêté à l'occasion leur bureau), notamment P. CHOUARD, JJ. BASSET, R. MONTESER,
- à Madame S. MORIN, du service "Assistance-Calcul" du Centre Informatique E.D.F. de Clamart, sans qui je n'aurais jamais découvert certains mystères du système M.V.S.
- à R. FRANCHISSEUR, sans la collaboration amicale et le dévouement de qui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Cette coopération avec le département A.D.E. de E.D.F. Renardières a été récemment renouvelée pour une nouvelle expérimentation à Bourgoin. Je remercie en particulier à ce sujet M. Y. CORMARY, Ingénieur chef de service à l'A.D.E. de s'être intéressé à mon travail et aussi d'avoir eu l'amabilité d'accepter de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie également M. J. BRAU, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et M. A. LEBRU, Ingénieur de recherche au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Sophia-Antipolis (Valbonne) qui se sont intéressés tous deux à l'expérience de Bourgoin et aux programmes CLIM et MASOL et qui ont accepté d'être membres de mon jury.

Je remercie enfin très chaleureusement pour leur aide tous les collègues du C.R.T.B.T : Hervé REYNAUD pour la qualité de ses graphiques, Françoise MAHIEUX et Viviane BUTKOVIC pour leurs excellents travaux de frappe et de mise en page, Madame TREVISSON pour son dévouement et l'édition de ce document.

# PLAN

	Pages
PARTIE I - INTRODUCTION	1
PARTIE II - DESCRIPTION DE L'IMMEUBLE SOLAIRE EXPERIMENTAL DE BOURGOIN-JALLIEU	7
PARTIE III - LES PROGRAMMES DE SIMULATION UTILISES (E.D.F.)	
3-1 <u>Le programme CLIM</u>	13
3.1.1 La simulation du bâtiment	13
3.1.2 Les climats-type de CLIM	14
3.1.3 Principes du programme CLIM	16
3.1.4 Résultats de CLIM	17
3-2 <u>Le programme MASOL</u>	19
3.2.1 Les entrées de MASOL	19
3.2.2 Sorties de MASOL	22
3.2.3 Principes du programme MASOL	22
PARTIE IV - CALCULS PREVISIONNELS DE QUELQUES BILANS D'ENERGIE DE L'IMMEUBLE SOLAIRE DE BOURGOIN. CONFRONTATION AVEC DES BILANS MESURES.	29
4-1 <u>Simulation de l'immeuble solaire expérimental</u>	31
4.1.1 Description initiale de l'immeuble pour le programme CLIM	31
4.1.2 Simulation par MASOL d'une configuration solaire standard (calcul prévisionnel initial)	36
4.1.3 Modification des entrées initiales des programmes CLIM et MASOL	38

4-2	<u>Le chauffage des locaux : les prévisions confrontées aux mesures</u>	39
4.2.1	Les bilans prévisionnels de CLIM face aux mesures	
4.2.1.1	Les bilans annuels	39
4.2.1.2	Les bilans mensuels	43
4.2.2	Prévisions des besoins en énergie pour le chauffage par des méthodes moins sophistiquées	45
4-3	<u>Les performances du système solaire comparées aux prévisions</u>	49
4.3.1	Les prévisions de CLIM + MASOL face aux mesures	49
4.3.1.1	Les bilans annuels	51
4.3.1.2	Etude de l'E.C.S.	53
4.3.1.3	Etude du chauffage des locaux	57
4.3.2	Méthodes rapides E.D.F. de prévision énergétique globale comparées aux mesures	61
4.3.2.1	Méthode manuelle utilisant des abaques solaires	61
4.3.2.2	Méthode informatisée sommaire de prévision du bilan d'énergie global	65
4-4	<u>Réponses du programme CLIM à quelques variations des paramètres d'entrée</u>	71
4.4.1	Puissances de chauffage et respect des consignes de température intérieure	71
4.4.2	Sensibilité de CLIM à une légère variation de l'isolation thermique	72
4.4.3	Sensibilité de CLIM aux simulations des apports internes	73
4.4.4	Réponses de CLIM à des variations de consigne intérieure	74

4.4.5	Contribution des différentes sources d'énergie à l'évolution diurne de la température intérieure d'un module chauffé	75
-------	--	----

4-5	<u>Réponses du programme MASOL à des variations de quelques paramètres d'entrée du système solaire simulé. Comparaison avec l'expérience</u>	79
-----	--	----

4.5.1	Sensibilité de MASOL à une variation de l'inertie du circuit des capteurs	79
-------	---	----

4.5.2	Réponse de MASOL à une variation de la surface de captation	80
-------	---	----

4.5.3	Sensibilité de MASOL à des variations du volume de stockage	87
-------	---	----

PARTIE V	- SIMULATION PAR CLIM + MASOL EN CLIMAT REEL	97
----------	--	----

5-1	<u>Entrée d'un climat simplifié dans le fichier météo de CLIM. Comparaison avec le climat mesuré.</u>	99
-----	---	----

5.1.1	Les températures extérieures : le profil journalier simulé comparé au profil mesuré	99
-------	---	----

5.1.1.1	Les entrées et le profil créé	99
---------	-------------------------------	----

5.1.1.2	Détail de quelques journées	99
---------	-----------------------------	----

5.1.1.3	En guise de conclusion	100
---------	------------------------	-----

5.1.2	La simulation des flux solaires dans CLIM	104
-------	---	-----

5.1.2.1	Le flux direct (horizontal) et le problème des entrées	104
---------	--	-----

5.1.2.2	Les flux solaires horizontaux : la simulation comparée aux mesures	105
---------	--	-----

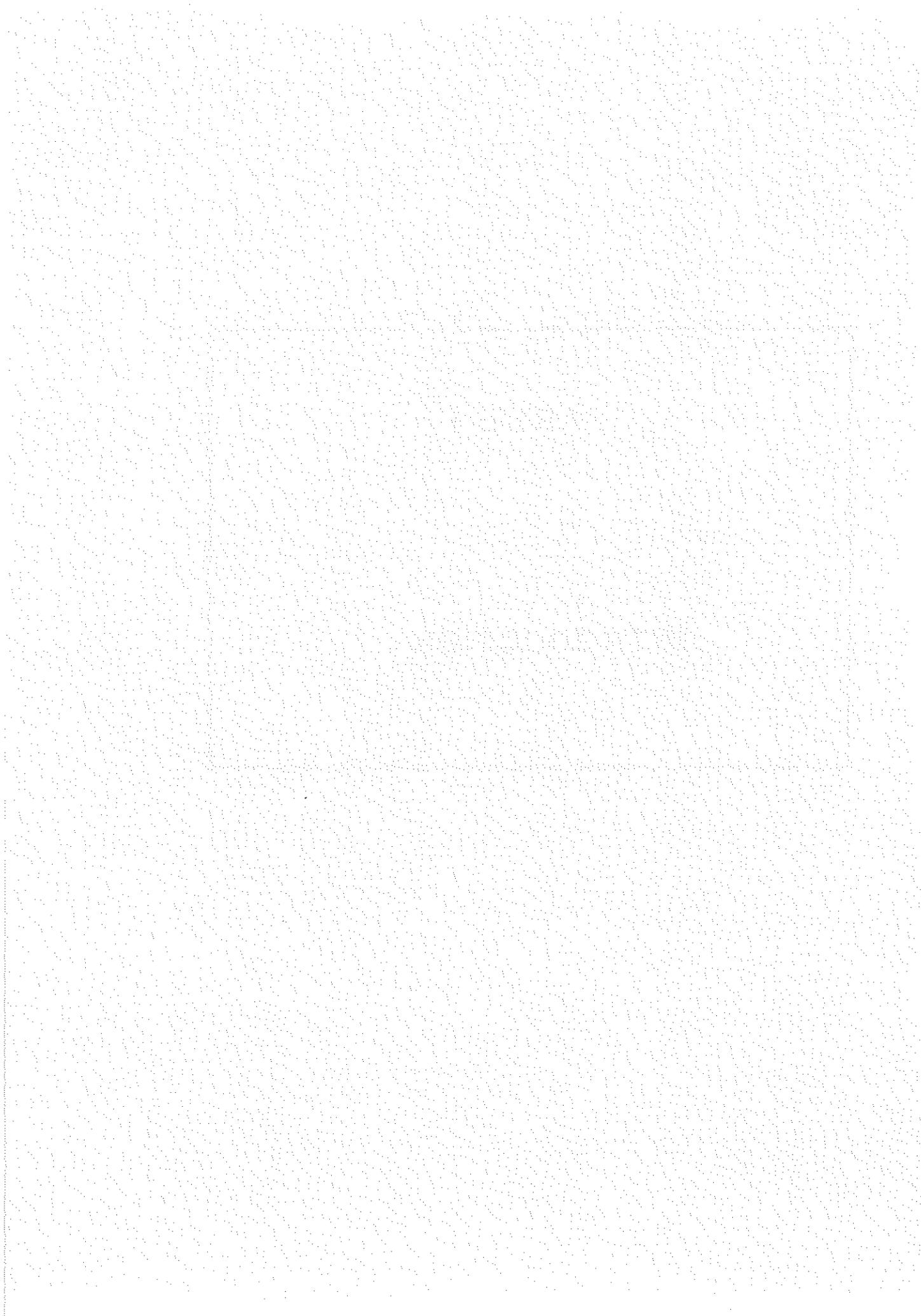
5.1.2.3	Le flux solaire global vertical sud	111
---------	-------------------------------------	-----

5.1.2.4	Conclusion sur la simulation des flux solaires	117
---------	--	-----

5-2	<u>Validation des calculs annexes de bilan thermique du local technique (sous-station) : sa prévision face aux mesures</u>	119
5.2.1	Analyse complète de la sous-station	119
5.2.2	Le programme auxiliaire de calcul du stockage et du bilan thermique du local technique	120
5.2.3	La simulation du local technique (module TE) et son comportement en climat réel	123
5-3	<u>Simulation de l'eau chaude sanitaire solaire par CLIM + MASOL (Climat réel : septembre 78)</u>	127
5.3.1	Rectification de la simulation du système E.C.S de Bourgoin dans le programme MASOL	127
5.3.2	Les bilans d'énergie simulés et mesurés (pour l'E.C.S. en septembre 1978)	128
5.3.2.1	Corrections diverses avant comparaison	128
5.3.2.2	Les bilans d'énergie	130
5.3.2.3	Conclusion des comparaisons de bilans énergétiques E.C.S.	130
5.3.3	Evolution des températures du stockage	131
5.3.3.1	Le choix d'une température de stockage de comparaison	131
5.3.3.1	Comparaison des variations des températures moyennes journalières du stockage prévues et mesurées	132
5-4	<u>Etude de la simulation globale (chauffage + E.C.S) par les programmes CLIM et MASOL sur octobre 1978</u>	135
5.4.1	Comparaison des bilans d'énergie pour octobre 78	
5.4.1.1	Les prévisions et les mesures concernant l'E.C.S	135
5.4.1.2	Les prévisions et les mesures concernant le chauffage	137
5.4.2	Evolution des températures du stockage	139
PARTIE VI	- CONCLUSION	143
	BIBLIOGRAPHIE	147
	ANNEXES	155

PARTIE I

INTRODUCTION



3 Καὶ οἰκίας δὲ λέγων τὰς αὐτὰς καλὰς τε εἶναι καὶ χρησίμους παιδεύειν ἔμοιγ' ἐδόκει, οἷας χρὴ οἰκοδομεῖσθαι.

Ἐπεσκόπει δὲ ὧδε· Ἄρα γε τὸν μέλλοντα οἰκίαν οἷαν χρὴ ἔχειν τοῦτο δεῖ μηχανᾶσθαι, ὅπως ἡδίστη τε ἐνδαιτυῖσθαι καὶ χρησιμωτάτη ἔσται;

9 Τοῦτου δὲ ὁμολογουμένου, Οὐκοῦν ἡδὺ μὲν θέρους ψυχρεῖν ἔχειν, ἡδὺ δὲ χειμῶνος ἀλεινῆν;

Ἐπειδὴ δὲ καὶ τοῦτο συμβαίνει, Οὐκοῦν ἐν ταῖς πρὸς μεσημβρίαν βλεπούσαις οἰκίαις τοῦ μὲν

χειμῶνος ὁ ἥλιος εἰς τὰς παστάδας ὑπολάμπει, τοῦ δὲ θέρους ὑπὲρ ἡμῶν αὐτῶν καὶ τῶν στεγῶν πορευόμενος σκιὰν παρέχει. οὐκοῦν εἴ γε καλῶς ἔχει ταῦτα οὕτω γίνεσθαι, οἰκοδομεῖν δεῖ ὑψηλότερα μὲν τὰ πρὸς μεσημβρίαν, ἵνα ὁ χειμερινὸς ἥλιος μὴ ἀποκλείηται, χθαμαλότερα δὲ τὰ πρὸς ἄρκτον, ἵνα οἱ ψυχροὶ μὴ ἐμπίπτωσιν ἄνεμοι.

10 ὡς δὲ συνελόντι εἰπεῖν, ὅποι πάσας ὥρας αὐτὸς τε ἂν ἡδίστα καταφεύγοι καὶ τὰ ὄντα ἀσφαλέστατα τίθοιτο, αὕτη ἂν εἰκότως ἡδίστη τε καὶ καλλίστη οἰκησις εἴη.

XENOPHON

MEMORABILIA, III. VIII

ENTRETIENS MEMORABLES DE SOCRATE SUR LE

THEME DE LA "BEAUTE FONCTIONNELLE"

"... Socrate disait que la commodité d'une maison en constitue la véritable beauté, et c'était donner le meilleur principe de construction ; or voici comment il raisonnait :

"Quand on veut bâtir une maison, ne doit-on pas s'efforcer de la rendre en même temps agréable et commode ? ". L'interlocuteur acquiesçant : "N'est-il pas à désirer qu'elle soit fraîche pendant l'été, et chaude en hiver ? ". Ce point lui étant encore accordé : "Eh bien, poursuivait-il, quand les maisons regardent le midi, le soleil pénètre en hiver dans les appartements ; et en été, passant au-dessus de nos têtes et par-dessus les toits, il procure de l'ombre. Il faut, par conséquent, donner de l'élévation aux édifices qui sont au midi, pour que les appartements reçoivent le soleil en hiver, et tenir fort bas ceux qui sont exposés au nord, afin qu'ils soient moins battus des vents froids. En un mot, la maison la plus belle et la plus commode est celle qui fournit la retraite la plus agréable en toute saison, et où l'on renferme avec le plus de sécurité ce qu'on possède".

Traduction de A. Fouillée, Delagrave 1872

XENOPHON (env. 430-350 av. J-C)



La maison grecque antique, dont la conception n'était certes pas assistée par ordinateur, émergeait donc pourtant déjà au "Solaire Passif". La modélisation thermique des bâtiments apparaît aujourd'hui comme un outil indispensable pour l'étude d'un habitat plus économe en énergie, utilisant par exemple plus rationnellement l'énergie solaire.

Le programme de modélisation thermique sera parfois seulement un outil de conception simplifié, utilisant par exemple un calcul du coefficient G et une estimation des degrés-jours ; il permet à l'architecte ou au thermicien chauffagiste d'estimer rapidement le comportement thermique moyen d'un bâtiment en projet. Mais il existe aussi des programmes beaucoup plus élaborés, et même des programmes généraux à vocation universelle qui contiennent d'importants fichiers concernant les matériaux, les systèmes de chauffage, les climats météorologiques, etc... ; ces derniers sont par exemple utiles pour décider des meilleures options techniques et économiques dans un grand projet d'immeubles. Ce type de programme résout les équations différentielles de la thermique par des méthodes élaborées : par les facteurs de réponse (méthodes de type ASHRAE [1] , "DOE2" [2] , "CONSOM" du COSTIC [3] , etc.) par une méthode aux différences finies ("CLIM" de EDF) ou par une méthode analogique ("AZTEC" du CSTB [4] , etc.). Ceci permet, avec un pas de temps fin, de prendre en compte l'inertie des locaux, les phénomènes à mémoire, etc...

Lorsque nous avons commencé ce travail, il n'était pas question de développer un modèle propre, mais d'utiliser d'une part les modèles thermiques existants et d'autre part les mesures de l'immeuble solaire expérimental de Bourgoin-Jallieu (Isère). Ce bâtiment a été spécialement prévu pour essayer d'acquérir toutes les données nécessaires à la vérification de modèles de calcul simulant le comportement thermique de bâtiments équipés de systèmes solaires actifs à eau. Les seuls modèles opérationnels existant à cette époque en France étaient celui de EDF (CLIM), du COSTIC (CONSOM) et le modèle analogique du CSTB. Une coopération efficace ayant pu être réalisée avec EDF, nous avons donc utilisé le programme CLIM.

Parallèlement, de nombreux programmes simulant l'emploi de l'énergie solaire dans l'habitat sont apparus avec l'utilisation accrue de cette énergie depuis 1973. Des études avaient d'ailleurs été entreprises très longtemps auparavant puisque l'équation classique du bilan thermique d'un capteur plan était développée par Hottel et Woertz [36] dès 1942.

On peut, par exemple, se contenter de méthodes manuelles pour estimer rapidement l'énergie solaire récupérable pour un projet de chauffage solaire d'un bâtiment, d'une piscine ou d'un simple chauffe-eau solaire. On jugera alors suffisant de connaître, comme seule donnée solaire de départ, la fraction mensuelle moyenne d'ensoleillement en un lieu "solaiement proche" de celui du projet : c'est le cas par exemple de la méthode mise au point fin 1979 par l'E.S.I.M. [5]. Nous avons utilisé aussi à titre de bilan d'énergie prévisionnel rapide la méthode manuelle mise au point en 1977 par Ph. Chouard et al. [6], utilisant des moyennes mensuelles et des abaques de gisement solaire.

Des programmes solaires plus élaborés permettent de détailler la simulation en décrivant plus précisément les différents modules du système (en solaire actif, par exemple, les capteurs, le stockage, la distribution d'énergie, etc...) ; mais chaque composant du système n'interviendra dans le bilan global d'énergie que par son comportement usuel moyen résultant de mesures expérimentales antérieures (abaques ou équations globales approchées). C'est le cas par exemple du programme f-chart de Klein et al. (1976), dont les calculs visent aussi à simuler les performances mensuelles ou annuelles.

Enfin il existe encore des programmes de modélisation solaire comportant des algorithmes de calcul très précis et des méthodes itératives élaborées pour résoudre numériquement les équations aux dérivées partielles traduisant les échanges thermiques. Ils sont alors utilisés par des laboratoires pour des investigations plus fines d'un paramètre particulier du système ; le programme TRNSYS [7] par exemple est de ce type.

Le programme MASOL [8], créé à EDF-Renardières par R. Franchisseur et al. (1976), relève à la fois de la 3ème famille de programmes d'analyse fine (puisqu'il utilise le découpage issu de CLIM pour le

climat et les besoins énergétiques) et de la 2ème famille de programmes puisque les bilans énergétiques restent globaux sur le pas de temps choisi.

Nous avons utilisé les programmes CLIM & MASOL de EDF pour les calculs prévisionnels des bilans thermiques mensuels et annuels concernant le chauffage et l'eau chaude sanitaire de l'immeuble expérimental de Bourgoin. Nous les avons ensuite utilisés pour prévoir l'effet des variations d'un paramètre du système en conservant identiques les autres conditions, avec le climat-type de Lyon retenu. L'immeuble ayant été décrit avec soin pour CLIM, nous avons alors imposé 45 jours successifs du climat réel comme météorologie de référence. Nous avons donc pu confronter sur quelques points les mesures réelles avec les valeurs simulées par CLIM ou MASOL correspondant aux mêmes paramètres, testant ainsi, au moins sur certains points, ces deux programmes.

Nous présentons ici un résumé des bilans prévisionnels déjà publiés [9] ainsi que l'essentiel des tests en validation de ces deux programmes.

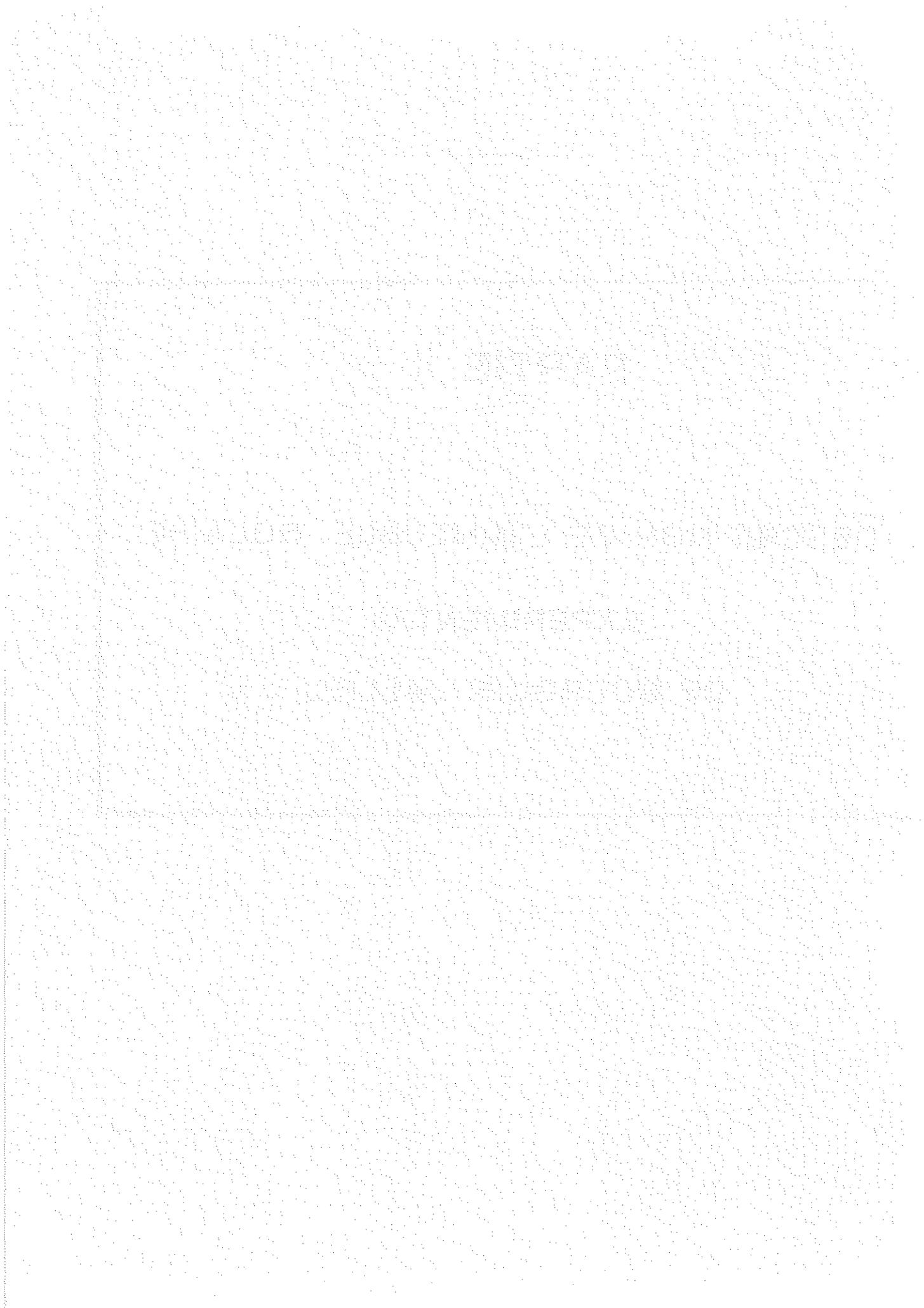


## PARTIE II

DESCRIPTION DE L'IMMEUBLE SOLAIRE

EXPERIMENTAL

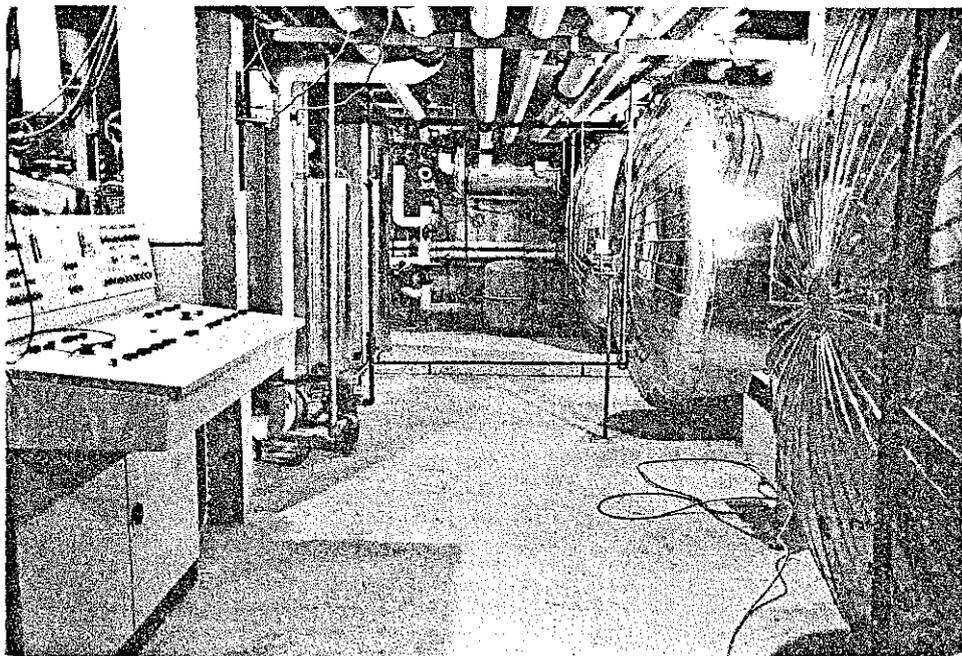
DE BOURGOIN-JALLIEU



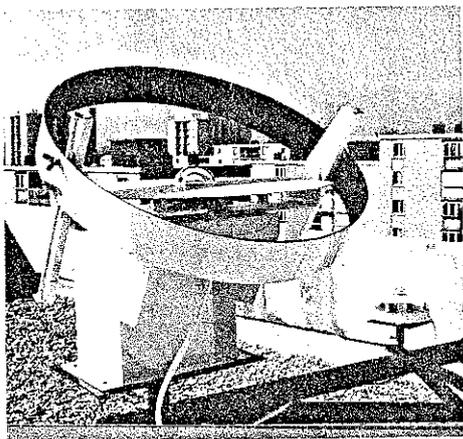
## PHOTOS 1



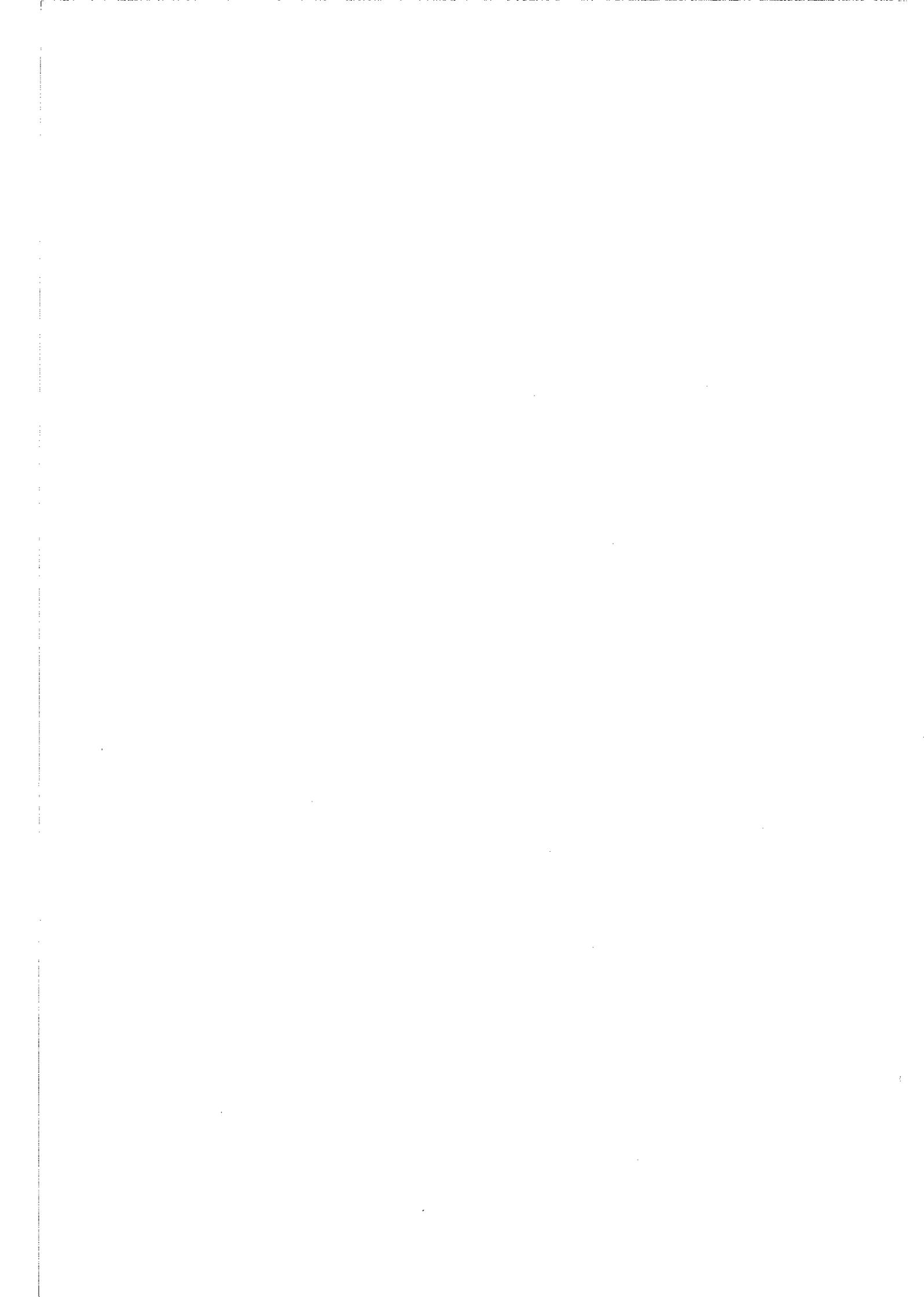
Facade Sud du « Solaire », 12 logements locatifs, quartier de Champfleury à Bourgoin-Jallieu (Isère).



Vue du laboratoire et des cuves de stockage en sous-sol.



Mesure de l'ensoleillement (rayonnement diffus) par un insolateur horizontal.

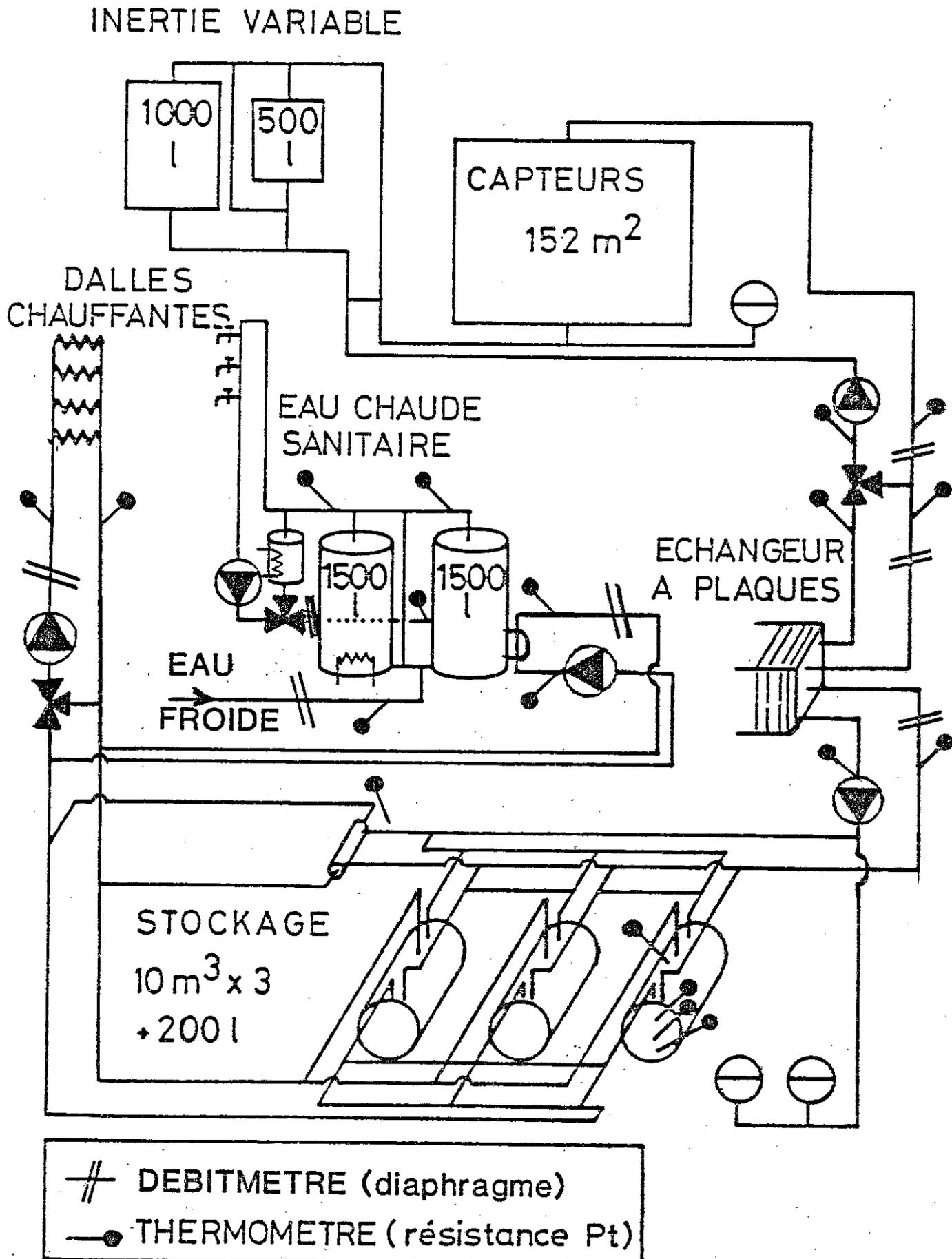


L'immeuble solaire comporte 12 logements HLM locatifs. Il est conçu en deux demi-immeubles accolés, symétriques géométriquement et thermiquement indépendants (photo n° 1). Chaque demi-immeuble comporte deux logements de types T4 et T5 par niveau, sur trois étages, avec un entresol utilisé pour des garages ou pour le local technique de chauffage, d'où l'on pilote et mesure l'expérience.

L'énergie solaire est captée en façade Sud, traitée en mur-rideau, par 305 m<sup>2</sup> de capteurs plans verticaux à eau glycolée. L'éclairage des pièces en Sud est bien assuré par des loggias. Ces capteurs sont des radiateurs classiques FINIMETAL, modèle "REGGANE DIAMANT" allégé, revêtus de peinture noire mate, et placés derrière un simple vitrage. La pompe primaire thermalise les capteurs dès et tant qu'il fait jour. Un échangeur à plaques VICARB, à contre-courant, transfère la chaleur captée à un stockage à eau (3 cuves de 10 m<sup>3</sup> chacune par demi-immeuble) si le niveau de température est suffisant. Cette énergie est alors utilisée pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire collective (un ballon électrique à chauffage nocturne étant prévu en appoint) et pour le chauffage de base des appartements par quatre dalles chauffantes à basse température (tubes d'eau, de 22 à 30°C maximum). L'appoint du chauffage est également électrique, par convecteurs, avec thermostat incorporé, réglables dans chaque pièce. L'ensemble de l'immeuble est équipé d'une isolation thermique soignée de type "tout électrique" (normes DTU 1976 ; G = 0,93 W/m<sup>3</sup>.K). Le renouvellement d'air est assuré par ventilation mécanique simple flux (1 volume/heure). Une régulation tout-ou-rien classique et des vannes trois voies motorisées sur les différents circuits permettent de piloter l'ensemble de l'expérience (figure n° 1).

L'intérêt (et l'originalité) de l'expérience tient au fait que les paramètres solaires essentiels de cet immeuble habité sont tous variables, en configuration symétrique ou différente pour chaque demi-immeuble. Citons notamment, pour chaque demi-immeuble :

FIGURE 1



- le volume de stockage, de 200 l (ballon d'équilibrage) à 30 m<sup>3</sup>, par tranches de 10 m<sup>3</sup> ;
- la surface de captation, de 0 à 152 m<sup>2</sup>, par tranches verticales de 15,2 m<sup>2</sup> par exemple ;
- l'inertie du circuit des capteurs dont la valeur en eau peut varier, d'un facteur 1 à 4 environ, par adjonction de ballons d'eau glycolée de 500 l ou 1000 l (en série ou non) ;
- les débits des différents circuits (primaires, secondaires et même tertiaires) sont également variables.

Les principaux paramètres thermiques sont mesurables, notamment les températures et les débits des différents circuits, les températures dans les cuves de stockage à différents niveaux, la température ambiante du local technique (sous-station), etc... Les données météorologiques et solaires sont mesurées par une station météo en terrasse (température extérieure, rayonnement solaire horizontal global et diffus, vitesse et direction du vent, ...) et le rayonnement global vertical au niveau des capteurs. Une centrale d'acquisition de données de 64 voies dont 6 intégrales permet la scrutation et l'enregistrement de ces différentes mesures. De plus, les consommations électriques ont pu être enregistrées sur de longues périodes, à part, sur 9 voies de cassette magnétique, outre évidemment les compteurs totalisateurs classiques.

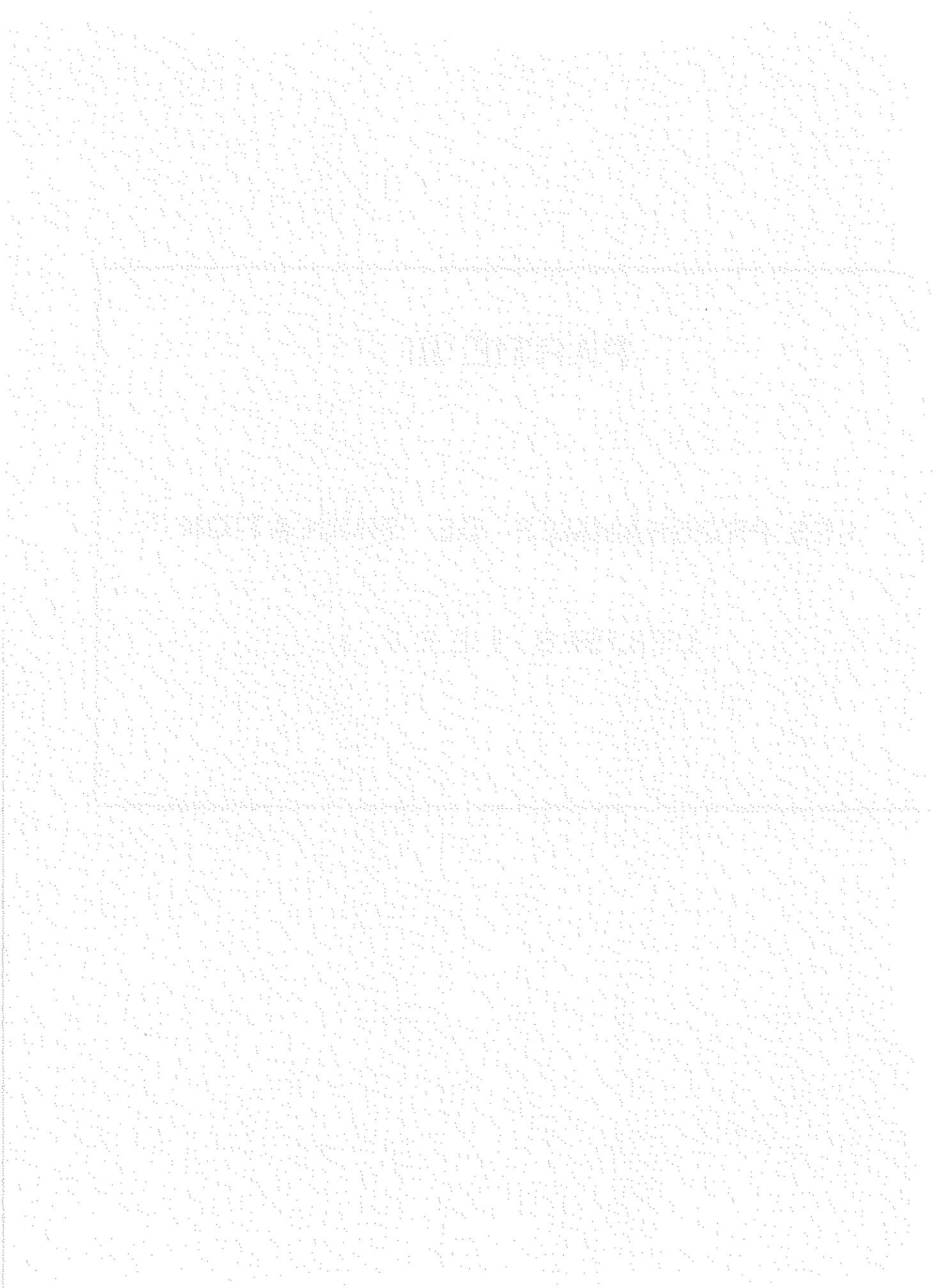
L'expérience a débuté en mars 1978, mais nous n'avons vraiment acquis la maîtrise de la métrologie de l'ensemble que fin août 1978, date à laquelle d'ailleurs la totalité des 12 logements furent occupés. Nous avons retenu finalement pour la simulation-test la période du 6 septembre au 19 octobre 1978, riche en situations variées, malgré des pertes de mesures dues au système de stockage de données, alors sur bandes perforées, ainsi que quelques erreurs sur la mesure des débits. Pour les bilans globaux d'énergie, nous avons complété les absences de mesures, lorsque cela était possible, simplement par interpolation. Il reste aussi que la précision des sondes de mesures, dont l'ordre réel atteint couramment 5 %, est encore moins bonne pour les mesures de quantités de chaleur, surtout lorsque les écarts de température sont faibles et les débits relativement élevés.



# **PARTIE III**

**LES PROGRAMMES DE SIMULATION**

**UTILISES ( E.D.F. )**



### 3.1. LE PROGRAMME CLIM [10]

Il est implanté au Centre de Calcul EDF de Clamart (ordinateurs sous système MVS, de type IBM 360-168 à l'époque, et IBM 30-33 ensuite). Ce programme permet de simuler un bâtiment quelconque (habitation, bureau, local industriel) et de prévoir ses charges de chauffage et (ou) de climatisation, selon son implantation en France et pour un climat "moyen". Pour notre part, tant pour les calculs prévisionnels avec le climat-type de Lyon que pour les essais ultérieurs sur météo réelle, nous utilisons CLIM uniquement pour l'aspect besoins en énergie en vue du chauffage du bâtiment.

#### 3.1.1. La simulation du bâtiment impose un certain nombre d'entrées.

Citons rapidement :

- un récapitulatif précis des matériaux de construction utilisés (caractéristiques mécaniques et thermiques moyennes, selon DTU) ;
- la description des parois opaques intérieures ou extérieures (paroi préfabriquée ou hétérogène, dont on décrit les couches essentielles), des parois vitrées, des cloisons, etc... ;
- un découpage a priori de l'immeuble en "modules" thermiquement semblables, notamment par l'orientation et l'utilisation (par exemple une seule pièce, ou un appartement, ou tout un sous-sol non chauffé).

Pour chaque module retenu, nous précisons la géométrie (nature, forme et dimensions des parois), l'orientation, les "objectifs" thermiques : plage de température intérieure ou d'hygrométrie à maintenir, ou "dérive" (local non chauffé), etc... Les parois intérieures du bâtiment participent à l'équilibre thermique de l'ensemble (si elles sont déclarées dans deux modules adjacents) ou d'abord à celui de leur propre module (cas des cloisons internes à un module, déclarées alors "à même température" que lui).

On devra aussi introduire dans chaque module ses "variables" propres, c'est-à-dire ses postes d'apports ou de déperditions thermiques (ou hygrométriques) propres, notamment : la puissance en chauffage appelable, le taux de renouvellement d'air, les apports "gratuits" moyens de chaleur (sensible ou latente) imputables aux occupants, à l'éclairage, aux appareils domestiques, etc... La simulation pourra être faite en modulant les apports ou les déperditions dans le temps ou l'espace : possibilité de décrire par exemple un profil de puissance journalier, d'introduire une constante de temps dans les effets thermiques de l'éclairage, etc...

On doit enfin évaluer a priori, et avant d'utiliser CLIM, les déperditions moyennes associées à des flux thermiques non perpendiculaires aux parois : ponts thermiques de refend ou de liaisons, au sol, par les murs enterrés, etc... On intègre ces déperditions "supplémentaires" à chaque module, en watt par degré d'écart avec la température extérieure. Ces estimations rapides relèvent des D.T.U. classiques [11] et ne posent pas de problèmes majeurs. Par contre, une estimation a priori des apports gratuits suppose, pour être à peu près correcte, que l'on dispose de mesures, de normes, de statistiques des consommations, du comportement social, etc... Nous pensons qu'il y a là un point délicat des entrées du programme CLIM.

### 3.1.2. Les climats-types de CLIM.

Ils sont accessibles en permanence (sur disques) au Centre de Calcul E.D.F. de Clamart. Ces climats de référence ont été calculés pour vingt-six villes importantes de France [12] . Les données de base étaient les relevés trihoraires de la Météorologie Nationale (cartes S49), concernant notamment la température extérieure, la pression, l'hygrométrie relative, la nébulosité et l'état du ciel, etc... Pour chaque station, on a choisi ensuite une année réelle dont la température moyenne annuelle (calculée à partir des relevés trihoraires) était la plus proche de la moyenne annuelle sur une période de 30 ans (calculée dans les mêmes conditions). Ainsi, pour Lyon, l'année choisie est 1966, de moyenne annuelle 11,56°C alors que la moyenne annuelle de 1937 à

1960 est  $11,40^{\circ}\text{C}$ . Il se trouve malheureusement que, pour cette année choisie, il y a une inversion de température moyenne mensuelle entre février ( $8^{\circ}\text{C}$ ) et mars ( $5,3^{\circ}\text{C}$ ).

Le programme CLIM découpe cette année en 17 520 demi-heures. Le niveau de température extérieure régnant chaque demi-heure est élaboré par le sous-programme TEMEX [13, p. 37]. On ne retient des 8 températures relevées pour un jour que les températures minimale et maximale, et on fait alors passer une pseudo-sinusoïde (cf. annexe 2) par les 4 points suivants :  $T_{\max}$  la veille à 15 h,  $T_{\min}$  le matin à 6 h,  $T_{\max}$  l'après-midi à 15 h et  $T_{\min}$  le lendemain à 6 h. Le sous-programme HYGRO réserve aux 8 relevés hygrométriques, un sort similaire, l'hygrométrie résultante étant déclarée constante sur la journée.

Pour les flux solaires enfin, le traitement des données initiales de la météorologie nationale sur la couche nuageuse sera exposé plus longuement ci-après, Partie V. Retenons ici qu'il était complexe et comportait finalement (et prudemment) plusieurs paramètres que l'on pouvait ajuster en un lieu donné pour que le flux global horizontal, sommé sur l'année, soit plausible ou en accord avec les rares mesures ou méthodes de calcul manuel existant à l'époque.

Parmi les 26 climats-types français disponibles pour CLIM, nous avons choisi LYON plutôt que GRENOBLE. En effet, les moyennes mensuelles des températures extérieures, calculées à partir de relevés journaliers des mini-maxi sur 15 années à Bourgoin [14] sont nettement plus proches des températures extérieures moyennes de LYON, issues des fichiers météorologiques des relevés trihoraires sur 30 années analysés par EDF [12]. La situation géographique et l'implantation de l'immeuble d'ailleurs le rattachent plus naturellement, notamment pour l'ensoleillement et le vent, au climat de LYON (relevés de LYON-BRON ou LYON-SATOLAS) qu'à celui de GRENOBLE (relevés de Saint Etienne de Saint Geoirs ou de Saint Martin d'Hères).

### 3.1.3. Principes du programme CLIM.

Le principe général des calculs est une méthode aux différences finies.

.L'étape standard peut se résumer ainsi : connaissant l'état d'un module au temps  $t$ , connaissant les apports thermiques (et hygrométriques) ou les pertes dus au soleil, à l'air extérieur, aux occupants, aux sources de chauffage, aux modules adjacents, etc..., entre les temps  $t$  et  $t + \Delta t$ , on évalue la température intérieure du module ainsi que la puissance (calorifique) de contrôle à fournir à l'air du module entre les temps  $t$  et  $t + \Delta t$  pour maintenir si possible la température intérieure (et l'hygrométrie) dans les consignes fixées (cf. organigramme, annexe 1).

.On traduit en régime transitoire (rapide, au sens de la Thermique) les flux de chaleur s'écoulant normalement aux différentes parois, opaques ou vitrées, par une discrétisation de l'équation de la chaleur. Chaque paroi homogène ou chaque tranche de matériau de paroi hétérogène est divisée en 4 couches parallèles. On discrétise alors selon tous ces points les dérivées partielles par un schéma implicite de type conservatif (i.e. après intégration) inconditionnellement stable [15, Note HI 1557/02, p. 1 à 5] . Le bilan thermique du module pendant le pas de temps  $\Delta t$  fournit une équation supplémentaire qui fait intervenir les températures de surface des parois, la température intérieure du module, la puissance calorifique de contrôle, les apports ou pertes déclarés, l'échauffement de la pièce et du mobilier (inertie)... On peut noter que les apports thermiques dus à l'ensoleillement sont évalués par les calculs des flux solaires tombant sur les parois opaques, calculs qui sont à la fois très précis, dans leur partie "cosmographique", et approchés (estimation du flux indirect par exemple). Pour les parois vitrées, on calcule de façon approchée la transmission selon le type de vitrage utilisé et on considère que le flux transmis, une fois dans le module, est réparti entièrement et uniformément sur le "plancher" (qui peut être une paroi intérieure quelconque). Les échanges internes d'énergie sont donc simulés uniquement par conduction et convection, et la température de l'air est supposée homogène dans un même module.

.La matrice du système linéaire traduisant la discrétisation des parois du module et son bilan thermique est diagonalement dominante, donc inversible ; elle est inversée par une méthode de factorisation due à Sherman-Morrison [16] : ceci fournit la "droite de réponse" du module :  $xT - Q = K$ , où  $T$  est la température du module au temps  $t + \Delta t$  inconnue,  $Q$  la quantité de chaleur à fournir entre  $t$  et  $t + \Delta t$ ,  $K$  connu tient compte de la "mémoire" du module (état au temps  $t$ , inertie,...) et des apports thermiques divers et  $x$ , également connu, est un scalaire positif qui ne dépend que des caractéristiques physiques du module et du pas de temps. Dans un plan  $T, Q$  cette droite de réponse du module coupe toujours la caractéristique technique (traduction des consignes choisies) en un point donnant la température au temps  $t + \Delta t$  et la puissance à fournir sur le pas de temps.

Le programme mémorise alors et totalise évidemment, sur chaque pas de temps, les énergies nécessaires aux différents modules et au bâtiment total.

#### 3.1.4. Résultats de CLIM.

Les résultats en sortie de CLIM, en tant que programme thermique utilisé isolément, sont d'abord un récapitulatif précis et éventuellement moyenné des divers paramètres d'entrée, ce qui permet des vérifications et quelques statistiques rapides sur la météorologie utilisée. On obtient ensuite les bilans thermiques mensuels et annuel et les consommations d'énergie des différents modules chauffés et de l'ensemble du bâtiment. On a évidemment aussi l'évolution en température interne des différents modules non chauffés décrits. On peut éventuellement obtenir aussi des impressions détaillées de jours particuliers, ce qui permet de suivre heure par heure l'évolution de l'ensemble du bâtiment simulé.



### 3.2. LE PROGRAMME MASOL [ 8 ]

Il agit en complément de CLIM pour simuler le fonctionnement d'un système associant des capteurs plans à eau, une cuve de stockage à eau et un circuit de distribution des calories en vue du chauffage des locaux et de la production d'eau chaude sanitaire.

L'accès à CLIM a lieu essentiellement par cartes perforées ; nous l'avons utilisé du terminal IBM de E.D.F. Renardières et aussi directement au Centre de Calcul E.D.F. de Clamart où il est implanté. MASOL est disponible à l'ordinateur H.P. 21 MX du département ADE de E.D.F. Renardières où nous l'avons utilisé en conversationnel.

#### 3.2.1. Les entrées de MASOL.

La mise en oeuvre du programme MASOL de simulation solaire sur une période climatique donnée suppose que l'on a d'abord fait exécuter CLIM sur cette période. D'ailleurs, CLIM doit être modifié pour éditer sur bande magnétique un fichier contenant, pour chaque demi-heure du calcul :

- le flux solaire incident arrivant sur un mètre carré de vitrage des capteurs (dont on a précisé l'inclinaison sur l'horizontale et l'azimuth dans le module "CAPTEUR") ;
- le flux transmis par ce même vitrage ;
- la température ambiante extérieure ;
- les besoins thermiques du bâtiment, compte tenu des consignes choisies.

Un petit programme, PREBA, permet alors de décoder la bande magnétique éditée par CLIM en EBCDIC pour préparer une bande magnétique en ASC II sur H.P. 21 MX, qui servira de donnée d'entrée (source) à MASOL. PREBA permet aussi quelques analyses statistiques du climat utilisé pour la période simulée (valeurs moyennes mensuelles diverses de la météo).

Outre la bande magnétique précédente, le programme MASOL utilise beaucoup d'autres données d'entrée qui imposent des calculs ou des mesures préalables sur plusieurs parties du système solaire prévu ou installé.

Pour le système "capteurs", on devra préciser, bien sûr, le nombre de vitrages, les surfaces et autres caractéristiques géométriques, les débits. Pour l'aspect énergétique, le programme cerne le capteur par son rendement instantané :

$$\eta = \frac{P_u}{P_s} = \frac{\text{Puissance utile extraite du capteur}}{\text{Puissance solaire globale incidente}}$$

L'équation retenue pour  $\eta$  est celle de Hottel-Whillier-Bliss (1959) :

$$\eta = F \left( \alpha - \beta \frac{T_e - T_{\text{ext}}}{P_s} \right)$$

où  $F$  = facteur correctif global est lié au débit du fluide caloporteur, à ses échanges avec l'absorbeur et à la géométrie de l'absorbeur ;

$\alpha$  = rendement théorique maximal, lié aux qualités optiques globales du système vitre(s)-absorbeur ;

$\beta$  = coefficient de pertes thermiques global ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), lié aux qualités d'isolation thermique du capteur ;

$T_e, T_{\text{ext}}$  = températures moyennes du fluide à l'entrée de l'absorbeur, et ambiante extérieure.

Si le capteur est d'un type classique (ce n'était pas le cas à Bourgoin), on peut utiliser les mesures et corrélations concernant  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $F$ , établies à l'A.D.E.-E.D.F. Renardières par Ph. Chouard et al. [17]. Pour  $F$ , ces auteurs proposent une corrélation permettant de corriger les mesures (ou les calculs) de  $\alpha$  et  $\beta$  faits à incidence nulle, pour un certain débit, etc...

Enfin, le programme utilisant l'inertie des capteurs, on évaluera la "valeur en eau" équivalente à l'acier de l'absorbeur, aux raccords arrière, etc... On précise aussi le fluide caloporteur (masse volumique, chaleur massique) et le débit nominal de la pompe du circuit primaire.

.Pour le système "stockage", le programme demande les caractéristiques géométriques d'une cuve équivalente à l'ensemble du stockage : volume et surface extérieure, nombre de couches isothermes de stratification en température désiré . De plus, la simulation impose une évaluation du coefficient de déperdition thermique moyen de la cuve ( $W/m^2.K$ ) ainsi que la température ambiante moyenne (été ou hiver) du local contenant le stockage et les caractéristiques thermiques du fluide de stockage. Pour Bourgoin, nous avons d'ailleurs intégré à la cuve unique simulée, à la fois géométriquement et thermiquement, les éléments afférents aux divers circuits expérimentaux retenus (tuyaux, vannes, pompes, brides et supports, ...) dans leur partie interne au local technique. L'expérience est venue confirmer que les pertes thermiques de la cuve proprement dite n'étaient qu'une faible part de celles du stockage. Cette étude a nécessité la mise au point d'un petit programme annexe sur H.P. 9810 (ci-dessous Partie V).

.Pour simuler la distribution d'énergie pour le chauffage des locaux, on doit calculer (ou mesurer) la caractéristique globale moyenne d'émission (en  $W/K$ ) et préciser la puissance maximale d'appoint. Pour simuler la résorption des excès d'énergie émise dus aux défauts d'une régulation tout-ou-rien, le programme utilise aussi la masse globale du bâtiment (évaluée dans CLDM) et le coefficient G global moyen. Ceci semble peu réaliste à Bourgoin, d'ailleurs, où les risques de surchauffe, avec un plancher chauffant à basse température comportant presque 4 km de tuyaux, sont négligeables.

.Enfin la préparation de l'eau chaude domestique est simulée en décrivant, comme pour le stockage, un chauffe-eau (volume, surface extérieure), sa température de consigne, sa puissance d'appoint maximale, son coefficient de déperdition thermique moyen. On précise le nombre d'habitants et on se réfère au profil journalier de consommation individuelle d'eau chaude sanitaire à 60°C adopté par le Comité

Français d'Electrothermie [18]. Là encore, la simulation initiale (du calcul prévisionnel) a été revue pour suivre la consommation réelle moyenne des habitants. On a aussi essayé d'intégrer dans un chauffe-eau unique le volume global et les déperditions moyennes associées au ballon solaire, au ballon électrique auxiliaire, aux circuits afférents et au ballon de bouclage.

### 3.2.2. Sorties de MASOL.

Les résultats en sortie de MASOL sont, pour chaque mois de la période simulée (et, au maximum, de l'année) des tableaux précisant l'évolution des températures extérieures, de captage, de stockage et de distribution, de l'énergie solaire incidente, du rendement de captage. On a ensuite pour l'eau chaude sanitaire, pour le chauffage des locaux et pour l'ensemble de ces deux postes l'évolution des besoins, de la part solaire et de celle de l'appoint électrique dans la réponse à ces besoins, de l'économie d'énergie brute ainsi réalisée. En option, on peut également obtenir un listing détaillé de toutes ces grandeurs, sur chaque pas de temps, pour des journées préalablement choisies, ainsi qu'un tracé des courbes associées à partir des fichiers-résultats créés sur disque lors du déroulement du calcul.

### 3.2.3. Principes du programme MASOL.

Le principe général du programme MASOL est de linéariser sur le pas de temps (d'ailleurs adaptable selon... les résultats) l'évolution des températures du captage, de la distribution et des différentes couches du stockage (décrit comme stratifié). On lit la bande-source (climat extérieur & besoins) issue de CLIM pour un jour, puis on linéarise les données sur un pas de temps (par interpolation).

La procédure "standard" sur un pas de temps est la suivante :

- comparaison de la température de sortie des capteurs à la température minimale du stockage, d'où éventuellement charge du stockage ;

- lecture des besoins (eau chaude et chauffage) et extraction d'énergie du stockage si son niveau de température dépasse la consigne minimale, sinon appel à l'appoint électrique ;
- calcul de l'équilibre thermique des diverses couches du stockage et des puissances échangées, c'est-à-dire résolution du système linéaire global traduisant les différents échanges, d'où une nouvelle série de températures (captage, stockage, distribution) ;
- contrôle des puissances échangées et du respect des consignes et hypothèses, sinon itération du processus à partir de nouvelles conditions initiales.

La logique du chauffage des locaux s'articule donc sur trois postes binaires :

- la pompe de charge du stockage (pompe primaire) fonctionne ou non ;
- la pompe "secondaire" de chauffage fonctionne ou non, s'il y a des besoins et si le stockage est à un niveau de température suffisant ;
- l'appoint électrique est sollicité ou non, si la puissance émise ne couvre pas les besoins.

La régulation des émetteurs de chaleur ou de l'appoint électrique est simulée en tout-ou-rien. Ainsi , si l'appoint électrique est appelé, ce sera l'appoint maximal et pendant un pas de temps complet. Si pour cette raison, il y a surchauffe momentanée des locaux, le programme enregistre l'excès d'énergie apporté, le pondère grosso modo par des déperditions globales du bâtiment (d'où la nécessité d'introduire la masse du bâtiment, le volume à chauffer et le facteur G), et le retrace aux besoins du pas de temps suivant.

### 3.2.4. La méthode de calcul de MASOL.

Le système linéaire, résolu à chaque pas de temps, provient de la mise en équation linéarisée des trois modules du système solaire actif : captage, stockage et distribution.

. En ce qui concerne le captage, le bilan d'énergie issu du rendement instantané, théorique ou expérimental (§ 3.2.1.), conduit à l'équation différentielle globale, rapportée au  $m^2$  de capteur :

$$M_1 C_1 \frac{dT_{\text{capt}}}{dt} = F [ \alpha P_s - \beta (T_{\text{capt}} - T_{\text{ext}}) ] - \rho_1 C_1 d_1 (T_e - T_s)$$

où  $M_1$  = masse en eau équivalente globale du capteur (incluant l'inertie),  $kg/m^2$  ;

$\rho_1, C_1$  = masse volumique ( $kg/m^3$ ) et chaleur massique ( $J/kg.K$ ) du fluide primaire ;

$d_1$  = débit nominal du fluide primaire dans une rangée de capteurs en série ( $m^3/s.m^2$ ) ;

$T_{\text{capt}} = \frac{T_e + T_s}{2}$  = température de l'absorbeur, moyenne des températures entrée-sortie du fluide primaire.

On résoud cette équation différentielle, avec la condition initiale  $T_{\text{capt}}(0) = T_{\text{capt}}(t)$ , température du capteur au début du pas de temps précédent, d'où :

$$T_{\text{capt}} = T_{\text{capt}}(0) \exp \left( - \frac{\beta + 2\rho_1 C_1 d_1}{M_1 C_1} t \right) + \frac{\alpha P_s + \beta T_{\text{ext}} + 2\rho_1 C_1 d_1 T_e}{\beta + 2\rho_1 C_1 d_1} \times$$

$$\left[ 1 - \exp \left( - \frac{\beta + 2\rho_1 C_1 d_1}{M_1 C_1} t \right) \right]$$

$d_1 = 0$  si la pompe primaire n'est pas sollicitée. Connaissant  $T_e$ , température inférieure minimale du stockage, la puissance utile fournie au stockage (par  $m^2$  de capteur en série, et l'on décrira  $N_2$  circuits

parallèles) est :

$$P_f = 2N_2 \rho_1 C_1 d_1 (T_{\text{capt}} - T_e)$$

.La modélisation du stockage s'inspire des études de chauffe-eau solaires de CLOSE [19] et de GUTTIERREZ et al. [20]. La cuve de stockage est découpée en N couches isothermes, de même volume, de températures  $T_i$  telles que :  $T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_i \leq \dots \leq T_N$ .

Le fluide issu des capteurs, à la température  $T_s$ , "choisit" la couche k de même densité, telle que  $T_k \leq T_s < T_{k+1}$  et échange de l'énergie avec celle-ci et les suivantes de température plus basse. Cet échange d'énergie sera proportionnel aux écarts  $T_{k+1} - T_k$ , dans les couches successives 1, 2, 3, ..., k avec  $T_{k+1} = T_s$ , et au débit massique du fluide.

On écrit de même les échanges simulant le chauffage pour les couches de température  $T_i \geq T_R$  ( $T_R$  température de retour du circuit de chauffage), ainsi que les échanges de l'eau chaude domestique pour les couches de température supérieure à 10°C, et enfin les déperditions de la cuve elle-même dans son environnement pour les couches de température  $T_i \geq T_{ac}$ ,  $T_{ac}$  étant la température de l'ambiance de la cuve (fig. 2 et 3).

Le bilan thermique de la i-ème couche s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{M_2 C_2}{N} \frac{dT_i}{dt} = & N_2 \rho_1 C_1 d_1 [y_i (T_s - T_i) + Y_i (T_{i+1} - T_i)] - \rho_2 C_2 d_2 x \\ & [x_i (T_i - T_R) + X_i (T_i - T_{i+1})] - \rho_2 C_2 d_3 (T_i - T_{i+1}) \\ & - \rho_2 C_2 d_4 (T_i - T_{i-1}) - K S_i (T_i - T_{ac}) \end{aligned}$$

où  $\rho_2, C_2, M_2$  = masse volumique, chaleur massique, masse totale du fluide de stockage ;

$d_2$  = débit du fluide secondaire ;

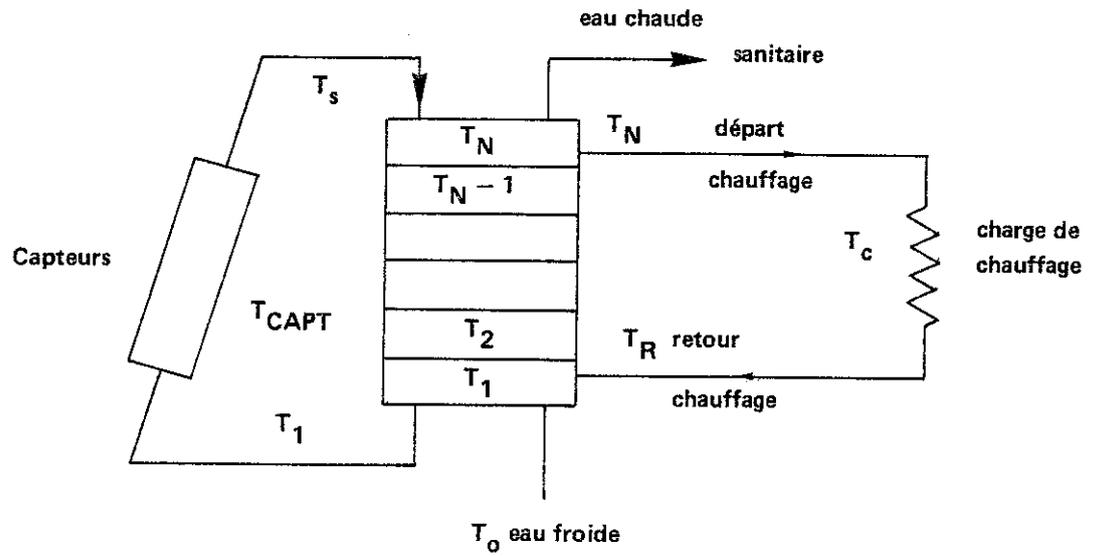


Figure 2 : Modélisation de la cuve de stockage  
(D'après R. Franchisseur)

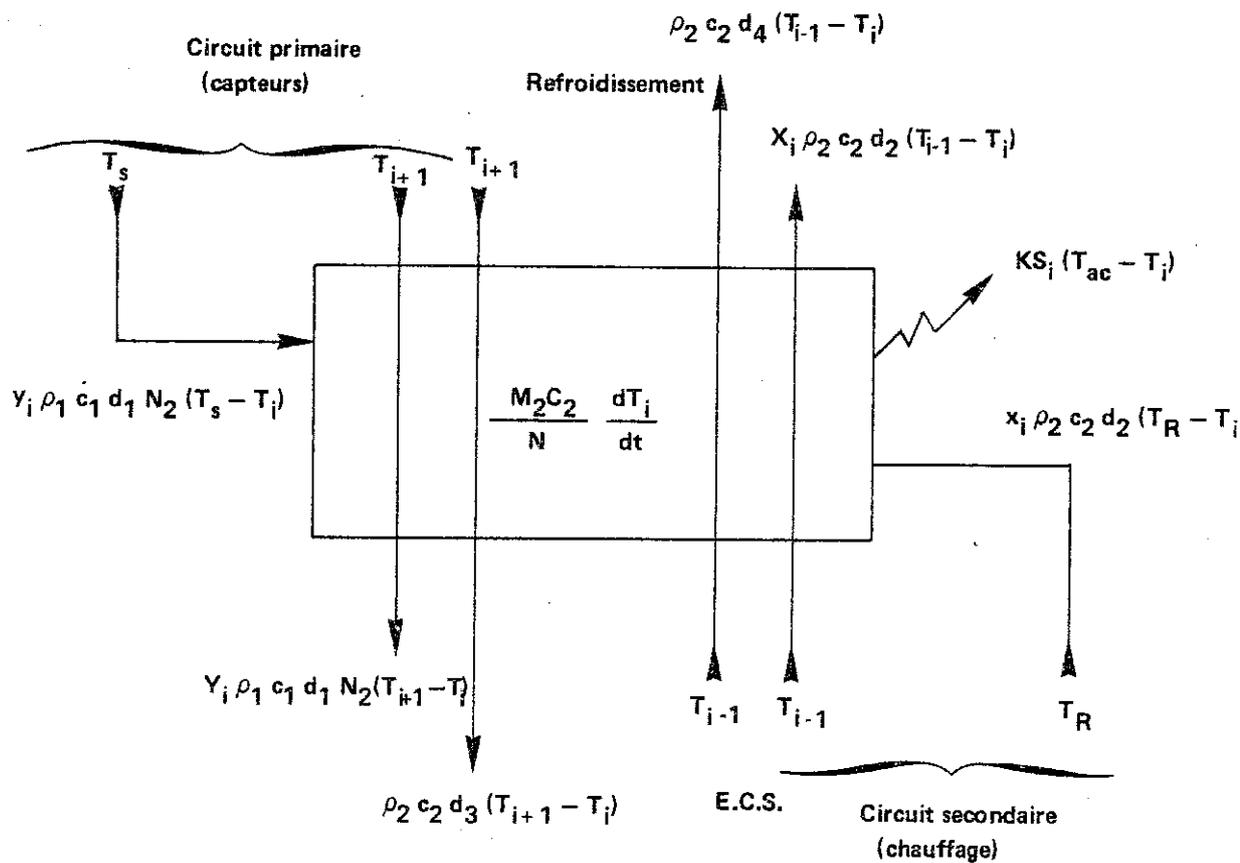


Figure 3 : Schéma des échanges au niveau de la couche i  
(D'après R. Franchisseur)

$d_4$  = débit de puisage de l'eau chaude sanitaire ( $T_0 = 10^\circ\text{C}$ , eau de la ville) ;

$d_3$  = débit du fluide de refroidissement supplémentaire du stockage (cas où sa température excède une consigne préfixée,  $95^\circ\text{C}$  par exemple) ;

$K, S_i$  = coefficient de pertes thermiques ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ ) et surface de la couche  $i$  ( $\text{m}^2$ ).

Enfin,  $x_i, X_i, y_i, Y_i$  sont des paramètres binaires permettant d'identifier les couches qui participent aux échanges. Pour la charge du stockage par les capteurs :

$$\begin{cases} Y_i = 1 & \text{si } T_i \leq T_s < T_{i+1} \\ Y_i = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et

$$Y_i = \sum_{j=1}^N y_j (1 - \delta_{ij}) (1 - \delta_{iN})$$

où  $\delta_{k m}$  est le symbole de Kronecker.

Pour les "pertes" du stockage, traduisant le chauffage :

$$\begin{cases} x_i = 1 & \text{si } T_{i-1} < T_R \leq T_i & \text{et } X_i = \sum_{j=1}^i x_j (1 - \delta_{ij}) (1 - \delta_{ii}) \\ = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

.Enfin, la distribution de l'énergie de chauffage est simulée par une émission linéique moyenne  $R_a$ , en  $\text{W/m.K}$ . D'où :

$$M_3 C_2 \frac{dT_c}{dt} = \rho_2 C_2 d_2 (T_N - T_R) - L R_a (T_c - T_{int})$$

où  $L, M_3$  = longueur (m) de l'émetteur & masse équivalente totale (kg) du circuit de chauffage ;

$T_N$  = température de départ du chauffage (ou de la couche N du stockage) ;

$T_C = \frac{T_N + T_R}{2}$  = température moyenne du circuit de chauffage ;

$T_{int}$  = température ambiante intérieure (des locaux à chauffer).

.En posant  $T_{N+1} = T_{capt}$  et  $T_{N+2} = T_C$ , avec  $T_s = 2T_{capt} - T_1$  et  $T_R = 2T_C - T_N$ , il reste N+2 températures inconnues. La modélisation de l'ensemble se traduit donc, pour un stockage à N couches, par un système différentiel de N+2 équations à N+2 inconnues de la forme :

$$\frac{d}{dt} [T] = A \cdot [T] + B,$$

où [T] est le vecteur-colonne des N+2 températures inconnues, A et B étant des matrices traduisant les bilans thermiques des 3 modules simulés (stockage, captage, distribution) sur le pas de temps. Ce système est résolu, à chaque pas de temps, par une méthode de RUNGE-KUTTA-MERSON, les conditions initiales étant les N+2 températures obtenues au pas de temps précédent. La continuité physique de la simulation globale est assurée par les hypothèses  $T_e = T_1$  (température d'entrée des capteurs = température de la couche basse du stockage) et en déclarant la température  $T_N$  commune à la couche N du stockage et au départ du circuit chauffage. La cohérence physique est contrôlée par la compatibilité des températures et des puissances échangées avec les consignes et les hypothèses choisies. La convergence numérique a toujours été réalisée, mais une sauvegarde est prévue pour limiter le nombre d'itérations sur le pas de temps ; cette "sortie" a eu lieu lors d'entrées de débits nominaux aberrants (rappelons que les équations du système sont déjà issues de bilans thermiques).

# **PARTIE IV**

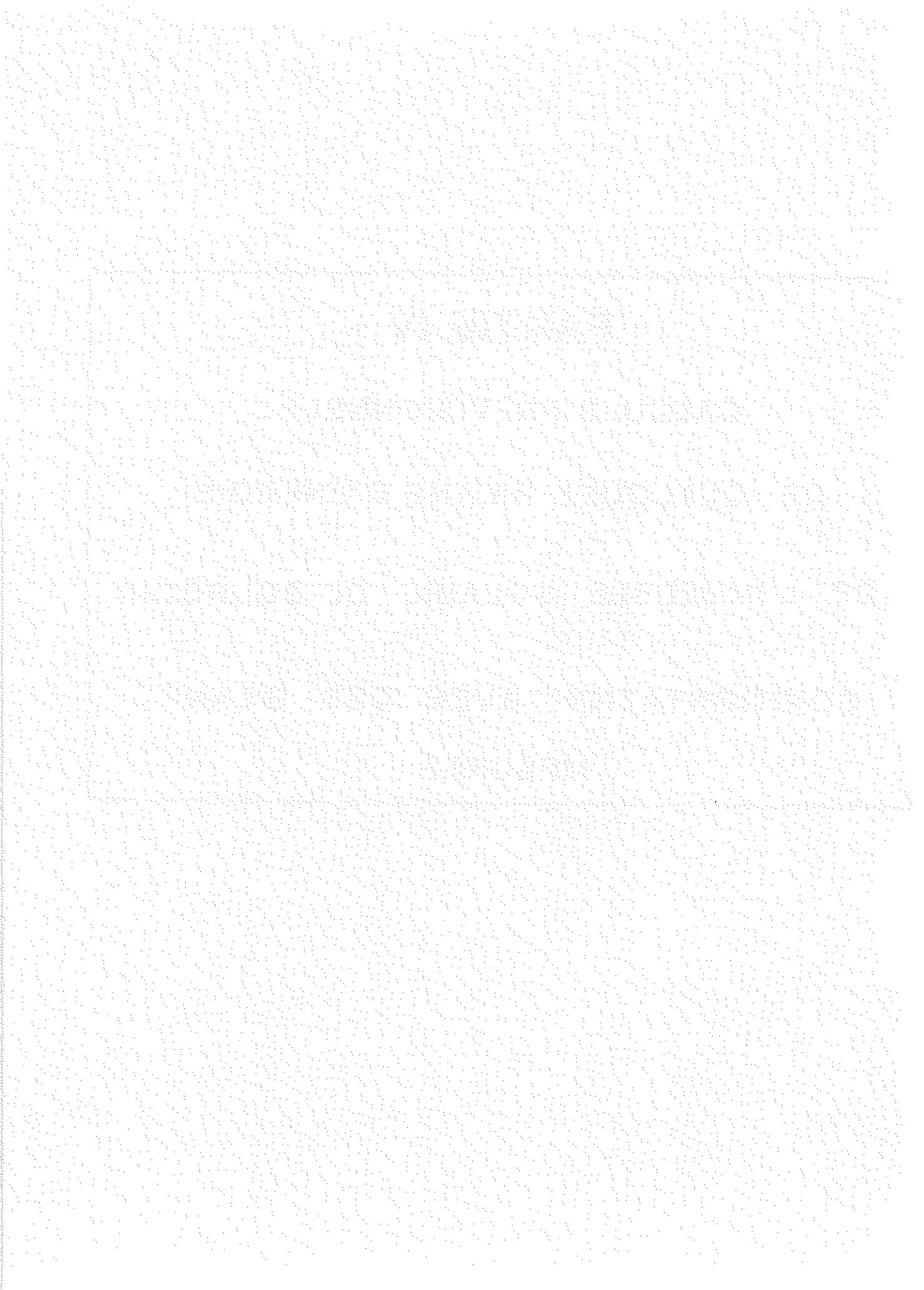
**CALCULS PREVISIONNELS**

**DE QUELQUES BILANS D'ENERGIE**

**DE L'IMMEUBLE SOLAIRE DE BOURGOIN**

**CONFRONTATION AVEC DES BILANS**

**MESURES**



Nous avons utilisé le programme CLIM sur le climat-type de Lyon pour estimer les besoins moyens annuels en énergie pour le chauffage, puis le programme MASOL, dans une configuration "solaire" de l'immeuble présumée la plus courante, pour prévoir le bilan d'énergie annuel global (chauffage des locaux et eau chaude sanitaire) [21] . Nous avons ensuite étudié par simulation numérique l'influence des variations de plusieurs paramètres solaires sur le comportement énergétique global, par MASOL, mais toujours avec cette météorologie moyenne de Lyon (ci-dessous § 4.5).

Reprenant ici l'essentiel des résultats de ces simulations, nous les comparons avec quelques bilans d'énergie mesurés à Bourgoin, dont certains sont publiés [22,23] .

Nous citons aussi d'autres méthodes simplifiées tant de prévision de l'énergie de chauffage du bâtiment seulement que de prévision énergétique globale incluant l'option solaire ; ces méthodes sont simplement manuelles ou implantées sur miniordinateur. Nous les avons aussi appliqué à l'expérience de Bourgoin en calculant une approximation des degrés-jours ou en introduisant un climat local très schématique.



#### 4.1. SIMULATION DE L'IMMEUBLE SOLAIRE EXPERIMENTAL

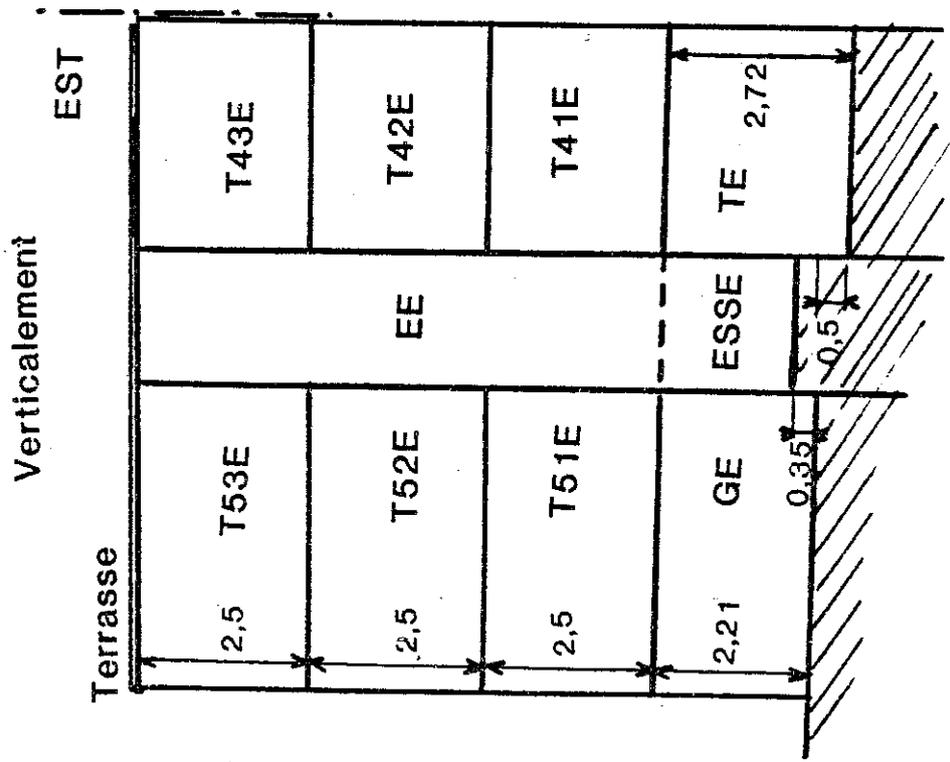
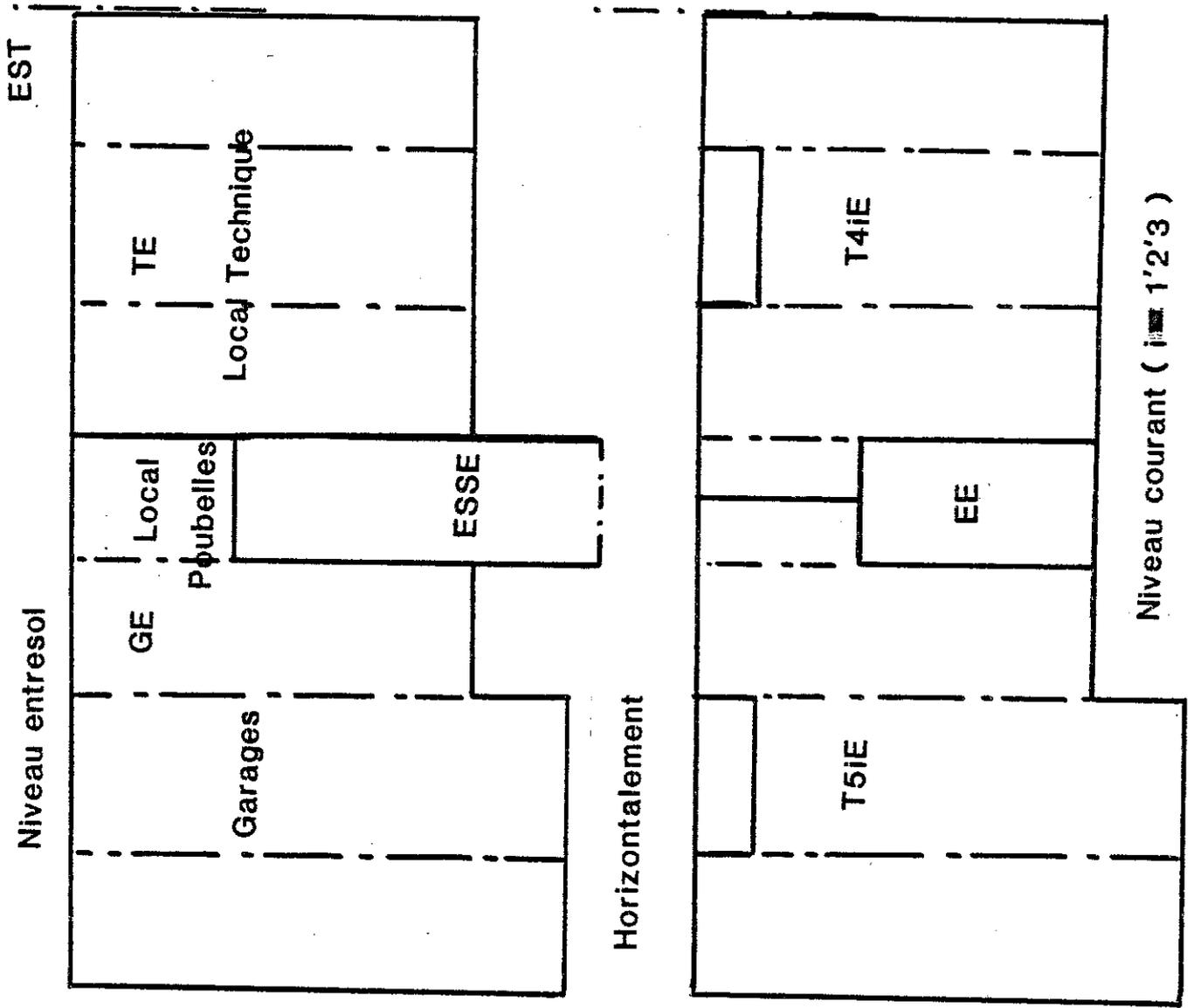
##### 4.1.1. Description initiale de l'immeuble pour le programme CLIM.

Pour décrire de façon précise dans CLIM les 12 principaux matériaux de construction utilisés et la vingtaine de parois différentes employées dans l'immeuble, nous avons consulté le descriptif général et les plans d'architecture du bâtiment, puis contacté les diverses entreprises responsables de la construction, enfin utilisé abondamment les D.T.U. de Thermique du Bâtiment [11]. Les parois vitrées, à l'exception du vitrage des capteurs, ont été décrites par référence à la bibliothèque interne du CLIM. En effet, les courbes expérimentales de transmission du flux solaire direct par les vitrages, établies par l'A.I.C.V.F. [24], ont été bien lissées par une relation empirique selon l'angle d'incidence, par Ch. Maillard et al. [15]. Le vitrage double employé à Bourgoin est très proche de l'un des 14 analysés dans le programme (cf. annexe 3).

Pour le découpage thermique de l'immeuble en "modules", nous avons décrit le demi-immeuble Ouest par symétrie (i.e. mêmes modules où l'orientation Est est permutée en Ouest), en gardant toutefois les consignes ou les variables disponibles. Nous avons ainsi retenu 10 modules Est (lettre E) (figure n° 4) :

- à l'entresol (niveaux 0 à 1), on a distingué, à cause de leur affectation ou de leur position :
  - . les 3 garages et le local-poubelle, non chauffés : un module noté GE,
  - . le local technique, chauffé de par sa fonction, de niveau -0,5 m par rapport à GE, module noté TE,
  - . l'escalier "sous-sol", de niveau 0, ou +0,35 m par rapport à GE, module noté ESSE : il comprend l'avancée sur façade Nord, avec porte-sas, et il est séparé du reste de la cage d'escalier par un plafond-plancher fictif, déclaré à même température ;

FIGURE 4



- pour les autres niveaux, sur chaque étage, nous avons pris deux modules correspondant aux deux appartements (par exemple T<sub>51</sub>E et T<sub>41</sub>E au 1er niveau, T<sub>52</sub>E, etc...). Ils sont en effet relativement différents par leur position (pignon ou centre) et par leurs modules adjacents à l'entresol (GE ou TE) ;
- la cage d'escalier, du niveau 1 à terrasse, constitue un module noté EE. Les deux modules simulant la cage d'escalier, EE et ESSE, sont décrits en dérive thermique (-10 à +50°C), mais avec toutes leurs parois extérieures ou adjacentes aux autres modules, chauffés ou non. Une contrainte de la 1ère version du programme CLIM utilisée limitait d'ailleurs le nombre de parois à 10 par module, ce qui nous avait imposé la séparation fictive de l'escalier en 2 modules. Dans la 2ème version de CLIM finalement implantée (autorisant jusqu'à 20 parois par module), nous avons maintenu cette solution pour refléter les différences thermiques de ces deux parties, notamment :
  - . Sur EE, un renouvellement d'air de 1 volume par heure (communication par les portes palières avec les appartements à ce taux et intégration de la gaine technique plus ou moins "ventilée" dans ce module).
  - . Sur ESSE, renouvellement de 2 volumes par heure à cause du sas d'entrée, pas toujours fermé, et du renouvellement d'air fixe important installé sur le local des vide-ordures (300 m<sup>3</sup>/h pour 21 m<sup>3</sup>).
 Enfin l'inertie correspondant aux marches de l'escalier et aux paliers est simulée, outre le plancher-plafond fictif séparant EE et ESSE, par un supplément de cloisons internes en béton, déclarées à même température que l'ambiante du module lui-même sur leurs deux faces.

Nous avons aussi évalué manuellement (DTU ou guides de l'A.I.C.V.F.) les "ponts thermiques" véritables (k linéiques des diverses liaisons où le flux de chaleur cesse d'être normal à la paroi) ou simulant des déperditions difficilement "standardisables" (pertes au sol par les murs de GE, par les murs enterrés de TE, pertes vers les locaux non chauffés GE ou TE par les piliers soutenant les planchers du 1er niveau, etc...). Ces "ponts thermiques", totalisés pour chaque module, leur sont intégrés en Watt par degré.

Enfin, pour définir les postes d'apports d'énergie, en chaleur sensible ou latente, nous avons précisé les puissances de chauffage d'appoint électrique appelables, les renouvellements d'air installés (V.M.C.) ou prévus (normes DTU), un profil d'occupation des locaux sur 24 heures ; puis nous avons évalué (avec difficulté) un profil "d'apports gratuits".

Les apports gratuits par l'éclairage ont été estimés en respectant les puissances d'éclairage installées et par référence à des durées moyennes d'utilisation journalière [25a & 25b] . On a supposé aussi que 95 % de la puissance électrique installée était récupérable sous forme de chauffage dans le local [26] . Nous avons ainsi simulé un apport thermique moyen journalier par l'éclairage de 770 Wh par appartement, soit une puissance moyenne de  $2W/m^2$ , répartie sur 4 heures (de 6 à 8 h et de 18 à 20 h). Ces apports par l'éclairage sont de plus asservis au flux solaire instantané pénétrant dans le module.

Pour estimer les apports gratuits dus à l'électroménager, nous utilisons des statistiques issues de mesures faites par EDF sur un millier de logements pendant 5 ans, avec des compteurs spécifiques et des enregistrements sur bandes magnétiques [27a et 27b]. Ces documents donnent une idée des valeurs moyennes des énergies (électriques) consommées pour d'autres usages que le chauffage, dont nous avons retranché un usage moyen "courant" d'eau chaude sanitaire. Prévoyant alors une installation moyenne d'appareils électroménagers [25b] , estimant leurs puissances nominales courantes [25c] et, pour une utilisation journalière moyenne, la fraction d'énergie récupérable pour le chauffage des locaux [25b et 10, note HC 312 W 692 p. 56 ], nous avons recalé l'usage global d'énergie sur les statistiques EDF (ci-dessus). Nous avons donc initialement, avant toute mesure, simulé un apport global journalier moyen, par l'électroménager, de 3090 Wh par logement. Nous avons prévu un apport de 425 W sur 6 heures (7 à 9, 11 à 13, 18 à 20) pour la cuisine ou le lavage, et 30 W sur les 18 heures restantes, représentant un faible usage en continu (réfrigérateur, ménage ou repassage, télévision).

Pour simuler le local technique (sous-station), nous pouvions déclarer le module "TE" correspondant comme "à température constante", hypothèse sans doute peu réaliste, ou comme "non chauffé", ce qui est

sûrement faux. Nous avons plutôt tenté d'établir un bilan thermique sommaire du module TE sur la saison de chauffage et sur l'été :

- d'une part, en calculant les échanges thermiques du module TE à travers ses parois extérieures ou contiguës aux autres modules, par les refonds ou au sol, par renouvellement d'air, etc... ;
- d'autre part, en estimant les apports thermiques au module TE par les pertes du stockage, des tuyaux, etc...

Pour les calculs des échanges par conduction ou convection dans les parois et liaisons, nous avons utilisé les D.T.U. [11] , ainsi que pour estimer les températures moyennes des différents locaux contigus, selon la température extérieure moyennée sur la saison de chauffage ou l'été à Bourgoin [14] .

Pour le calcul des coefficients de déperdition des composants du circuit solaire, notamment réservoirs et tuyaux calorifugés, nous avons utilisé des abaques établis par le COSTIC [28, § 6.3, pp. 341-346] .

Pour ce premier calcul, nous avons d'ailleurs très sommairement assimilé l'ensemble des tuyaux calorifugés internes à ce module à 250 mètres d'un tuyau calorifugé de diamètre moyen (50/60). De même, parmi les 83 vannes, 210 brides, 150 supports, etc..., nous avons retenu un certain pourcentage d'éléments "chauds", susceptibles de déperditions simultanément, décrits en longueur équivalente de 290 mètres de tuyau 50/60 [28, 6X, p. 346] . Nous avons décrit alors une configuration moyenne de cuves ou ballons "chauds", en incluant l'équivalent en eau des tuyaux, pour obtenir une surface globale de déperdition et un coefficient K moyen selon l'isolation [28, 6 XII] .

Les déperditions moyennes de ces éléments ont été calculées par rapport à une température moyenne du stockage issue d'un calcul manuel rapide, avec abaques solaires (ci-dessous § 4.3.2.1.). Nous avons estimé "forfaitairement" que l'on pouvait assimiler les pompes et l'échangeur à une puissance installée de 350 Watts fonctionnant en continu. On en a tiré une température moyenne du module TE (16,5 °C en

saison de chauffage et 32°C l'été) et une puissance moyenne équivalente de 3 000 Watts simulant, pour CLIM, l'ensemble des apports thermiques internes à ce local.

Ultérieurement, et après une analyse plus fine des différents circuits selon la configuration solaire retenue, nous avons mis au point un programme auxiliaire traduisant le bilan thermique du local technique, avec itération sur les températures moyennes inconnues, ce qui permettait aussi d'estimer les déperditions moyennes du stockage.

#### 4.1.2. Simulation par MASOL d'une configuration solaire standard (calcul prévisionnel initial).

a) Pour simuler le module "Captation de l'Energie" dans MASOL, nous avons besoin des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  de l'équation instantanée du capteur :  $P_u = \alpha P_s - \beta (T_e - T_{ext})$  (§ 3.2.1.). Après un calcul classique des échanges convectifs et radiatifs avec l'atmosphère et des déperditions par la face arrière [21], nous avons retenu l'équation de la puissance utile instantanée à incidence normale :

$P_u = \varepsilon \times 0,8 P_u - 7,91 (T_e - T_{ext})$  où le facteur  $\varepsilon$  tient compte des diverses incidences pour la transmission des flux (mêmes hypothèses que pour CLIM, cf. § 4.1.1.).

b) Le principe du programme MASOL impose de simuler le "stockage" d'énergie par une seule cuve, équivalente à l'ensemble du stockage et stratifiée en couches isothermes de même hauteur. Dès le calcul prévisionnel initial, nous avons choisi d'intégrer à cette cuve quelques éléments chauds internes au local technique, tant pour leur volume que pour leurs déperditions, associées à une configuration solaire courante (surface de captation maximale et inertie du circuit primaire minimale). Nous avons toujours simulé une cuve stratifiée en 6 couches (pour respecter la masse équivalente en eau importante), mais en conservant la hauteur d'une cuve réelle. Le volume et la surface retenus initialement pour cette cuve équivalente représentaient très grossièrement, pour un demi-immeuble, les éléments chauds suivants : - 3 cuves (30 m<sup>3</sup>) -

3000 l de ballons E.C.S., dont 1 500 l, purement électriques, faisaient partie à tort du module stockage - une "moyenne de ballons annexes (bouclage, etc...) - 500 l de tuyaux équivalents (ci-dessus § 4.1.1.). On en déduit une surface globale de déperdition de l'ordre de  $144 \text{ m}^2$ , avec un coefficient moyen de  $3 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , qui traduit les déperditions globales moyennes évaluées par un bilan solaire manuel sommaire (ci-dessous § 4.3.3.). Ce bilan a permis aussi de fixer pour MASOL la température moyenne de l'ambiance de cette cuve ( $16,5^\circ\text{C}$  du 1/10 au 20/05 et  $32^\circ\text{C}$  l'été).

Pour simuler la préparation de l'eau chaude sanitaire collective (toujours pour un demi-immeuble), le calcul prévisionnel initial décrivait sommairement un chauffe-eau : ballon de 1 500 l recevant l'eau du stockage et maintenu à  $60^\circ\text{C}$ , éventuellement par une résistance électrique d'appoint (13 KW), avec un coefficient de déperdition thermique moyen  $0,6 \text{ W/m}^2.\text{K}$  (valeur courante prise par EDF).

c) Pour simuler enfin la distribution d'énergie de chauffage, nous avons estimé l'émission moyenne du plancher chauffant selon la méthode manuelle du COSTIC [28, pp. 228 à 235]. Nous précisons simplement ici le principe de cette évaluation :

- calcul des résistances thermiques unitaires supérieure et inférieure, d'où une approximation de la répartition verticale des flux émis par le tube ;
- estimation de la résistance linéique globale du panneau ;
- approximation (abaques) de la puissance d'émission par unité de longueur et par degré d'écart entre la température moyenne du fluide caloporteur  $T_e$  et l'ambiance à  $19,6^\circ\text{C}$  (moyenne, pondérée selon la répartition verticale des flux, des températures moyennes d'ambiance supérieure et inférieure).

En analysant séparément la dalle chauffante du 1er niveau (sur entresol non chauffé), la dalle sous terrasse et les deux dalles

courantes, nous en déduisons l'émission totale moyenne des 4 niveaux de dalles chauffantes, 2 616 Watts par degré, avec  $\Delta\theta = \theta - 19,6$  ,  $\theta$  température de l'eau chaude.

Il n'existait d'ailleurs pas, à l'époque, à notre connaissance, de programme informatique simulant une telle dalle chauffante par une méthode élaborée (différences ou éléments finis), même si une méthodologie en a souvent été proposée [29] .

#### 4.1.3. Modifications des entrées initiales des programmes CLIM et MASOL.

La configuration thermique de la première simulation par CLIM a été conservée. Nous avons simplement, par la suite, rectifié quelques descriptions de matériaux modifiés par rapport aux plans initiaux (ci-dessous § 4.4.2.) ou corrigé la simulation de la puissance interne au local technique (§ 5.2.). Nous avons aussi fait varier les températures de consigne minimale dans les modules chauffés pour la saison de chauffage (§ 4.4.4.).

Avec MASOL, nous avons analysé les bilans énergétiques de réponse à des variations de plusieurs paramètres solaires : simulation de surface de captation variable, de volumes de stockage variables ou d'inertie globale du circuit primaire variable, en respectant les possibilités d'expérimentation (ci-dessous § 4.5.). Par la suite, nous avons également "recalé" quelques estimations du calcul prévisionnel initial concernant le comportement des habitants d'après les mesures réelles, notamment le taux d'occupation des locaux, selon l'heure et les consommations en eau chaude sanitaire ou en énergie pour l'électroménager. A notre avis, ces entrées plus précises ne se justifient évidemment que sur une simulation en climat réel, pour tester alors d'autres parties des programmes de simulation (ci-dessous partie V). Nous avons d'ailleurs aussi revu nos hypothèses du calcul théorique des capteurs en utilisant des moyennes mesurées sur cette période, notamment la vitesse de vent moyenne (2,5 m/s au lieu de 8 m/s). Nous avons alors maintenu quasiment  $\alpha = 0,81$  et rectifié  $\beta$  à  $7,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Des mesures effectuées ultérieurement confirment cet ordre de grandeur.

## 4.2. LE CHAUFFAGE DES LOCAUX : LES PREVISIONS CONFRONTEES AUX MESURES

Nous adopterons comme référence le demi-immeuble , indifférentié pour les simulations, mais référencé Est ou Ouest pour les mesures. Ici, tant pour les prévisions que pour les mesures, l'analyse porte sur les besoins globaux indépendamment du système de chauffage installé .

### 4.2.1. Les bilans prévisionnels de CLIM face aux mesures.

#### 4.2.1.1. Les bilans annuels :

.La prévision moyenne de l'énergie utilisée pour le chauffage des locaux, avec le climat-type de Lyon (§ 4.1.1.), est liée aussi aux niveaux d'apports gratuits simulés et aux températures intérieures de consigne imposées. Nous étudions plus en détail les réponses de CLIM à diverses variations de ce type (ci-dessous § 4.4.) et ne retenons ici qu'un échantillonnage rapide de quelques bilans annuels moyens.

Une première ébauche de simulation contenait des apports gratuits domestiques estimés selon des valeurs usuelles EDF (médianes déduites de mesures de consommations de logements tout-électriques [26 & 27]) : pour l'éclairage journalier, 10 W/m<sup>2</sup> répartis sur 6 heures ; pour l'électroménager, 1 000 W sur 2 heures et 250 W sur 22 heures dans chaque logement. On trouve alors pour ces deux postes et par an une énergie globale (demi-immeuble)  $D = 29\ 250$  Kwh alors que l'énergie nécessaire au chauffage, pour des consignes intérieures minimales de 20°C (Est et Ouest), est  $C = 40\ 900$  Kwh.

Une surchauffe manifeste des appartements, surtout entre juin et octobre, nous a conduit à une évaluation plus précise des apports gratuits moyens, déjà citée ci-dessus § 4.1.1., d'où pour les mêmes consignes intérieures :  $D = 8\ 450$  Kwh et  $C = 50\ 850$  Kwh. Nous avons ensuite, et pour toutes les versions ultérieures, recalé les apports gratuits domestiques sur les premières mesures, soit  $D = 11\ 016$  Kwh.

Avec une consigne interne 19°C (Est), nous trouvons  $C = 47\ 954$  Kwh, puis, après avoir revu quelques matériaux  $C = 46\ 900$  Kwh. Enfin, pour la consigne 19,5°C, nous avons  $C = 50\ 106$  Kwh.

En adoptant comme prévision de référence la moyenne des deux premières prévisions (qui n'utilisaient pas encore de données issues des mesures) soit  $C_0 = 45\ 875$  Kwh, on peut étudier la dispersion de l'échantillonnage des diverses prévisions par les écarts  $d = C - C_0$

à cette moyenne. On trouve un écart  $\bar{d} = 1\ 467$  Kwh avec son erreur quadratique moyenne  $s_d = 3\ 937$  Kwh. Le  $t$  de Student de cet échantillon est :

$$t = \frac{\bar{d}/\sqrt{5}}{s_d} = 0,833$$

(valeur ayant la probabilité 0,45 d'être dépassée).

C Kwh	d = C - C <sub>0</sub> Kwh
40 900	- 4 975
50 850	+ 4 975
47 954	+ 2 079
46 900	+ 1 025
50 106	+ 4 231

La moyenne des cinq prévisions est :  $\bar{C} = 47\ 342$  Kwh, avec  $s_c = 3\ 937$  Kwh. Nous considérons donc que la prévision moyenne standard du CLIM est  $C = 47\ 500$  Kwh avec un écart quadratique moyen  $s_c = 4\ 000$  Kwh.

.Les mesures des énergies utilisées pour le chauffage pour les trois saisons de chauffage dépouillées (1978-79 à 1980-81) sont assez dispersées puisque l'écart maximal atteint 10 000 Kwh. Nous étudions la dispersion par les écarts à la consommation moyenne mesurée pour un demi-immeuble (c'est-à-dire moyenne des 6 mesures) :  $\bar{C}_{mes} = 46\ 074$  Kwh.

<u>EST</u> C Kwh	d=C- $\bar{C}_{mes}$ Kwh	<u>OUEST</u> C Kwh	d=C- $\bar{C}_{mes}$ Kwh
43 134	- 2 940	51 818	5 744
45 788	- 286	49 104	3 030
44 659	- 1 415	41 943	- 4 131

On trouve un écart quadratique moyen :

$$s_d = 3\ 740 \text{ Kwh}$$

relativement élevé par rapport à l'énergie moyenne mesurée  $\bar{C}_{mes}$  (de l'ordre de 8 %).

.A climat égal, d'ailleurs, les écarts entre les consommations annuelles de chauffage des habitants des deux demi-immeubles Est et Ouest semblent également importants :

Saison de mesures	1978-79	1979-80	1980-81
$X = C_{EST}$	47 134 Kwh	45 788 Kwh	44 659 Kwh
$Y = C_{OUEST}$	51 818 Kwh	49 104 Kwh	41 943 Kwh
$Z = Y - X$	8 684 Kwh	3 316 Kwh	-2 716 Kwh

Bien que l'échantillon soit très restreint, on note la moyenne de la différence :

$$\bar{Z} = 3\,095 \text{ Kwh}$$

, son écart quadratique  $s_z = 5\,700 \text{ Kwh}$  (et

$t = \frac{\bar{Z}\sqrt{3}}{s_z} = 0,94$ , qui avait seulement la probabilité 45 % d'être dépassé).

On constate donc que les écarts entre les mesures et les prévisions par CLIM, pour les énergies nécessaires au chauffage, sont du même ordre de grandeur que la dispersion propre des mesures annuelles ( $s_d = 3\,740 \text{ Kwh}$ ) ou que la fluctuation due au comportement des habitants ( $\bar{Z} = 3\,095 \text{ Kwh}$ ). Par rapport à la prévision annuelle "standard" ( $C = 47\,500 \text{ Kwh}$ ), la moyenne mesurée en Est est  $44\,527 \text{ Kwh}$  ( $-2\,973 \text{ Kwh}$  et  $-7\%$  environ) et en Ouest :  $47\,622 \text{ Kwh}$  ( $+122 \text{ Kwh}$  et  $+0,3\%$  environ) ; la moyenne mesurée pour un demi-immeuble est  $46\,074 \text{ Kwh}$  ( $-1\,425 \text{ Kwh}$  et  $-3\%$  environ).

.Enfin, nous remarquons que la saison de chauffage 1978-79 présente la température extérieure moyenne la plus proche de celle du climat-type ( $7,66^\circ\text{C}$  pour  $7,75^\circ\text{C}$ ) et que les degrés-jours simulés et mesurés sont également très voisins. La consommation mesurée en Est ( $47\,134 \text{ Kwh}$ ) est alors très proche de la valeur standard simulée ( $47\,500 \text{ Kwh}$ ) pour une consigne intérieure minimale de  $20^\circ\text{C}$ .



#### 4.2.1.2. Les bilans mensuels :

.Contrairement aux bilans annuels, la comparaison des énergies consommées pour le chauffage mois par mois avec le bilan prévisionnel mensuel issu du climat-type de LYON dépend beaucoup plus des différences de climat. Néanmoins, en considérant les évolutions mensuelles (figure 5), on peut noter quelques points intéressants : en novembre, décembre et janvier, où les températures moyennes mesurées sont pourtant très voisines des températures simulées, on observe pour les énergies de chauffage le comportement "économe" des habitants. L'inversion février-mars du climat-type ne correspond pas à la réalité pour les trois saisons de chauffage analysées. Par contre en avril, mai et octobre, il semble qu'il y a eu, régulièrement, surconsommation de l'énergie solaire (gratuite) pour le chauffage. Avec d'autres recoupements d'ailleurs, il semble que ce comportement énergétique, sous-consommation en chauffage électrique au fort de l'hiver et surconsommation en chauffage solaire aux demi-saisons, soit relativement constant à Bourgoin.

Pour tenir compte du paramètre température extérieure, nous avons représenté les énergies mensuelles globales de chauffage (solaire + appoints) mesurées et simulées, pour les deux demi-immeubles, en fonction de la température extérieure (fig. n° 6). La différence simulation-mesures montre, ici encore, le comportement "basse-énergie" des habitants. Par contre l'inversion février-mars est rectifiée.

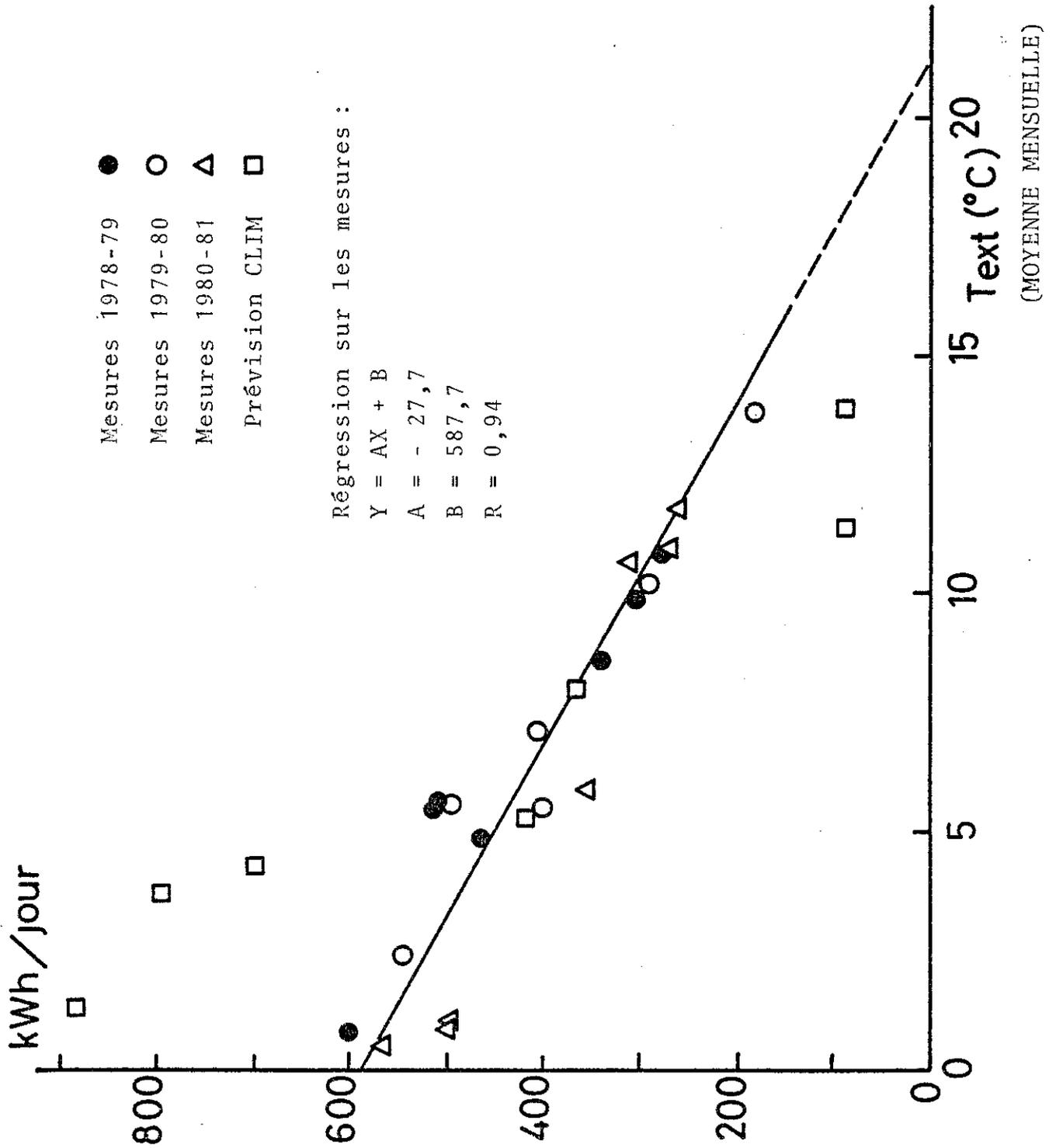
Au-delà des simples bilans de chauffage, CLIM nous a semblé très intéressant notamment :

- pour étudier les réponses à des variations de paramètres thermiques (isolation, mode de chauffage ou de climatisation, etc...) ou climatiques (implantation géographique par exemple) ;
- pour étudier le détail de quelques "apports gratuits", par ensoleillement direct par exemple ;
- pour contrôler l'importance relative des divers postes de déperdition par exemple par renouvellement d'air.

Nous reprendrons quelques-uns de ces points ci-dessous (§ 4.4.).

FIGURE 6

ENERGIE GLOBALE DE CHAUFFAGE (EST + OUEST)



#### 4.2.2. Prévision des besoins en énergie pour le chauffage par des méthodes moins sophistiquées.

. Ces méthodes reposent toutes sur une évaluation manuelle préalable du coefficient G global du bâtiment. Nous évaluons classiquement les déperditions vers l'extérieur par les murs, par les vitrages, par les liaisons, puis les déperditions vers les locaux non chauffés (escalier ou locaux de l'entresol) après une estimation de leur équilibre thermique moyen [11], enfin les déperditions par renouvellement d'air, d'où :  $G = 0,91 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$ . En envisageant les déperditions supplémentaires créées par les deux dalles chauffantes en paroi extérieure (1er niveau et terrasse), nous retenons finalement un G moyen de  $0,93 \text{ W/m}^3 \cdot \text{K}$  [21, § 2.5.3., p. 42] .

. Les besoins en chauffage sont d'abord estimés d'après une évaluation des degrés-jours unifiés classiques  $D_{18}$  (base  $18^\circ\text{C}$ ) à Bourgoin, relatifs à la saison de chauffage (1er octobre - 20 mai). Par interpolation "géographique" entre les courbes iso-degrés-jours du COSTIC [30], puis par triangulation sommaire des données de stations météorologiques proches (Lyon, Grenoble et Saint Etienne de Saint Geoirs), nous estimons  $D_{18}$  à 2 780. Nous calculons alors une "température de non-chauffage" associée à la consigne intérieure  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ , au G et à divers postes "d'apports gratuits" selon un abaque EDF [26] issu de moyennes statistiques :  $\theta_{\text{NC}} = 16,8^\circ\text{C}$ . Pour évaluer alors les degrés-jours de base  $\theta_{\text{NC}}$  à Bourgoin sur la saison de chauffage, nous utilisons l'approximation par une cubique calculée par Ph. Chouard [31] .

$$D_{\theta_{\text{NC}}} = D_{18} \left( \frac{\theta_{\text{NC}} - \theta_o}{18 - \theta_o} \right)^3$$

où  $\theta_o = -11^\circ\text{C}$ , température "de base" légale de Bourgoin [11, titre II, 1975] d'où  $D_{\theta_{\text{NC}}} = 2 450$ . Une méthode approchée [32] d'évaluation directe des degrés-jours de base  $\theta$  utilise seulement  $\theta_o$  (ci-dessus) et la température extérieure moyenne  $\bar{\theta}_{\text{extN}}$  sur la période de N jours retenue :

$$D_{\theta_{\text{NC}}} = N(\bar{\theta}_{\text{extN}} - \theta_o) \left( R - 1 + e^{-\psi(R)} \right) \quad \text{où } R = \frac{\theta_{\text{NC}} - \theta_o}{\bar{\theta}_{\text{extN}} - \theta_o} \quad \text{et } \psi(R) = R + \frac{R^2}{2} + \frac{R^3}{6}$$

TABLEAU 1

Prévision Ci concernée	Ecart d =	$C_i - \bar{C}_E$ Kwh	$C_i - \bar{C}_W$ Kwh	$C_i - \bar{C}_{mes}$ Kwh	$C_i - C_o$ Kwh
$C_1$ : Manuelle (G et D θNc)		29 847 + 67 %	26 748 + 56 %	28 296 + 61 %	28 495 + 62 %
$C_2$ : Simulée rapide (G et Text Bourgoin)		12 875 + 29 %	9 776 + 21 %	11 324 + 25 %	11 523 + 25 %
$C_3$ : Simulée rapide (G et Text Lyon)		10 767 + 24 %	7 668 + 16 %	9 216 + 20 %	9 415 + 21 %
Moyenne des écarts $\bar{d}$		17 830 Kwh	14 731 Kwh	16 279 Kwh	16 478 Kwh
Ecart quadratique de la différence d : sd		10 461 Kwh	10 461 Kwh	10 461 Kwh	10 461 Kwh

Pour la saison de chauffage,  $\bar{\theta}_{\text{extN}} = 7,1^{\circ}\text{C}$  [14] d'où :  $D_{\text{NC}} = 2\ 400$ . Nous retenons finalement  $D_{\text{NC}} = 2\ 425$ . En évaluant alors classiquement l'énergie nécessaire au chauffage, pour un demi-immeuble, par :

$C = 24 \frac{\text{GVh}}{1\ 000} D_{\text{NC}}$  (Kwh) avec un volume habitable  $V_h = 1\ 374\ \text{m}^3$ , on trouve :  $C_1 = 74\ 370$  Kwh.

. Enfin des méthodes rapides implantées sur mini-ordinateur à EDF-Renardières (ci-dessous § 4.3.2.2.) utilisent également le coefficient G manuel global et des degrés-jours évalués à partir des températures extérieures moyennées sur le mois. Nous avons utilisé successivement (à l'époque, avant toute mesure) les températures extérieures moyennes de Bourgoin [14] , d'où :  $C_2 = 57\ 398$  Kwh puis celles de LYON (Météorologie Nationale de Lyon-Bron), d'où :  $C_3 = 55\ 290$  Kwh.

Le climat de Bourgoin, plus froid que celui de Lyon en moyenne, indique bien une énergie nécessaire au chauffage supérieure, mais la comparaison avec la prévision précédente semble confirmer le comportement global "basse-énergie" des occupants de l'immeuble.

. Examinons (tableau 1) les écarts de ces trois prévisions successivement : avec la moyenne mesurée en Est  $\bar{C}_E = 44\ 523$  Kwh (sur les 3 saisons de chauffage retenues), avec la moyenne mesurée en Ouest  $\bar{C}_W = 47\ 622$  Kwh, avec la moyenne mesurée pour un demi-immeuble quelconque  $\bar{C}_{\text{mes}} = 46\ 074$  Kwh et enfin avec la prévision moyenne initiale par CLIM (1/2 immeuble), notée  $C_0 = 45\ 875$  Kwh (§ 4.2.1.1.).

En comparant l'écart moyen à la "dispersion de la mesure" (§ 4.2.1.1.: 3 740 Kwh) ou à la "fluctuation de comportement des habitants" (même §, 3 095 Kwh), on constate pour les écarts à  $C_1$  un facteur 7 à 8, à  $C_2$  3 à 4 et à  $C_3$  2 à 3.

. En conclusion :

\* Les évaluations rapides d'un facteur G global et des degrés-jours donnent une prévision globale de l'énergie nécessaire au chauffage des locaux assez médiocre , mais qui reste relativement utilisable par rapport au peu d'efforts que cette méthode exige.

\* Des méthodes de simulation rapides, employant également  $G$  et le volume habitable  $V_h$ , mais approchant les degrés-jours par les moyennes mensuelles des températures extérieures semblent acceptables pour une prévision globale annuelle. En effet, par ces méthodes, l'écart à la mesure moyenne est de l'ordre de  $2 s_d$ , où  $s_d$  est l'écart quadratique moyen des mesures (§ 4.2.1.).

\* La précision de la prévision par CLIM reste meilleure pour un bilan annuel (écart de l'ordre de  $s_d$ ) et l'évolution mensuelle semble relativement utilisable, même avec un climat-type comme référence.

#### 4.3. LES PERFORMANCES DU SYSTEME SOLAIRE COMPAREES AUX PREVISIONS

Nous comparons ici les prévisions de l'énergie nécessaire à la fois au chauffage des locaux et à la production d'E.C.S. avec les mesures des trois années analysées. Ces prévisions énergétiques globales, incluant le système solaire de l'immeuble , sont issues des programmes CLIM et MASOL (§ 4.3.1.) ou de diverses méthodes manuelles ou informatiques simplifiées (§ 4.3.2.). Le demi-immeuble sert toujours de référence.

##### 4.3.1. Les prévisions de "CLIM + MASOL" face aux mesures.

Nous avons retenu comme situation solaire standard, pour un demi-immeuble, la version suivante : stockage maximal (3 cuves), surface de captation maximale ( $152 \text{ m}^2$ ) et inertie du circuit primaire minimale ( $5 \text{ l/m}^2$  pour l'équivalent-eau des capteurs). En fait, certaines mesures ont été faites dans des configurations différentes, essentiellement pour le volume de stockage.

Un des premiers calculs prévisionnels [21] par MASOL utilisait un fichier-source des besoins (§ 3.2.1.) créé par CLIM avec une consigne intérieure minimale de  $20^\circ\text{C}$  dans tous les modules chauffés. Parmi les autres entrées nécessaires à MASOL, nous avons retenu les valeurs suivantes: pour le capteur (§ 4.1.2.a.) :  $\alpha = 0,80$  et  $\beta = 7,91 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . Pour le stockage (§4.1.2.b) :  $V = 34,32 \text{ m}^3$  avec une déperdition globale de  $443 \text{ W/K}$ , la température de l'ambiance de la "cuve équivalente" (§ 3.2.1.) étant estimée à  $16,5^\circ\text{C}$  du 1er octobre au 20 mai et à  $33^\circ\text{C}$  l'été (§ 4.1.2.). Nous avons estimé le besoin en E.C.S., distribuée à  $60^\circ\text{C}$  et obtenue à partir de l'eau froide disponible à  $10^\circ\text{C}$  en moyenne, à  $50 \text{ m}^3$  par logement et par an [25c, 25d]. L'énergie nécessaire pour l'E.C.S. d'un demi-immeuble est alors  $56,4 \text{ Kwh/jour}$ , en adoptant un rendement de distribution de  $0,85$  en moyenne.

Nous citons aussi un calcul prévisionnel ultérieur (toujours sur le climat-type de Lyon) utilisant un passage de CLIM avec les consignes intérieures minimales de  $19^\circ\text{C}$  en Est et  $19,4^\circ\text{C}$  en Ouest. Nous avons

TABLEAU 2 : ENERGIES (KWH)

Nature du bilan	Energies utilisées		Chauffage des locaux		Eau chaude sanitaire		Bilan total		Total Energie
	Partie solaire	Appoint électrique	Partie solaire	Appoint électrique	Partie solaire	Appoint électrique	Partie solaire	Appoint électrique	
Simulation I.....	20 447	34 530	10 227	10 348	30 674	44 878	75 552		
Simulation II.....	21 998	29 689	7 761	6 240	29 759	35 929	65 688		
Mesure EST 78-79.....	16 310	25 620	4 633	15 730	20 943	41 350	62 293		
Mesure OUEST 78-79.....	19 850	30 530	4 489	19 940	24 339	50 470	74 809		
Mesure EST 79-80.....	22 230	21 420	5 950	13 120	28 180	34 540	62 720		
Mesure OUEST 79-80.....	23 360	23 580	4 720	15 970	28 080	39 550	67 630		
Mesure EST 80-81.....	18 370	25 890	5 700	13 480	24 070	39 370	63 440		
Mesure OUEST 80-81.....	20 820	21 920	4 461	14 420	25 281	36 340	61 621		
Mesure moyenne EST (1/2 imm).	18 970	24 310	5 428	14 110	24 398	38 420	62 818		
Mesure moyenne OUEST.....	21 343	25 343	4 557	16 777	25 900	42 120	68 020		
Moyenne mesurée	20 157	24 827	4 992	15 443	25 149	40 270	65 419		
Demi-immuble.....	+(2 572)	(3 344)	(657)	(2 485)	(2 732)	(5 564)	(5 069)		

+ Ecart quadratique moyen des 6 mesures.

modifié les paramètres suivants : pour le capteur :  $\alpha = 0,81$  et  $\beta = 7,10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  (rectification des pertes par convection en adoptant une vitesse moyenne de vent plus réaliste). Pour le stockage : en saison de chauffage,  $V = 32,37 \text{ m}^3$ , dans une ambiance à  $20,3^\circ\text{C}$ , avec une déperdition de  $225 \text{ W/K}$  et en été,  $V = 32,26 \text{ m}^3$ , ambiance à  $32^\circ\text{C}$  et déperdition de  $168 \text{ W/K}$ . Enfin l'E.C.S. est ici sous-estimée à  $30,78 \text{ Kwh/jour}$  l'hiver et  $37,35 \text{ Kwh/jour}$  l'été.

La modélisation finalement retenue pour tester les programmes CLIM et MASOL en climat réel (partie V), recalée sur quelques mesures, a été intermédiaire entre ces deux schémas.

#### 4.3.1.1. Les bilans annuels :

La comparaison des bilans globaux doit être faite avec quelques réserves puisque le climat de référence n'est pas le même (entre les mesures et les simulations) ; de toutes façons, le choix de périodes assez longues s'impose. Nous prenons (tableau 2) les bilans annuels "bruts" (sans compensation des pertes ou absences de mesures) relatifs à un demi-immeuble, toutes ces énergies étant exprimées en Kwh.

Notons, très globalement, que l'énergie totale prévue dans la simulation I dépasse la moyenne mesurée de  $15,5 \%$ , alors que l'écart n'est plus que de  $0,4 \%$  dans la simulation II. Mais la mauvaise simulation de l'E.C.S. de l'époque ne semble pas autoriser autre chose qu'une conclusion à une coïncidence fortuite.

Outre les bilans globaux, nous comparons aussi aux mesures la fraction solaire de l'énergie utilisée annuellement pour le chauffage seulement, ou pour l'eau chaude sanitaire seule, ou globalement pour le demi-immeuble (somme des précédents) : tableau 3.

En examinant ces résultats, on constate d'abord que les écarts quadratiques moyens de ces diverses différences sont très voisins (de l'ordre de  $5 \%$  en moyenne) et assez faibles. On peut les considérer plus ou moins comme une validation des méthodes de simulation et de mesure puisqu'ils jugent la dispersion moyenne quelle que soit la valeur

TABEAU 3

Nature du bilan	Energie solaire Pourcentages			Pourcentage d'énergie solaire utilisée pour le chauffage			Pourcentage d'énergie solaire utilisée pour l'E.C.S.			Pourcentage solaire dans l'énergie utilisée globalement							
	Mesuré	Sim. I	Ecart à la mesure : II	Mesuré	Sim. I	Ecart à la mesure	Mesuré	Sim. I	Ecart à la mesure	Mesuré	Sim. I	Ecart à la mesure					
EST 78-79.....	38,9	37,2	1,7	42,6	3,7	- 3,7	22,8	49,7	- 27,0	55,4	32,7	- 32,7	33,6	40,6	- 7,0	45,3	- 11,7
OUEST 78-79.....	39,4	"	2,2	"	3,2	- 3,2	18,4	"	- 31,3	"	- 37,1	- 37,1	32,5	"	- 8,1	"	- 12,8
EST 79-80.....	50,9	"	13,7	"	8,4	8,4	31,2	"	- 18,5	"	- 24,2	- 24,2	44,9	"	4,3	"	- 0,4
OUEST 79-80.....	49,8	"	12,6	"	7,2	7,2	22,8	"	- 26,9	"	- 32,6	- 32,6	41,5	"	0,9	"	- 3,8
EST 80-81.....	41,5	"	4,3	"	1,1	- 1,1	29,7	"	- 20,0	"	- 25,7	- 25,7	37,9	"	- 2,7	"	- 7,4
OUEST 80-81.....	48,7	"	11,5	"	6,2	6,2	23,6	"	- 26,1	"	- 31,8	- 31,8	41,0	"	0,4	"	- 4,3
Différence moyenne d en %...			7,67		2,30	2,30			- 24,97		- 30,68	- 30,68			- 2,03		- 6,73
Ecart quadratique moyen associé sd			5,52		5,55	5,55			4,81		4,84	4,84			4,83		4,83
Student $t = \frac{d\sqrt{6}}{sd}$ .....			3,40		1,01	1,01			- 12,71		- 15,54	- 15,54			- 1,03		- 3,42

de l'écart moyen enregistré.

. Pour l'E.C.S. : nous avons majoré d'un facteur  $\frac{1}{0,85}$  les besoins moyens en énergie pour l'E.C.S. (correspondant à une consommation de  $50 \text{ m}^3$  par logement et par an) pour traduire les pertes de distribution et de stockage. On constate, en particulier pour la simulation I, un bon accord entre les besoins prévus et mesurés, mais la prévision de la part solaire est mauvaise. Aussi nous avons revu ce module dans le programme MASOL avant le passage sur climat réel en améliorant la traduction des régimes transitoires et en décrivant mieux, au moins en moyenne, le réchauffeur solaire (§ 5.3.1.).

. Le chauffage des locaux, par contre, semble correctement traduit, surtout pour la 2ème simulation, globalement, où les consignes de température minimale de CLIM sont plus basses et ceci respecte probablement mieux le comportement basse-énergie des occupants déjà signalé (§ 4.2.). En particulier, l'énergie solaire utilisée pour le chauffage est prévue à quelques pourcents près (1,4 % pour la 1ère simulation et 9,1 % pour la 2ème).

#### 4.3.1.2. Etude de l'E.C.S. :

Pour expliquer la mauvaise simulation de l'E.C.S., nous proposons les hypothèses suivantes :

- les montées en température du stockage sont trop lentes par rapport à la fréquence des extractions, ou trop faibles par rapport au niveau de température exigé ;
- l'installation, avec capteurs verticaux en Sud, se prête mal l'été à une exploitation pour produire l'ECS à  $60^\circ\text{C}$  ; l'ensemble de l'installation est aussi, l'été, surdimensionné ;
- pendant l'été, l'inoccupation des locaux est souvent importante et modifie nettement le profil de demande ;

- même de juin à août, le maximum de température enregistré pour le stockage est de l'ordre de 50°C, malgré un excès d'énergie indéniable, et ceci nécessite donc un appoint électrique qui reste élevé même en l'absence de consommation.

On sait d'ailleurs que, dans les systèmes de production d'E.C.S. collective, les pertes de distribution sont importantes. A Bourgoin, pendant une période d'absence totale des occupants (en Ouest, du 11 août 1981 à 11 h 30 au 17 août à 17 h 30), nous avons relevé une consommation en ECS nulle et une énergie électrique d'appoint ECS de 66 Kwh. Cette mesure traduit donc une consommation minimale de 10,6 Kwh par jour et par demi-immeuble pour maintenir le ballon électrique ECS à 55°C (consigne en 1981) et pour compenser les pertes du bouclage. Cette déperdition est un minimum car, à cette période, l'écart de température entre l'eau chaude et l'ambiante est le plus faible. Or, pour la 1ère simulation, le facteur  $\frac{1}{0,85}$  donne une perte moyenne de 8,4 Kwh par jour et par demi-immeuble ce qui correspond donc à une sous-estimation d'au moins 25 %. La consommation moyenne mesurée pour les trois années analysées a été de 47,6 m<sup>3</sup> d'E.C.S. par logement et par an, soit inférieure de 5 % environ aux besoins prévus. Ceci explique donc le bon accord des besoins globaux en ECS mesurés et déclarés. D'ailleurs, en examinant le détail des consommations mesurées, on constate une grande dispersion des consommations d'E.C.S. selon les foyers. Aussi nous avons pris comme référence de comparaison avec les mesures la moyenne des demi-immeubles pour les trois années de mesure analysées. Il semble pourtant qu'un échantillon de 12 logements soit suffisant pour approcher des moyennes usuelles des consommations annuelles en E.C.S.

En ce qui concerne les bilans mensuels, on peut constater (figures 7 et 8) que la simulation de la part solaire dans l'énergie ECS est mauvaise, aussi bien l'été qu'en saison de chauffage. Pourtant, durant l'été, nous notons des flux solaires mesurés et simulés très voisins : ceci justifie les hypothèses d'inadéquation du système pendant l'été. Par contre, en saison de chauffage, les flux solaires mesurés sont nettement inférieurs aux flux simulés, et ceci explique donc mieux ici la faible part solaire mesurée pour l'E.C.S.

FIGURE 7

Pourcentage solaire de l'énergie  
utilisée pour l'eau chaude sani-  
taire :

○ — Simulé

△ — Moyenne mesurée

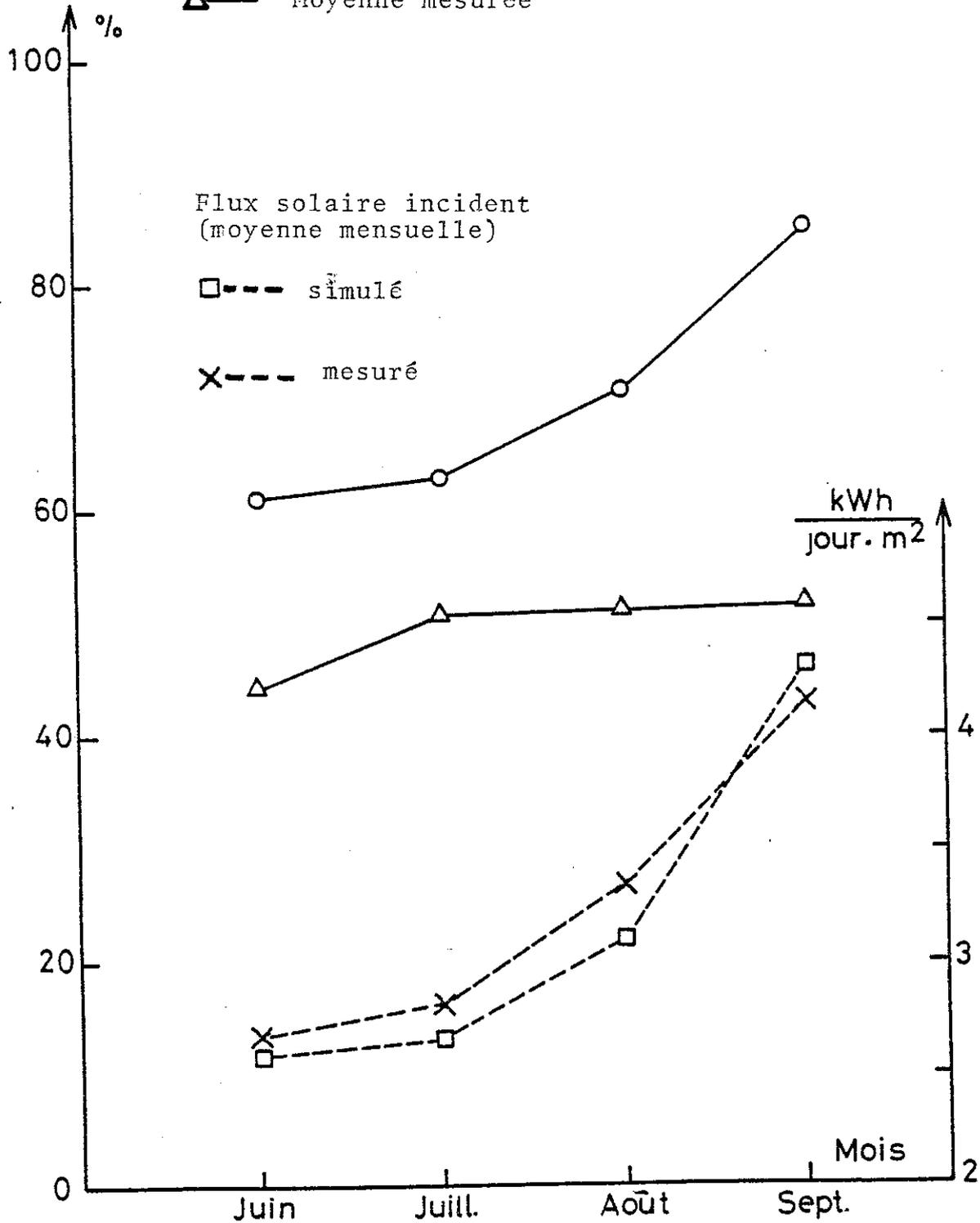
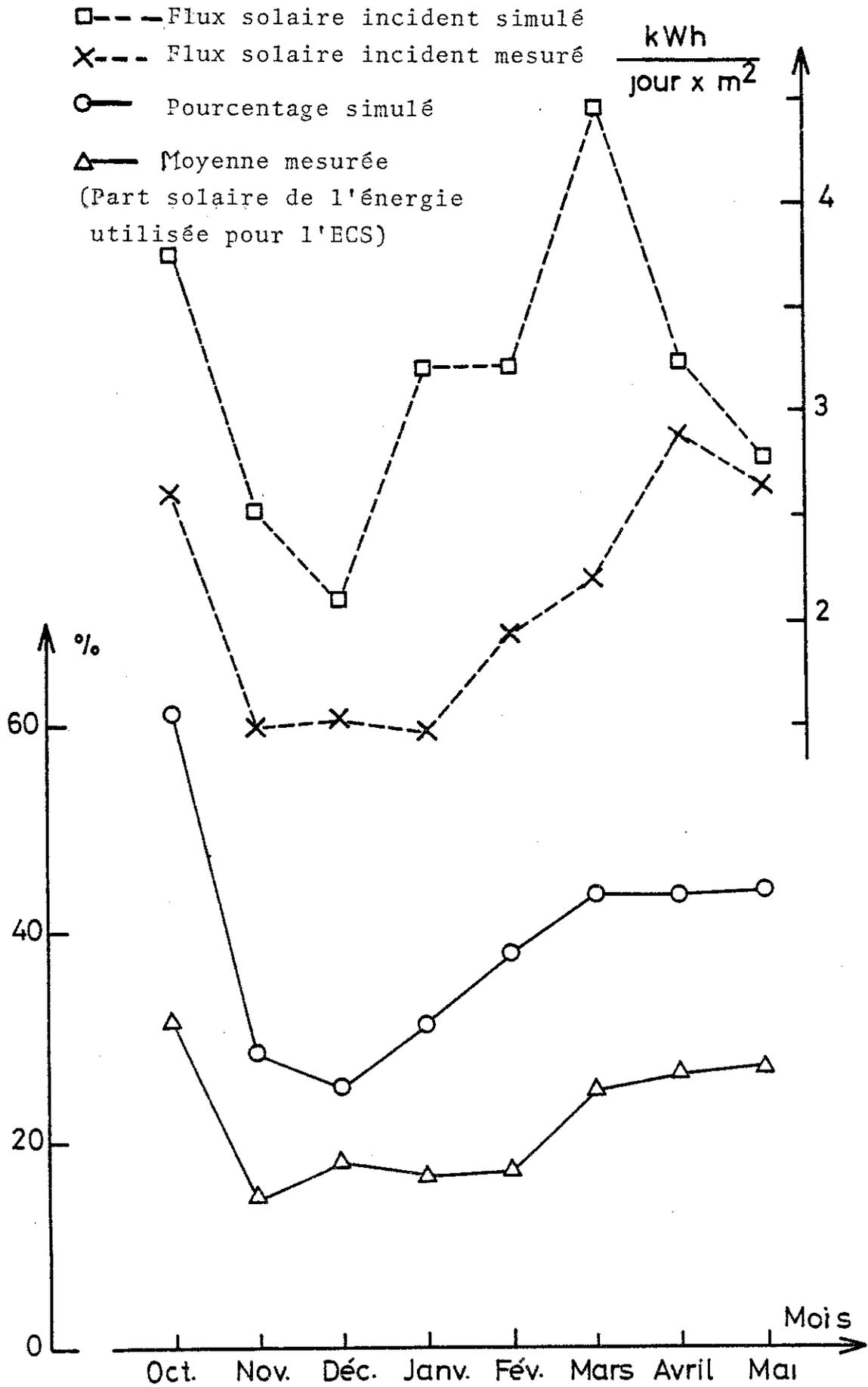


FIGURE 8



#### 4.3.1.3. Etude du chauffage des locaux :

. Les bilans globaux sur la saison de chauffage (tableau 2, p.50, § 4.3.1.1.) montrent que, à température extérieure voisine (moyenne annuelle simulée et mesurée), l'énergie solaire utilisée pour le chauffage est assez bien prévue : 20 447 Kwh (1ère simulation) ou 21 998 Kwh (2ème simulation) contre 20 157 Kwh mesurés (moyenne pour 3 saisons, soit 6 demi-immeubles). La différence des énergies solaires utilisées pour le chauffage entre la mesure moyenne et les simulations reste du même ordre de grandeur que l'écart quadratique moyen des 6 mesures (2 572 Kwh). Par contre, les appoints électriques sont, globalement, prévus avec un excès de 40 % environ, ce qui traduit le comportement basse consommation en énergie des occupants (§ 4.2 et § 4.3.1.1.).

. Evolutions mensuelles : à cause de la sensibilité au climat des bilans mensuels d'énergie utilisée pour le chauffage des locaux, la comparaison des valeurs brutes simulée et mesurée (figure 9) n'apporte que peu d'information. Nous avons donc essayé d'analyser ces bilans à climat égal, ou du moins en éliminant le plus possible l'influence des différences de référence météorologique. Ainsi, nous cherchons une corrélation entre les écarts (simulation-mesures) du flux solaire incident moyen et les écarts, en valeurs relative ou absolue, de l'énergie solaire employée pour le chauffage. Nous avons donc calculé (tableau 4):

$$x = \frac{\text{flux incident mesuré (Kwh/jour.m}^2\text{)}}{\text{flux incident simulé (Kwh/jour.m}^2\text{)}} ,$$

ainsi que :

$$y = \frac{\text{part solaire mesurée (en \%)}}{\text{part solaire simulée (en \% )}}$$

et

$$z = \frac{\text{énergie solaire mesurée (Kwh/mois)}}{\text{énergie solaire simulée (Kwh/mois)}}$$

tous en %.

53  
FIGURE 9

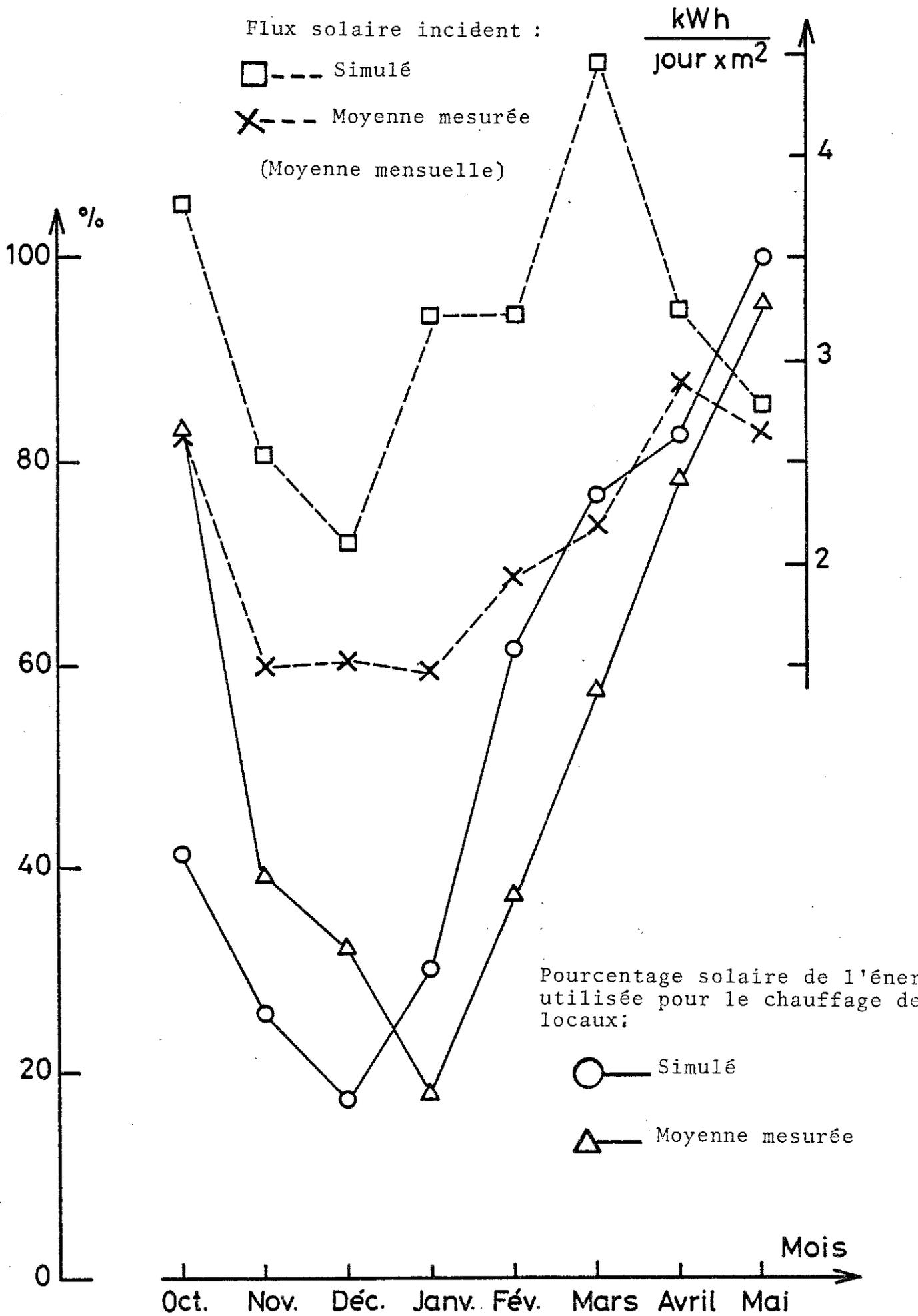


TABLEAU 4

Variable		Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Simulation I t moyenne mesurée	x		69,4	58,9	72,9	45,8	59,9	49,1	38,9	95,0
	y		200,7	151,3	185,1	59,7	60,9	74,9	94,7	95,6
	z		508,6	84,5	107,8	35,8	78,0	58,3	283,4	2 404,6
Simulation II t moyenne mesurée	x		66,9	58,0	71,8	45,5	58,7	45,9	77,8	77,9
	y		144,6	128	144,6	54,8	54,1	73,0	78,9	95,6
	z		347,2	66,2	78,3	30,2	63,3	49,5	203,6	2 040,3

TABLEAU 5

Variable		Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
I en %			169	89,6	96,9	100,6	142	69,6	114,8	77,8
II en %			72,1	45,9	47,6	70,6	209,3	143,2	374,2	∞
III en %			94,5	45,2	47,3	67,3	238,9	135,9	6 211,3	∞

← Retenus →      ← A exclure →      ← A exclure →

En excluant les mois de "demi-saison", octobre, avril et mai (§ 4.2.1.2.), on trouve une régression linéaire de  $y$  en  $x$  assez correcte:  $y = a + bx$ , de coefficient de corrélation linéaire  $R$  :

Simulation I,  $a = - 144,2 \%$  ,  $b = 4,37$  ,  $R = 0,80$

Simulation II,  $a = - 72,7 \%$  ,  $b = 2,92$  ,  $R = 0,75$ .

La régression linéaire, sans être parfaite, est assez bonne dans le cas I. On constate la présence d'un seuil,  $x$  minimum de l'ordre de 33 %, en dessous duquel le pourcentage d'énergie solaire mesuré est nul. Si l'on procède de même, toujours en excluant les mois d'octobre, d'avril et de mai pour  $z = a + bx$ , on trouve pour la simulation I :  $a = -69,4 \%$ ,  $b = 2,48$ ,  $R = 0,97$  et pour la simulation II :  $a = - 28,8 \%$ ,  $b = 1,54$ ,  $R = 0,91$ . On a donc ici une bonne corrélation linéaire entre les variations relatives, simulation-mesures, des apports solaires utilisés pour le chauffage et celles des flux. Le "seuil" en  $x$  est de même ordre que pour  $y$  : 28 % (cas I).

. L'existence d'un seuil à partir duquel le flux solaire commence à être vraiment utilisé nous semble être un point particulièrement intéressant. Cette notion de seuil, qui apparaît ici pour l'ensemble du système solaire, est maintenant classique pour l'énergie extraite des capteurs [33] , mais MASOL ne prend pas ceci en compte. Ceci explique partiellement les différences entre les performances prévues et mesurées, surtout pour les mois de faible ensoleillement, janvier, février et mars.

Nous avons analysé aussi l'influence de la température extérieure (moyenne mensuelle), soit par la différence  $x_1$  des températures extérieures moyennes (mesurée-simulée), soit par le rapport relatif des différences à la température de "non-chauffage" (16,8 °C, cf. § 4.2.2.),

$$x_2 = \frac{\text{Text.moy. mesurée} - 16,8}{\text{Text.moy. simulée} - 16,8} \quad (\text{en } \%).$$

Nous trouvons, aussi bien avec la variable  $x_1$  qu'avec  $x_2$ , et en tentant

l'ajustement par plusieurs profils de courbes, que la température extérieure moyenne ne semble guère influencer ni le pourcentage d'énergie solaire utilisée pour le chauffage, ni l'énergie solaire utile au chauffage. Par contre, à condition d'exclure les mois d'avril et mai, ainsi que février et mars à cause de l'inversion anormale du climat simulé, on trouve une corrélation linéaire acceptable entre la variable  $x_2$  et les appoints électriques de chauffage (moyenne des 6 demi-immeubles), soit :

$$A_i = \frac{\text{Appoints électriques mesurés (Kwh/mois)}}{\text{Appoints électriques simulés (Kwh/mois)}},$$

$i = I$  ou  $II$  selon la simulation retenue (tableau 5).

Dans le cas II, en cherchant  $A = a + bx_2$ , on trouve :

$$a = - 2,67 \% \quad , \quad b = 0,58 \quad \text{et} \quad R = 0,94.$$

L'échantillon est évidemment restreint à 4 mois d'hiver (mais à des moyennes de 6 mesures). Cette corrélation n'indique donc qu'une "tendance". Ici, le seuil minimum en  $x_2$  est 4,6 % soit sensiblement 0 : ceci semblerait donc correspondre au "non-appoint" pour une température extérieure moyenne mesurée de l'ordre de 16,8°C pour ces 4 mois, ce qui justifie donc, au moins partiellement, le choix de cette température de non-chauffage.

#### 4.3.2. Méthodes rapides EDF de prévision énergétique globale comparées aux mesures.

##### 4.3.2.1. Méthode manuelle utilisant des abaques solaires [6] :

Ce calcul simplifié des systèmes solaires actifs à eau utilise des moyennes mensuelles des différents paramètres solaires ou météorologiques. Tous les calculs sont ramenés à 1 m<sup>2</sup> de capteur. On évalue d'abord l'énergie nécessaire au chauffage des locaux (avec la température extérieure moyenne mensuelle, le coefficient G et une température de "non-

TABLEAU 6

$\theta_{ext}$ moyenne du mois °C	Mois	Energies journalières par m <sup>2</sup> de capteur			Températures moyennes		Energies mensuelles moyennes globales			Pourcentage de l'énergie solaire en %
		Besoins E <sub>c</sub> en Kwh/m <sup>2</sup> .jour	Energie solaire utilisée en Kwh/m <sup>2</sup> .jour	Appoints électriques en Kwh/m <sup>2</sup> .jour	Distri- bution T <sub>IM</sub> °C	Stockage T <sub>SM</sub> °C	Besoins mensuels ΣE <sub>c</sub> Kwh	Energie solaire utilisée mensuelle(Kwh)	Apports électriques (mensuels) (Kwh)	
2,3	Janvier	3,4066	0,4850	2,9216	20,6	20,6	32 209,6	4 585,7	27 623,9	14
4,1	Février	3,0236	0,8100	2,2196	21,4	21,4	25 873,0	6 917,4	18 955,6	27
6,8	Mars	2,4641	1,020	1,4441	21,9	21,9	23 298,3	9 644,1	13 654,2	41
10,6	Avril	1,6682	0,950	0,7182	21,7	21,7	15 264,5	8 692,5	6 572,0	57
14,8	Mai	0,7836	0,5172	0,2714	21,3	23,3	7 456,1	4 890,4	2 565,7	66
18,2	Juin	0,3697	0,1738	0,1959	-	33,5	3 382,8	1 589,9	1 792,9	47
20,5	Juillet	0,3697	0,2174	0,1523	-	39,4	3 495,6	2 055,4	1 440,2	59
19,8	Août	0,3697	0,2913	0,0784	-	49,4	3 495,6	2 754,5	741,1	79
16,6	Septembre	0,4116 +	0,3697	0,0419 +	-	61,5	3 766,1	3 382,8	383,3 +	90
11,7	Octobre	1,4379	1,300	0,1379	22,5	22,5	13 595,0	12 291,5	1 303,5	90
6,7	Novembre	2,4851	0,630	1,8551	20,9	20,9	22 738,4	5 764,5	16 973,9	25
2,3	Décembre	3,4066	0,395	3,0116	20,4	20,4	32 209,6	3 734,7	28 474,8	12
11,2	Total ou moyenne	-	-	-	-	29,7	186 784,4 <sup>++</sup>	66 303,4	120 481,1	35,5 % brut
7,1	Moyenne sur sai- son de chauffage (1er octobre jus- qu'au 20 mai)	-	-	-	21,3	21,5	-	-	Eté : Hiver :	69 % brut 33 % brut

+ Léger besoin en chauffage, couvert par convecteurs (= appoint électrique).

++ Dont : 41 157,5 Kwh pour l'E.C.S. seule et 145 626,9 pour le chauffage.

chauffage" - cf. § 4.2.2.), et l'énergie utilisée pour l'E.C.S. d'où, chaque mois, l'énergie globale nécessaire à l'immeuble. On calcule alors la caractéristique globale de distribution de l'énergie (chauffage et ECS) en fonction de la température moyenne de l'eau chaude du stockage et de la distribution, paramètre retenu comme inconnue. On emploie alors des abaques donnant, selon la "zone solaire" (du COSTIC), l'orientation des capteurs, le nombre de vitrages, etc..., l'énergie solaire moyenne récupérable par mois. Par intersection de ces courbes, on obtient alors chaque mois des niveaux moyens de fonctionnement en température et énergie permettant des prévisions sommaires. Nous reportons (tableau 6) le 1er bilan manuel prévisionnel [21], utilisant cette méthode avec les températures extérieures mensuelles moyennes de Bourgoin M.N. [14] et la configuration solaire standard déjà citée (§ 4.3.1.).

Dans le tableau 7, nous citons, pour comparaison avec la température extérieure moyenne utilisée (statistique M.N.), les mesures et leur moyenne, sur la saison de chauffage, des températures extérieures en °C.

Vu la fluctuation importante de la température extérieure moyenne mensuelle, nous nous référons à la moyenne des 3 mesures. Nous ne pouvons pas ici distinguer les énergies solaires utilisées pour le chauffage de celles utilisées pour l'E.C.S. (du moins l'hiver).

. Les besoins globaux annuels pris en compte pour utiliser cette méthode sont très élevés (93 392 Kwh par demi-immeuble). Ceci provient du fait que la méthode utilisée pour prévoir les besoins en chauffage ( $C_1$  du § 4.2.2.) conduit à des valeurs trop grandes. Toutefois, l'énergie solaire globale prévue (33 152 Kwh) reste proche de la moyenne mesurée (27 963 Kwh) qui présente un écart quadratique moyen  $s_d = 2 655$  Kwh ; la différence, 5 200 Kwh est de l'ordre de  $2 s_d$  et le dépassement de +18,6 %. Pourtant, l'abaque solaire utilisé était choisi par zone solaire et correspondait en fait à des données de Limoges, zone isohèle-énergie de Bourgoin, selon les zones solaires du COSTIC. Les appoints électriques, obtenus par différence par rapport aux besoins, sont évidemment surestimés pour le chauffage.

TABLEAU 7

Températures (degrés C)

Nature \ Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Moyenne sur la saison de chauffage
mesure 78-79	10,9	5,5	5,5	0,8	4,9	8,6	9,9	14,9	7,31
mesure 79-80	13,8	5,5	5,6	2,4	7,1	7,1	10,2	13,5	7,91
mesure 80-81	11,0	5,9	1,0	0,5	0,9	10,7	11,8	15,6	6,84
Moyenne mesurée .....	11,9	5,63	4,03	1,23	4,30	8,80	10,63	14,67	7,36
Text-météo Bourgoin....	11,7	6,7	2,3	2,3	4,1	6,8	10,6	14,8	7,09

+ Du 1-10 au 20-05.

TABLEAU 8

Energies (KWH)

Variable analysée \ Mois	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Total	
Apport solaire global	Prévu	6 146	2 833	1 858	2 293	3 459	4 322	4 347	2 445	795	1 028	1 378	1 692	33 150
	mesuré	3 677	2 785	2 892	1 979	3 015	3 671	3 781	3 197	745	721	687	813	27 960
Rapport prévu mesuré	1,67	1,04	0,65	1,16	1,15	1,31	1,15	0,76	1,07	1,43	2,01	2,08	1,19	
$\Delta$ Text en °C (prévu-mesuré)	-0,2	+1,1	-1,7	+1,1	-0,2	-4,0	0	+0,1	+0,2	+0,9	0	0	—	

. Evolutions mensuelles des prévisions des apports solaires  
(énergies en Kwh); tableau 8.

La prévision de l'énergie solaire utilisée dépasse donc la mesure de 19 % pour l'année mais le suivi mensuel de détail est très irrégulier, malgré des températures extérieures moyennes proches. Ceci provient probablement, outre le fait que les besoins prévus sont trop élevés, des différences d'ensoleillement. Le calcul des abaques solaires suppose l'ensoleillement uniforme sur la journée et sur le mois : cette répartition ne correspond sûrement pas, au niveau des évolutions du stockage ou du rendement des capteurs, à une succession d'heures et de jours de l'ensoleillement réel.

Cette méthode manuelle, séduisante par sa simplicité et par la rapidité de sa mise en oeuvre, a peu d'intérêt pour les prévisions mensuelles. Elle reste utilisable pour les bilans globaux des apports solaires pour des périodes assez longues (au moins quatre mois).

#### 4.3.2.2. Méthode informatisée sommaire de prévision du bilan d'énergie global :

Ce programme est une version informatisée de la méthode précédente, implantée sur APPLE II par Ph. CHOUARD [Renardières, 1979] . Nous l'avons utilisé avec deux météorologies de référence.

Le tableau 9 ("Bourgoin/Météo réelle") correspond, pour les températures extérieures moyennes mensuelles aux moyennes de Bourgoin M.N. [14] , d'ailleurs aussi utilisées pour la méthode manuelle précédente. Pour l'ensoleillement, nous avons compilé des "durées moyennes d'insolation (heures)" M.N. pour Lyon et Grenoble [34] et des "valeurs moyennes journalières d'insolation en 1/10 d'heure", toujours pour Lyon et Grenoble, correspondant à des statistiques M.N. pour des périodes différentes [35] . Nous avons alors interpolé ces données géographiquement, puis adopté la moyenne, d'où pour Bourgoin un total annuel de 2 041 heures d'insolation moyenne.

## TABLEAU 9

PROJET BOURGOIN/METEO REELLE  
PROGRAMME BILAN VERSION 6

RECAPITULATION DES ENTREES

LATITUDE : 45,61 DEG.  
 INSOLAT. (H/MOIS) : 69,9 100,2 164,5 195  
                                   237,5 256,3 291,2 255,9  
                                   204,3 141,3 70,3 54,7  
 TEMP. (DEG.) : 2,3 4,1 6,8 10,6  
                                   14,8 18,2 20,5 19,8  
                                   16,6 11,7 6,7 2,3  
 COEFF. TROUBLE : 3  
 INCL. CAPT. : 90 DEG/HORIZ  
 ORIENT. CAPT. : 0 DEG/SUD  
 C. OPTIQUE CAPT. : 0,81  
 C. DEPERD. CAPT. : 7,1 W/M2.K  
 SURF. CAPT. : 304,8 M2  
 COEFF. G : 0,93 W/M3.K  
 VOLUME HABIT. : 2 862 M3  
 DISTRIB. : 5 231,8 W/K  
 TEMP. INT. : 20 DEG.  
 CONSOM. ECS : 132,28 KWH/JOUR  
 TEMP. EAU FROIDE : 10 DEG.  
 TEMPERATURE ECS : 60 DEG.

RESULTATS

	Besoins	Soleil	Appoint	%
Janvier.....	28 931	4 033	24 897	13,9
Février.....	22 911	6 583	16 328	28,7
Mars.....	20 020	10 046	9 973	50,1
Avril.....	12 091	8 735	3 356	72,2
Mai.....	4 177	1 926	2 251	46,1
Juin.....	3 968	1 588	2 379	40
Juillet.....	4 100	2 113	1 986	51,5
Août.....	4 100	2 903	1 196	70,8
Septembre.....	3 968	3 174	793	80
Octobre.....	10 316	6 441	3 875	62,4
Novembre.....	19 565	4 774	14 791	24,4
Décembre.....	28 931	3 010	25 920	10,4
TOTAUX.....	163 078	55 326	107 745	33,91

Chiffres en KWH/mois ou en %.

Le tableau 10 ("Bourgoin/Météo Lyon") correspond au climat-type Lyon M.N., les ensoleillements aux durées moyennes 1951-70 [34]. Le total annuel moyen est 2 036 heures d'insolation, voisin de celui de Bourgoin, mais les écarts mensuels sont plus importants. Les températures extérieures de Lyon se trouvent au-dessus de celles de Bourgoin, en moyenne : sur la saison de chauffage,  $\bar{T}_{\text{ext}} = 7,38^{\circ}\text{C}$  à Lyon et  $\bar{T}_{\text{ext}} = 7,09^{\circ}\text{C}$  à Bourgoin, mais

$$\frac{16,8 - \bar{T}_{\text{ext}} \text{ Bourgoin}}{16,8 - \bar{T}_{\text{ext}} \text{ Lyon}} = 1,031$$

En été :  $\bar{T}_{\text{ext}} \text{ Lyon} = 18,81$  et  $\bar{T}_{\text{ext}} \text{ Bourgoin} = 18,47$ .

. Bilans annuels :

Nous comparons aux mesures les deux prévisions précédentes :

- énergie solaire globale (annuelle, en Kwh, par demi-immeuble) :

Moyenne mesurée = 27 963 Kwh ;

1ère prévision/Météo Bourgoin = 27 663 Kwh (- 1,1 %)

2ème prévision/Météo Lyon = 27 039 Kwh (- 3,4 %).

- appoints électriques (annuels, en Kwh par demi-immeuble) :

Moyenne mesurée = 40 270 Kwh ;

1ère prévision/Météo Bourgoin = 53 873 Kwh (+ 34 %)

2ème prévision/Météo Lyon = 52 391 Kwh (+ 30 %).

On retrouve le comportement basse-énergie des habitants pour les appoints électriques (§ 4.2. & 4.3.).

. Détail E.C.S. (été seulement) pour les appoints électriques :

Moyenne mesurée = 3 042 Kwh ;

1ère prévision = 3 177 Kwh

2ème prévision = 3 147 Kwh, soit +3 à 4 %.

On a donc ici une bonne prévision.

TABLEAU 10

PROJET BOURGOIN/METEO-LYON  
PROGRAMME BILAN VERSION 6

RECAPTITULATION DES ENTREES

LATITUDE	: 45,72 DEG.
INSOLAT. (H/MOIS)	: 60 96 165 198 215 260 293 254 207 139 66 47
TEMP. (DEG.)	: 2,2 3,6 7,9 11 14,8 18,5 20,7 20,2 17,2 11,8 6,9 3,2
COEFF. TROUBLE	: 3
INCL. CAPT.	: 90 DEG/HORIZ
ORIENT. CAPT.	: 0 DEG/SUD
C. OPTIQUE CAPT.	: 0,81
C. DEPERD. CAPT.	: 7,1 W/M2.K
SURF. CAPT.	: 304,8 M2
COEFF. G	: 0,93 W/M3.K
VOLUME HABIT.	: 2862 M3
DISTRIB.	: 5231,8 W/K
TEMP. INT.	: 20 DEG.
CONSUM. ECS	: 132,28 KWH/JOUR
TEMP. EAU FROIDE	: 10 DEG.
TEMPERATURE ECS.	: 60 DEG.

RESULTATS

	Besoins	Soleil	Appoint	%
Janvier.....	29 129	3 458	25 671	11,8
Février.....	23 806	6 245	17 560	26,2
Mars.....	17 841	10 318	7 523	57,8
Avril.....	11 325	8 990	2 334	79,3
Mai.....	4 177	1 794	2 383	42,9
Juin.....	3 968	1 624	2 344	40,9
Juillet.....	4 100	2 133	1 967	52
Août.....	4 100	2 909	1 190	70,9
Septembre.....	3 968	3 174	793	80
Octobre.....	10 118	6 284	3 834	62,1
Novembre.....	19 182	4 502	14 680	23,4
Décembre.....	27 149	2 646	24 502	9,7
TOTAUX.....	158 863	54 077	104 781	34

Chiffres en KWH/mois ou en %

Bilans mensuels
-----------------

 :

Ce programme simplifié permet (tableau 11), comme les programmes élaborés, de constater la sous-normalité des appoints électriques de novembre à mars, et la surconsommation d'énergie solaire gratuite pour le chauffage en octobre, novembre et mai. La prévision d'ensemble (annuelle) est plutôt meilleure que celle du calcul manuel précédent et permet une estimation correcte des bilans globaux.

L'étude de l'évolution mensuelle montre que l'E.C.S. solaire est encore assez mal simulée l'été, ceci confirmant probablement nos hypothèses (§ 4.3.1.2.). Alors que les énergies globales annuelles sont assez bien prévues (apports solaires et appoints électriques), les évolutions mensuelles restent fluctuantes, et ici, on ne peut plus séparer le chauffage et l'ECS dans la simulation en saison de chauffage.

Ce programme semble donc intéressant pour un avant-projet rapide, à condition de prendre une fourchette assez large pour l'évolution mensuelle. Le bilan prévisionnel global sera correct si l'on dispose d'un climat local moyen : températures extérieures locales et données solaires courantes de villes assez proches (50 km) ; c'est ce que nous avons observé en passant de la zone lointaine de Limoges (§ 4.3.2.1.) à des données plus proches de Bourgoin (§ 4.3.2.2.).

TABLEAU 11

Variable	Mois	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.
Apport solaire en Kwh	Prévu météo Bourgoin	3 221	2 387	1 505	2 017	3 292	5 023	4 368	963	794	1 057	1 452	1 587
	Prévu météo Lyon	3 142	2 251	1 323	1 729	3 123	5 159	4 495	897	812	1 067	1 455	1 587
	Moyenne mesurée	3 677	2 785	2 892	1 979	3 015	3 671	3 781	3 197	745	721	687	813
Rapport Prévision (météo Bourgoin) sur mesure	0,88	0,86	0,52	1,02	1,09	1,37	1,16	0,30		1,07	1,47	2,11	1,95
Appoints électriques en Kwh	Prévus météo Bourgoin	1 938	7 396	12 960	12 449	8 164	4 987	1 678	1 126	1 190	993	598	397
	Moyenne mesurée	1 854	5 531	6 962	9 140	6 165	3 910	2 152	1 477	933	698	655	755
	Rapport Prévision mesures	1,05	1,34	1,86	1,36	1,32	1,28	0,78	0,76	1,28	1,42	0,91	0,53
Différence de température Bourgoin - Mesure °C	- 0,2	+ 1,1	- 1,7	+ 1,1	- 0,2	- 4	0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,9	0	0	0

#### 4.4. REPONSES DU PROGRAMME CLIM A QUELQUES VARIATIONS DES PARAMETRES

##### D'ENTREE

Nous avons utilisé le programme CLIM avec le climat-type de LYON pour différents états des paramètres d'entrée, correspondant soit à des améliorations successives dans la description thermique de l'immeuble, soit à des valeurs différentes des paramètres énergétiques internes. Ces variations concernent des modifications des matériaux constituant les parois, des modifications des puissances de chauffage simulées ou de quelques sources intérieures de chaleur gratuite déclarées (sensible ou latente), enfin des changements des températures de consigne intérieure.

La référence est toujours le demi-immeuble.

##### 4.4.1. Puissances de chauffage et respect des consignes de température intérieure.

Pour les puissances de chauffage (électriques) "appelables" par le programme CLIM dans les différents modules chauffés, nous avons initialement déclaré partout une puissance quasi infinie ( $10^4$  KW dans chaque module). En analysant le détail des résultats, on a pu constater partout l'absence de surchauffes et des consommations (électriques) de chauffage normales. Surtout, ponctuellement, des pointes dans les besoins en chauffage déterminent des appels à des puissances qui restent inférieures à celles des convecteurs d'appoint installés. Nous avons donc par la suite déclaré dans chaque module chauffé des puissances de chauffage électrique égales à celles des convecteurs d'appoint, qui sont toujours suffisantes. Les énergies consommées, à consigne intérieure identique (variant de 19 à 22°C) sont les mêmes avec les deux niveaux de puissance.

Dans tous les cas, cette puissance de chauffage maintient la température de consigne sans aucune surchauffe durant tous les mois froids. Les dépassements des températures de consigne en automne ou au printemps sont dus à l'ensoleillement ou aux autres sources de chaleur gratuite, et le chauffage n'est pas alors sollicité.

On a pu en outre constater sur diverses simulations l'indépendance thermique des deux demi-immeubles Est et Ouest. Ceci correspond donc à la réalité puisque le mur mitoyen est constitué, sur toute la surface commune, de deux murs de béton accolés, de 16 cm chacun, séparés par 4 cm de polystyrène (KS de l'ordre de 50 W/K). Lorsque les consignes intérieures sont identiques en Est et Ouest, la différence des consommations de chauffage simulées est 60 Kwh pour l'année et l'évolution des températures est la même, à 0,1°C près.

A titre de conclusion, nous retenons :

- que l'équilibre thermique du programme CLIM est correct, c'est-à-dire qu'il ne surchauffe pas lorsqu'il fait appel à une puissance électrique pour le chauffage ;
- que les puissances des convecteurs d'appoint installés avaient été correctement calculées au départ, puisque suffisantes et, de plus, non surdimensionnées, les puissances maximales appelées étant de peu inférieures aux puissances installées ;
- que les risques de surchauffe par les apports internes déclarés sont par contre réels, en demi-saison surtout, et qu'il était donc bien nécessaire de les ajuster progressivement en se fiant à des statistiques précises.

#### 4.4.2. Sensibilité de CLIM à une légère variation de l'isolation thermique.

Il s'agissait en fait d'une amélioration de la simulation initiale pour la rendre plus conforme à la réalité. Nous avons, par exemple, tenu compte pour les murs verticaux externes de l'enduit extérieur et pour les parois internes horizontales de la présence des moquettes ou des carrelages. Nous avons aussi revu le mur Sud sous capteurs et mieux simulé le gravillon sur terrasse.

Les modifications ou ajouts des matériaux simulés entraînent une rectification des coefficients K des parois calculée par CLIM qui est

conforme aux calculs manuels usuels (D.T.U.). Ainsi, un mur vertical extérieur non isolé voit son K passer, à cause de 1,5 cm d'enduit extérieur, de  $3,83 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  à  $3,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  alors que la même modification pour le mur vertical isolé fait passer de  $K = 0,43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  à  $K = 0,42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

A consignes intérieures identiques (référence Est à  $19^\circ\text{C}$ ), avec les mêmes sources de chaleur gratuite déclarées, excepté un taux d'occupation plus important que nous défalquons, on a pu déterminer : l'augmentation relative du facteur KS équivalent des parois extérieures  $\frac{\Delta(KS)}{KS}$ , la diminution relative du coefficient G,  $\frac{\Delta G}{G}$ , et la diminution relative de la consommation d'énergie de chauffage correspondante,  $\frac{\Delta C}{C}$ . On trouve :

$$\frac{\Delta(KS)}{KS} = - 0,0032 \quad , \quad \frac{\Delta G}{G} = - 0,0022 \quad \text{et} \quad \frac{\Delta C}{C} = - 0,017.$$

Une très légère modification du mur extérieur vertical isolé, dont le K diminue de  $0,01 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , a donc très peu d'influence sur KS global extérieur approché et sur le G, mais modifie pourtant de presque 2 % la consommation de chauffage.

#### 4.4.3. Sensibilité de CLIM aux simulations des apports internes.

Nous comparons ici deux simulations par CLIM avec les mêmes consignes intérieures (Est et Ouest à  $20^\circ\text{C}$ ), la même description du bâtiment et la même occupation des locaux. Par contre les apports internes par l'éclairage passent de  $10 \text{ W/m}^2$ , répartis sur 6 heures par jour à  $2 \text{ W/m}^2$  sur 4 heures (§ 4.1.1. et 4.2.1.1.). Les apports internes par l'électroménager, décrits initialement par 1 000 W sur 2 heures et 250 W sur les 22 heures restantes sont rectifiés à 425 W sur 6 heures et 30 W sur les 18 heures restantes (§ 4.1.1. et 4.2.1.). Les apports gratuits correspondants calculés par le programme différent alors de 20 802 Kwh (demi-immeuble), et les valeurs simulées montrent que c'est un total annuel. Or la différence des consommations de chauffage est 9 928 Kwh. En calculant la différence des apports internes par l'éclairage et l'électroménager, ramenée à la saison de chauffage, on trouve 13 222 Kwh; il reste encore un excédent d'apports internes de 3 294 Kwh. En examinant le détail des températures moyennes des divers modules chauffés, on note

une surchauffe pour la lère simulation : nulle ou très faible de novembre à janvier, elle est sensible sur tous les autres mois et atteint par exemple 0,76°C en moyenne en avril (moyenne extérieure 11,4°C) et 1,35°C en octobre (moyenne extérieure 13,9°C). En calculant alors chaque mois les différences moyennes  $GVA\theta$ , on constate que ces surchauffes correspondent à une énergie supplémentaire d'au moins 3 110 Kwh, c'est-à-dire expliquent bien l'excédent précédent. Il convient donc d'utiliser de bonnes références statistiques pour estimer le niveau correct des apports internes à déclarer. Les apports internes retenus finalement pour ces deux postes ont été revus d'après les consommations électriques domestiques mesurées pendant la première année. Ils correspondent à une énergie supérieure d'environ 30 % à celle du deuxième cas simulé ici.

#### 4.4.4. Réponses de CLIM à des variations de consigne intérieure.

Nous avons simulé (demi-immeuble EST) quatre températures de consigne : 19°C, 19,5°C, 20°C et 21°C. Ces consignes sont strictement respectées (à 0,1°C) dans les divers modules chauffés de novembre à février. Par contre on a une légère élévation des températures intérieures mensuelles moyennes en octobre et de mars à mai, correspondant aux variations du climat extérieur ou aux surchauffes dues aux apports internes simulés.

Pour la consigne de température intérieure minimale  $\theta_1$ , nous adoptons une température de non-chauffage (§ 4.2.2.)  $\theta_{NC} = \theta_1 - \delta$ , où  $\delta = 3,2^\circ\text{C}$  [21, pp. 51 et 52]. Nous analysons les consommations de chauffage C en calculant les degrés-jours annuels de base  $\theta_{NC}$  ; en effet, le programme CLIM maintient la consigne toute l'année (traces de chauffage, par exemple, en juin et septembre). Nous utilisons les degrés-jours de Lyon [12], correspondant à ceux du climat-type utilisé par CLIM, et nous interpolons éventuellement les degrés-jours de température distinctes  $\theta_1$  et  $\theta_2$  par la formule (§ 4.2.2.) :

$$D_{\theta_1} = D_{\theta_2} \left( \frac{\theta_1 - \theta_0}{\theta_2 - \theta_0} \right)^3$$

où  $\theta_0 = -11^\circ\text{C}$ , température de base selon DTU à Bourgoin.

Température de consigne $\theta_i$ en °C	Consommation de chauffage C en Kwh	Température de non-chauffage $\theta_{NC}$ en °C	Degrés-jours année de base $\theta_{NC} : DJ$	$\frac{\Delta C}{C}$ en %	$\frac{\Delta (DJ)}{DJ}$ en %
19	46 891	15,8	2 171		
19,5	50 106	16,3	2 295	+ 6,9	+ 5,7
20	53 344	16,8	2 434	+ 6,5	+ 6,1
21	60 317	17,8	2 723	+ 13,1	+ 11,9

On trouve donc un accroissement de consommation de 6 500 Kwh par degré et par demi-immeuble, soit 13 à 14 % d'augmentation par degré. Or le facteur GV d'un demi-immeuble (1 271 W/K) conduit pour  $\Delta\theta = 1$  K à environ 7075 Kwh de besoins supplémentaires pour la saison de chauffage, soit + 9 % par rapport à la valeur simulée. Par contre les accroissements relatifs de consommation  $\frac{\Delta C}{C}$  sont très proches de ceux des degrés-jours annuels de base  $\theta_{NC}, \frac{\Delta DJ}{DJ}$ .

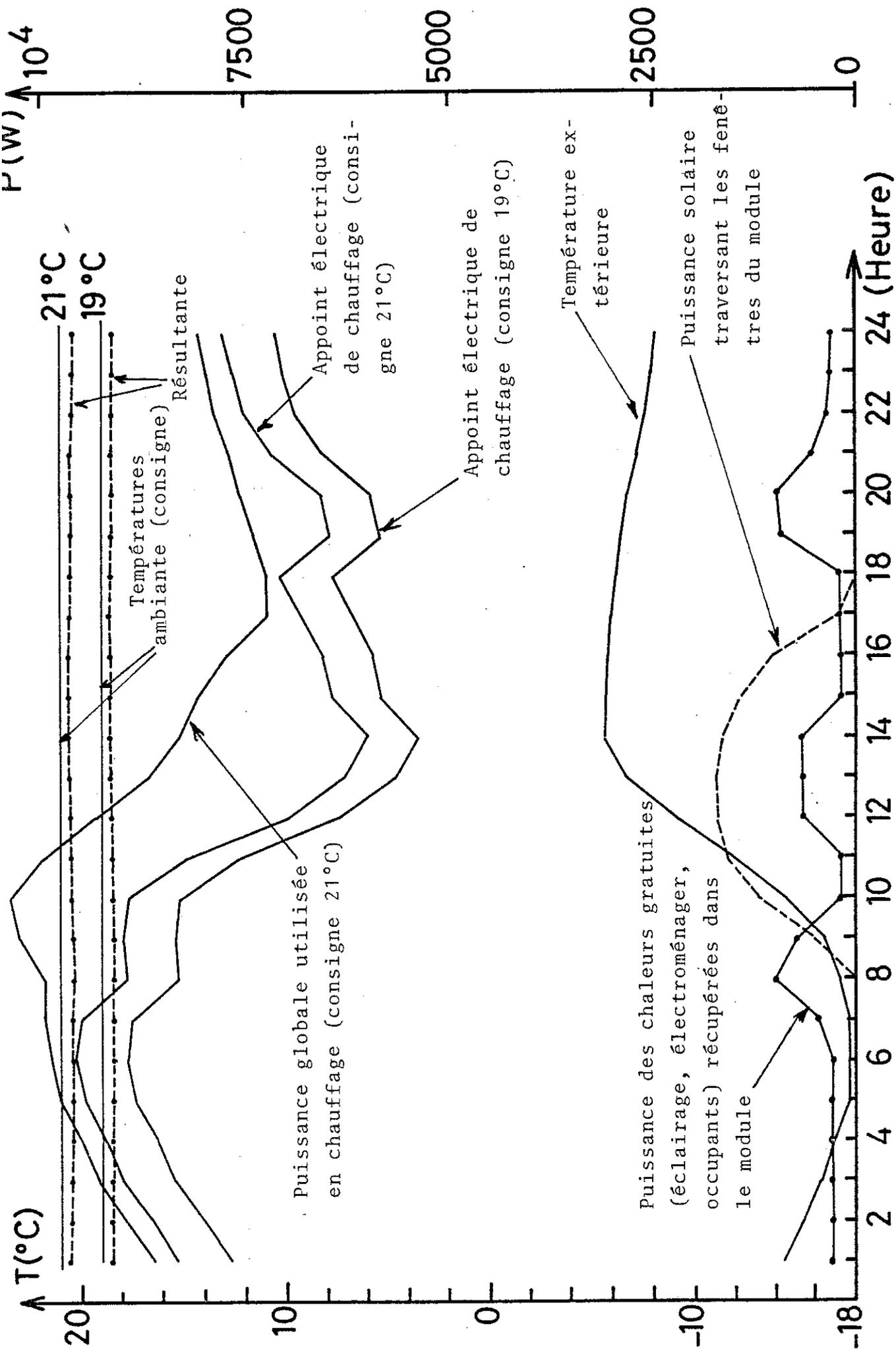
Une régression linéaire calculée par procédure moindres carrés donne: pour  $C = a + b \theta_i$ ,  $a = - 80 943$ ,  $b = 6 722$ , avec un coefficient de corrélation  $R = 0,99976$ . Pour  $C = a + b DJ$ ,  $a = - 5 558$ ,  $b = 24,2$  et  $R = 0,99988$ . Dans cette région de température, on constate donc une très bonne corrélation linéaire des consommations avec la température de consigne ou avec les degrés-jours. Ceci est logique puisque, à ce niveau de température, chaque degré supplémentaire exigé est décompté comme degré-jour sur toute la saison de chauffage.

#### 4.4.5. Contribution des différentes sources d'énergie à l'évolution diurne de la température intérieure d'un module chauffé.

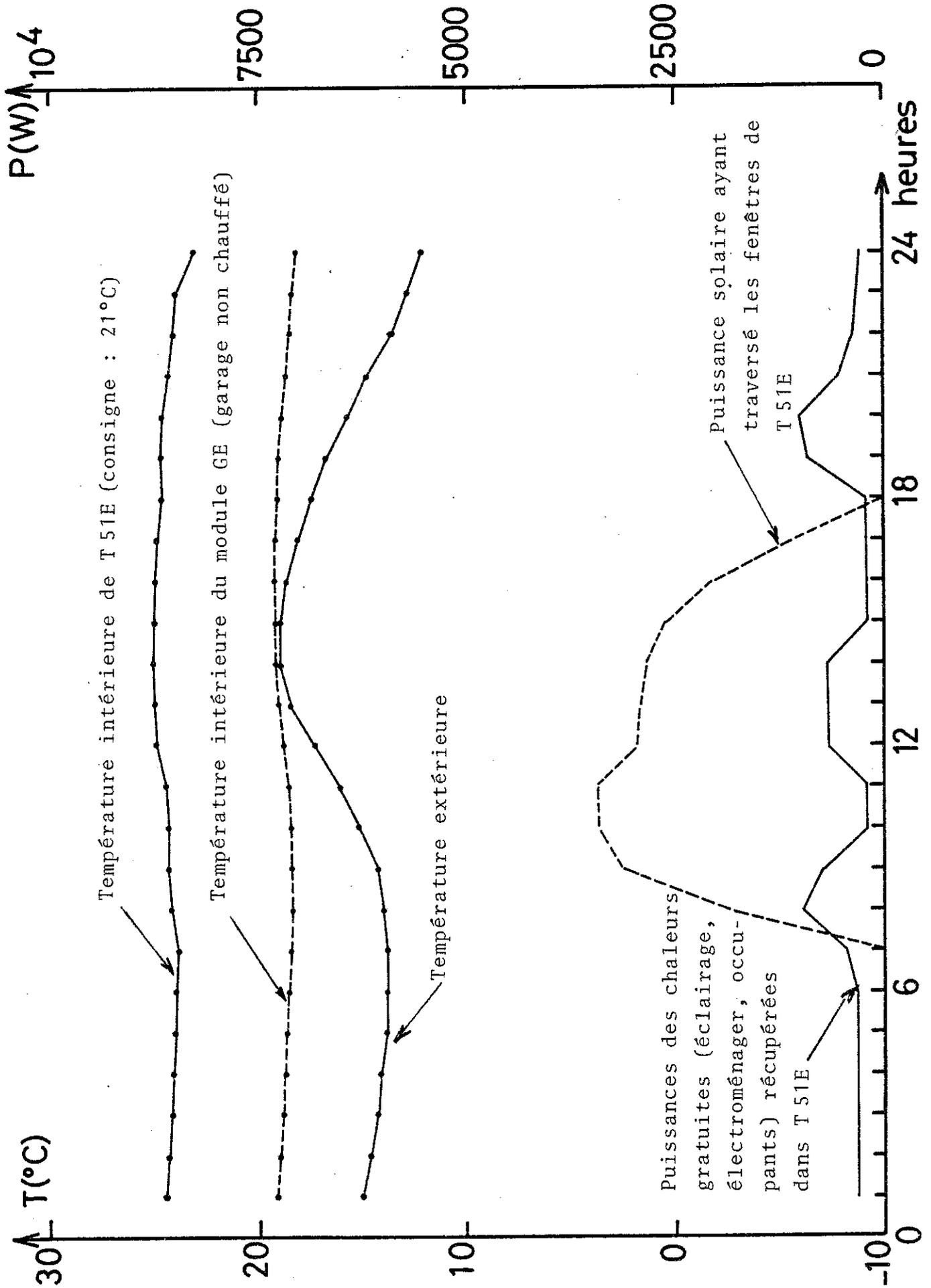
Nous avons choisi le module T51E (appartement T5, 1er étage, Est) pour les journées du 15 octobre et du 25 janvier, jour simulé exceptionnellement froid dans le but de contrôler les puissances de chauffage installées.

Nous notons le 25 janvier (figure n° 10) que, lorsque les apports gratuits augmentent nettement (6 à 8 h, 12 à 14 h, 18 à 21 h), ils permettent une réduction sensible des puissances électriques de chauffage. L'augmentation des apports par l'ensoleillement ou l'élévation de température extérieure permettent aussi de réduire cette consommation entre 10h et 14 h. La puissance utilisée pour maintenir la consigne 19°C est à peu près parallèle à celle donnant 21°C. La puissance globale utilisée pour maintenir 21°C compense avec un léger retard les températures extérieures. La journée du 15 octobre (figure n° 11), bien ensoleillée et peu froide, ne nécessite aucun chauffage électrique. On constate l'inertie du bâtiment tant pour le module chauffé T51E, où la température interne varie très peu, que pour le module GE, garage fermé et sans fenêtre, où la variation de température est encore plus faible. Les énergies dues à l'ensoleillement et aux apports internes n'entraînent que de petites fluctuations de la température intérieure du module qui reste, sans chauffage, à un niveau élevé à la suite d'une période bien ensoleillée.

FIGURE 10 : MODULE T 51E JOURNEE DU 25 JANVIER



MODULE T 51E : JOURNEE DU 15 OCTOBRE



#### 4.5. REponses DU PROGRAMME MASOL A DES VARIATIONS DE QUELQUES PARAMETRES D'ENTREE DU SYSTEME SOLAIRE SIMULE. COMPARAISON AVEC L'EXPERIENCE

Nous analysons ici l'essentiel des calculs effectués avec MASOL pour prévoir l'évolution des bilans en fonction des variations de quelques paramètres solaires. Ces calculs prévisionnels, que nous avons déjà publiés en 1978 [9], utilisaient la 2ème version de CLIM (§ 4.4.3.), soit : climat-type de Lyon, consigne intérieure à 20°C, apports internes revus, mais non encore recalés sur les mesures. Les variations des paramètres solaires ont été simulées dans les limites qu'autorisait l'expérimentation (§ II). Elles concernent notamment l'inertie du circuit primaire, la surface de captation et le volume de stockage. La référence choisie est toujours le demi-immeuble.

##### 4.5.1. Sensibilité de MASOL à une variation de l'inertie du circuit des capteurs.

Pour simuler le volume en eau variable du circuit primaire, nous faisons varier l'inertie des capteurs par adjonction des ballons supplémentaires d'eau glycolée prévus (§ II). Nous avons calculé les différentes valeurs en eau correspondantes des capteurs (§ 3.2.1.). Pour la mise à régime, nous incluons d'ailleurs l'équivalent en eau de l'acier de l'absorbeur et des raccords arrières. On trouve alors les quatre cas suivants :

Pour 2,5 l/m<sup>2</sup> de l'absorbeur, par exemple, on trouve 2,37 l/m<sup>2</sup> pour l'équivalent en eau de l'acier et 0,13 l/m<sup>2</sup> pour celui des raccords arrières.

Capacité en eau de l'absorbeur l/m <sup>2</sup>	Ballon(s) ajouté(s) au circuit primaire: volume en l	Equivalent en eau des capteurs: l/m <sup>2</sup>
2,5	0	5
5,8	500	8,9
9,09	1 000	12,2
12,39	1 500	15,5

L'augmentation de l'inertie des capteurs simulée (figure n° 12) semble conduire à une légère diminution de la participation solaire aux bilans annuels d'énergie. Par l'expérimentation, à Bourgoin, nous n'avons pu que vérifier le sens de la réponse aux variations d'inertie. Les mesures quantitatives des faibles écarts d'énergie résultants sont indiscernables d'autres variations, dues par exemple aux différences de comportement énergétique des habitants entre Est et Ouest. Cet effet n'a pas non plus été mesuré ailleurs à notre connaissance.

Mais une simulation par le programme MINERSOL [33, § I] , sur un tout autre principe que MASOL, aboutit aux mêmes conclusions : si, pendant de courtes périodes, l'effet d'une faible inertie peut être très marqué, notamment en début de journée, le gain final reste faible. L'ordre de grandeur des variations relatives du gain en énergie par rapport à celles de la masse en acier ou celles du contenu en eau de l'absorbeur est confirmé [33, p. 776]. L'équipe américaine du Wisconsin confirme par une approche théorique [36, § 6.11] la tendance et son ordre de grandeur.

#### 4.5.2. Réponse de MASOL à une variation de la surface de captation.

Nous avons simulé les variations de surface les plus simples à réaliser in situ, c'est-à-dire par tranches verticales de  $\Delta S = 15,2 \text{ m}^2$ , entre  $151,8 \text{ m}^2$  (surface maximale) et  $91,08 \text{ m}^2$ , soit 60 % du maximum. A stockage maximal et inertie primaire minimale, les figures 13 et 15 montrent, mois par mois, une augmentation nette de la température de stockage ou de la part solaire en énergie (même destinée à l'E.C.S. seule) avec l'augmentation de la surface des capteurs. La figure 14 montre l'évolution de la part solaire annuelle d'énergie utilisée pour le chauffage seul, pour l'ECS ou globalement en fonction de la surface de captation.

Là encore, l'expérimentation n'a pas permis de vérifications quantitatives, cette fois par suite de pannes et de mauvais fonctionnement de plusieurs appareils au cours de cette manipulation.

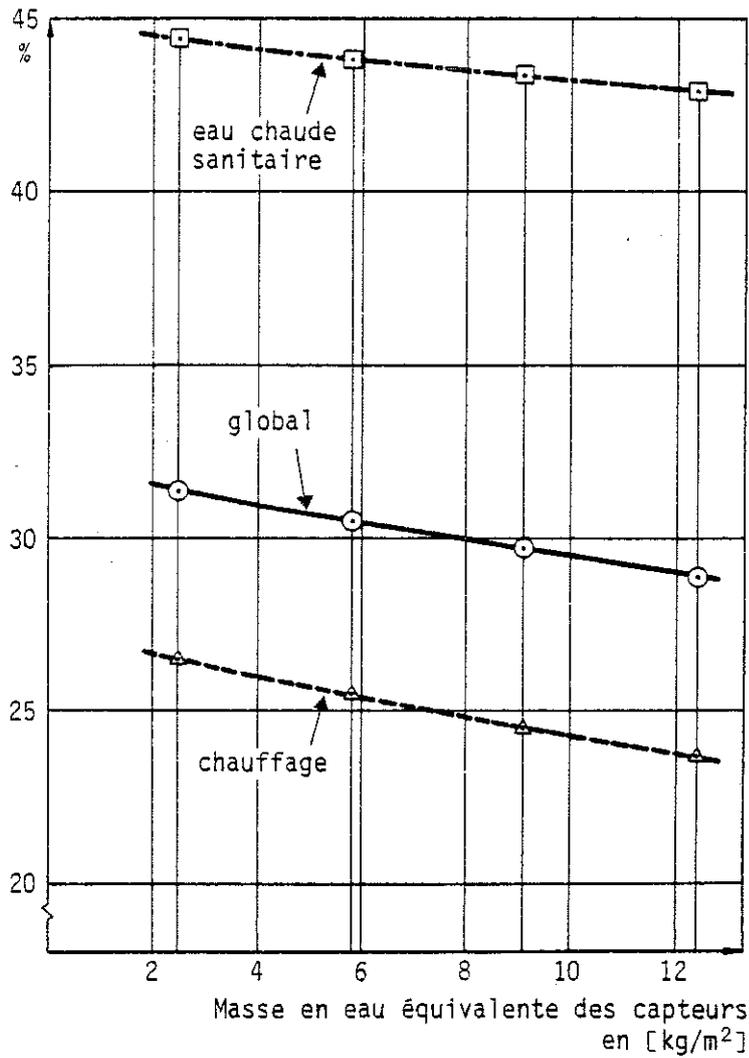


Fig. 12 : Pourcentage annuel brut d'énergie solaire utilisée par rapport aux besoins, selon l'inertie des capteurs simulée, à stockage maximal et surface de captation moyenne, soit 322,9 [l/m<sup>2</sup>].

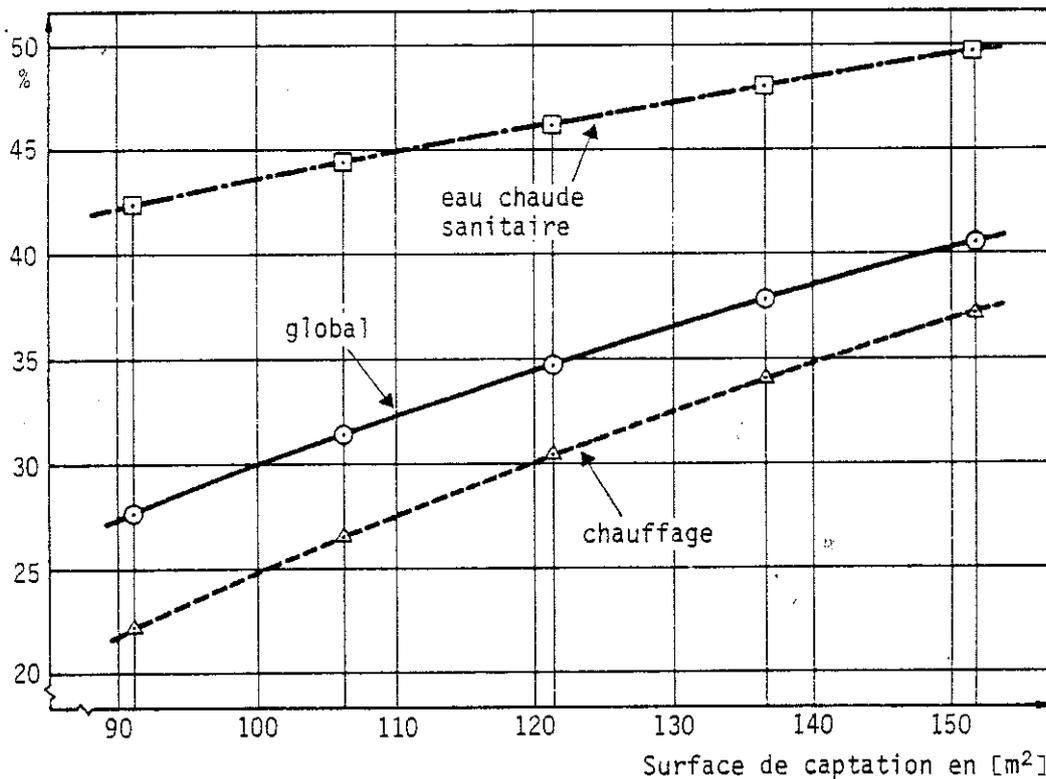


Fig. 14 - Pourcentage annuel brut d'énergie solaire utilisée par rapport aux besoins selon la surface de captation simulée, à volume de stockage maximal et à inertie des capteurs minimale.

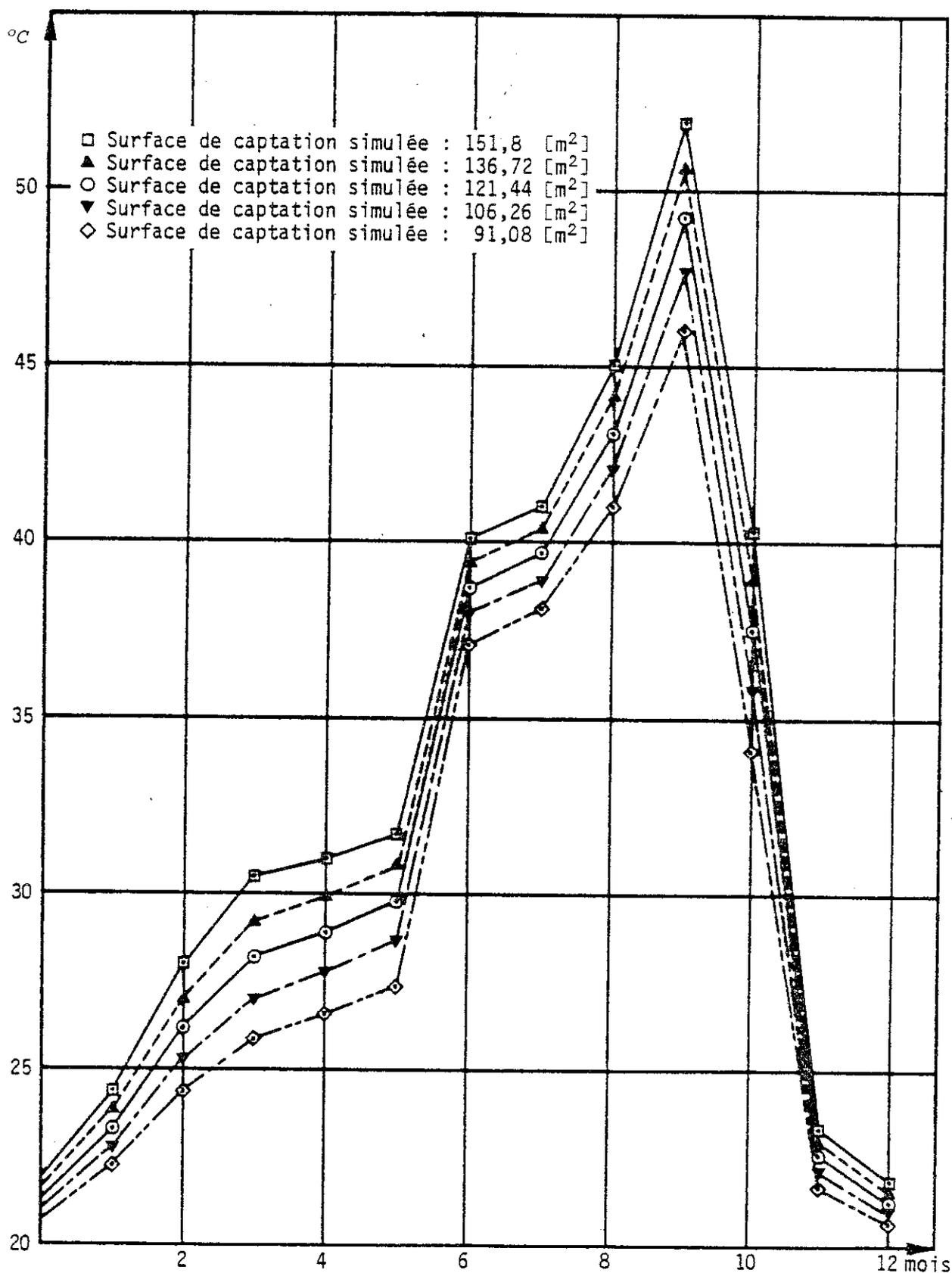


Fig. 13 - Température moyenne du stockage, selon la surface de captation simulée à stockage maximal (3 citernes, soit 226,1 [l/m<sup>2</sup>], 282,6 [l/m<sup>2</sup>], 322,9 [l/m<sup>2</sup>] et 376,8 [l/m<sup>2</sup>] respectivement) et à inertie des capteurs minimale (2,5 [l/m<sup>2</sup>]) d'équivalent-eau.

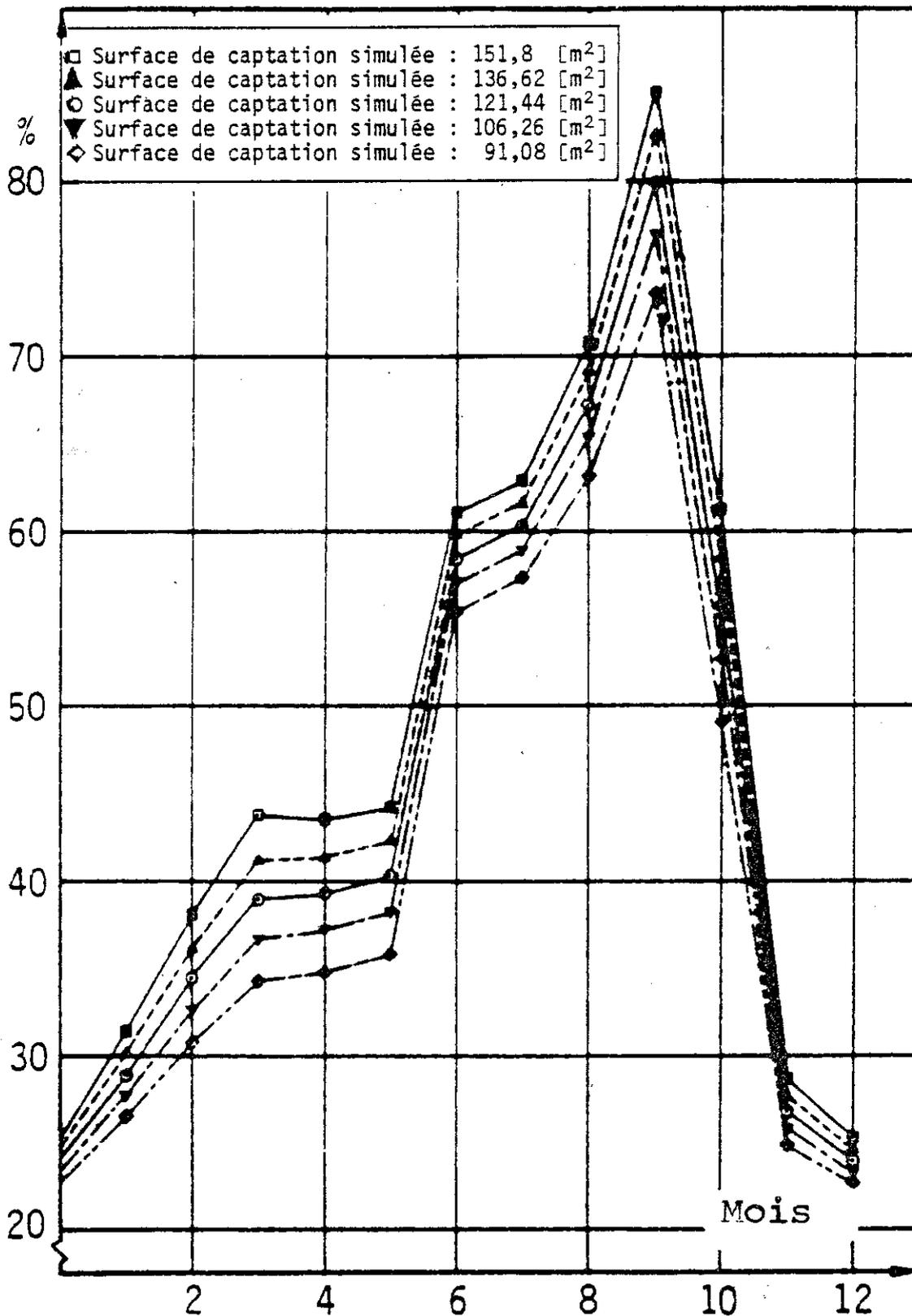


Fig.15 - Pourcentage de la participation solaire en énergie relative aux besoins en eau chaude sanitaire en fonction de la surface de captation.

Nous pouvons néanmoins vérifier le bon accord de cette réponse de MASOL avec une formulation mise au point ultérieurement (en 1979) par CHANG & MINARDI à l'occasion d'une étude économique d'un système solaire pour l'E.C.S. [37]. Simulant plusieurs surfaces de captation A par le programme TRNSYS, ces auteurs proposent la corrélation :

$Q_{\text{aux}} = Q_m \exp(-\lambda A)$ , où  $Q_{\text{aux}}$  et  $Q_m$  sont les énergies auxiliaire et totale nécessaire, respectivement, A l'aire de captation ( $\text{m}^2$ ) et  $\lambda$  un coefficient calculé à  $0,315 \text{ m}^{-2}$ . Effectivement avec MASOL, ainsi que pour beaucoup d'autres modèles de simulation, on constate que la productivité des capteurs augmente, pour un système donné, lorsque la surface de captation diminue (figure n° 16). Ceci explique des relations de type exponentiel, et non linéaire.

Cette liaison exponentielle entre l'énergie auxiliaire et l'aire de captation a été vérifiée au sein de notre groupe pour une simulation de l'ECS solaire par le programme TRNSYS, en utilisant une météo réelle (54 jours consécutifs, juin à septembre 1980) de Bourgoin [38]. On a trouvé  $\lambda = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ . En fait, ce type de corrélation a été généralisé à tous les systèmes solaires avec capteurs plans à eau dans la f-chart méthode de Klein et al. [39, courbes 5.2 & 5.8] .

Utilisant la simulation par MASOL, nous avons porté sur papier semi-log (figure n° 17) les parts d'énergie auxiliaire (%) versus la fraction de l'aire maximale de captation (%). On trouve un bon alignement des 5 points dans chacun des 3 cas (chauffage seul, ECS seule ou somme de ces deux postes). Les coefficients  $\lambda$  moyens calculés sont : pour l'ECS,  $\lambda = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ ; pour le chauffage,  $\lambda = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$  et globalement,  $\lambda = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ . La variation exponentielle est donc bien vérifiée. L'ordre de grandeur de  $\lambda$  semble constant, pour Bourgoin, et ce paramètre est sans doute propre au système solaire étudié.

FIGURE 16

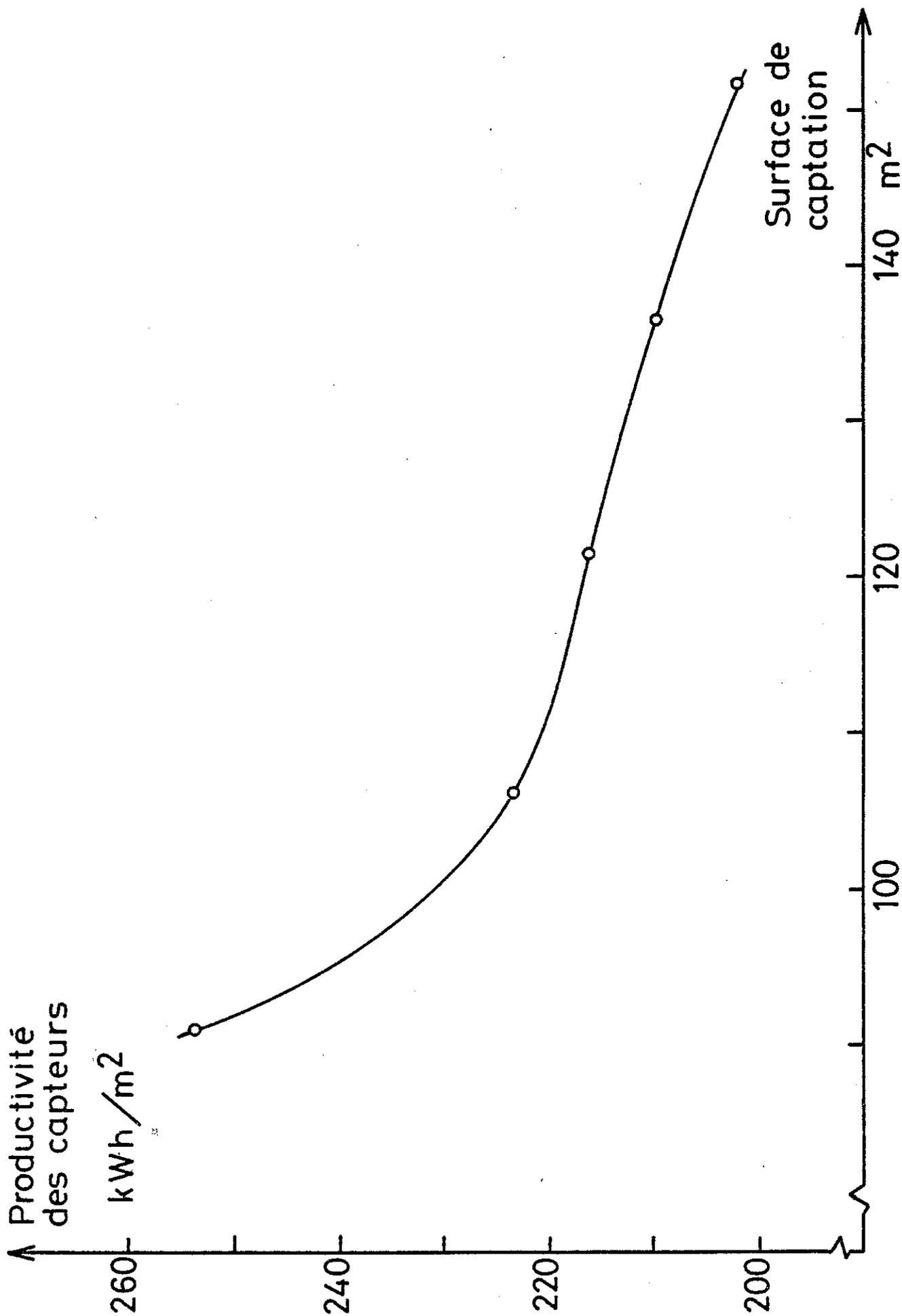
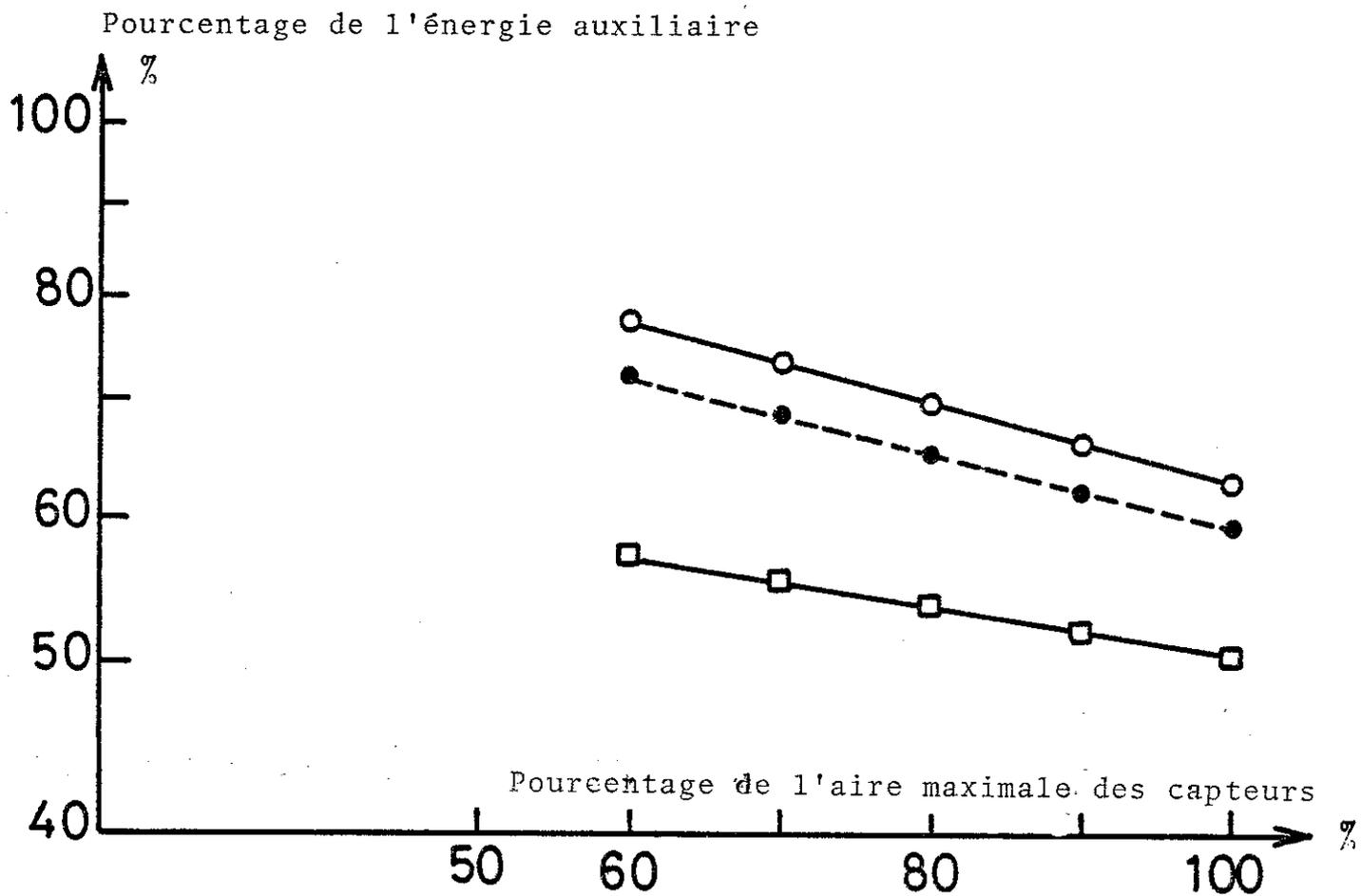


FIGURE 17



Part d'énergie auxiliaire nécessaire :

□ pour l'eau chaude sanitaire seulement

○ pour le chauffage seulement

● pour les besoins globaux.

#### 4.5.3. Sensibilité de MASOL à des variations du volume de stockage.

Pour les calculs prévisionnels, nous avons simulé sommairement la cuve unique équivalente au stockage (cf. § 4.3.1.b.) selon le nombre de citernes de  $10 \text{ m}^3$  utilisées, de 0 à 3. Le volume de stockage résiduel (0 citerne) a été surévalué à la suite d'une modification du plan initial du système.

L'évolution de la température moyenne de stockage, simulé selon les différents volumes de mars à mai (figure n° 18) s'explique par la diminution de l'énergie reçue par les capteurs (figure n° 20). L'accroissement des besoins en mars correspond à l'anomalie du climat-type, déjà signalée. La figure 18 semblerait indiquer un surdimensionnement du stockage, mais sur la figure 19 on constate pourtant que la participation solaire en énergie augmente encore avec le nombre de citernes. Pour l'E.C.S. seule par contre, cette part solaire diminue (figures 19 et 21) et ceci est logique puisque la température moyenne du stockage diminue, entre janvier et mai, lorsque le nombre de citernes augmente.

Plusieurs expériences de variation des volumes de stockage ont été faites à Bourgoin. La tendance prévue a bien été observée, mais les gains relatifs restent du même ordre de grandeur que la dispersion en situation symétrique (stockage identique en Est et Ouest). Les figures 22 à 26 montrent :

- l'énergie incidente globale,  $Q_{inc}$ , mesurée dans le plan vertical des capteurs,
- l'énergie arrivant au stockage,  $Q_{éch}$ ,
- l'énergie effectivement utilisée,  $Q_{ut}$ , pour préchauffer l'E.C.S. et éventuellement dans les planchers chauffants,
- la température moyenne journalière de stockage,  $\theta$ .

On a représenté une structure de stockage symétrique (1 cuve en Est et Ouest, décembre 1978, figure 22) ou une structure dissymétrique

- Simulation de 3 citernes
- △ Simulation de 2 citernes
- Simulation de 1 citerne
- ▽ Simulation de 0 citerne

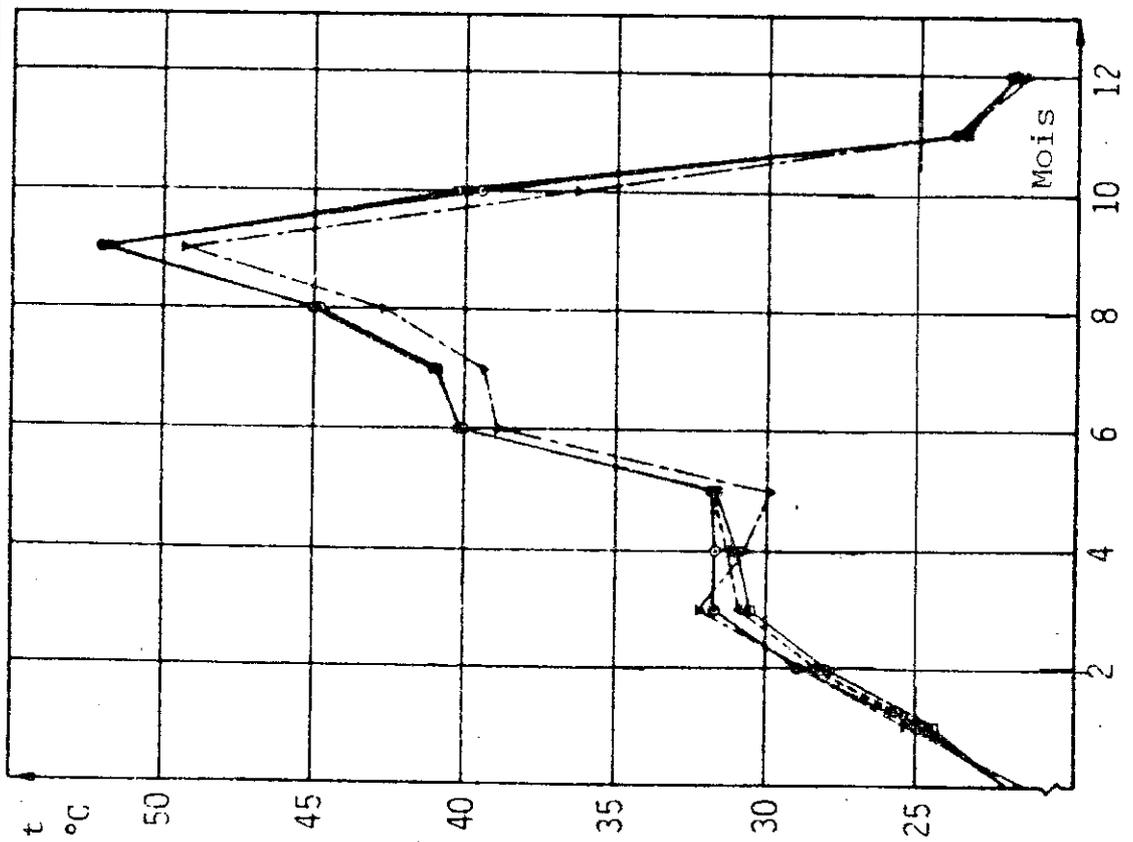


Fig 18 : Présentation des températures moyennes de stockage obtenues par simulation pour différents volumes

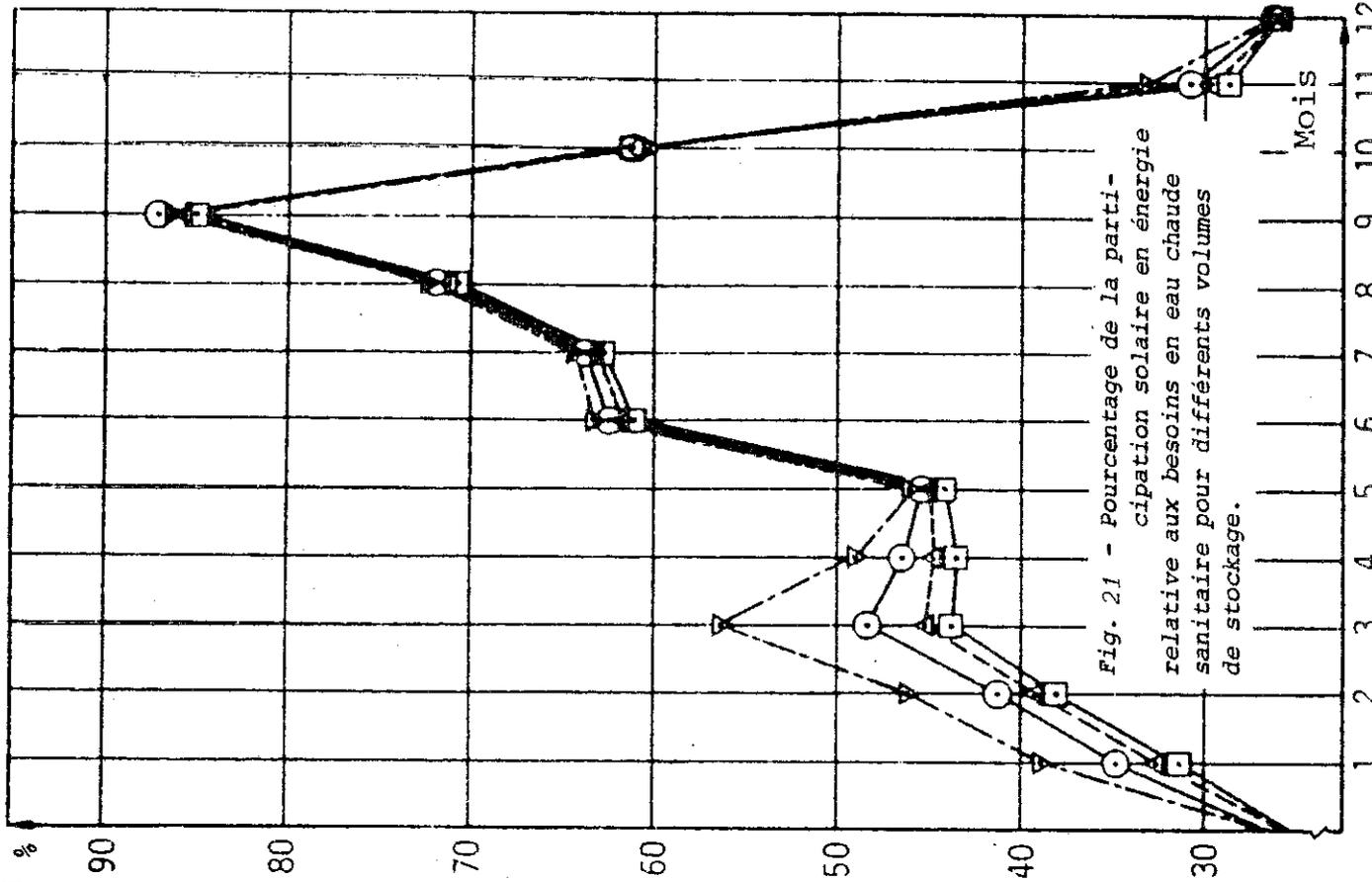


Fig. 21 - Pourcentage de la participation solaire en énergie relative aux besoins en eau chaude sanitaire pour différents volumes de stockage.

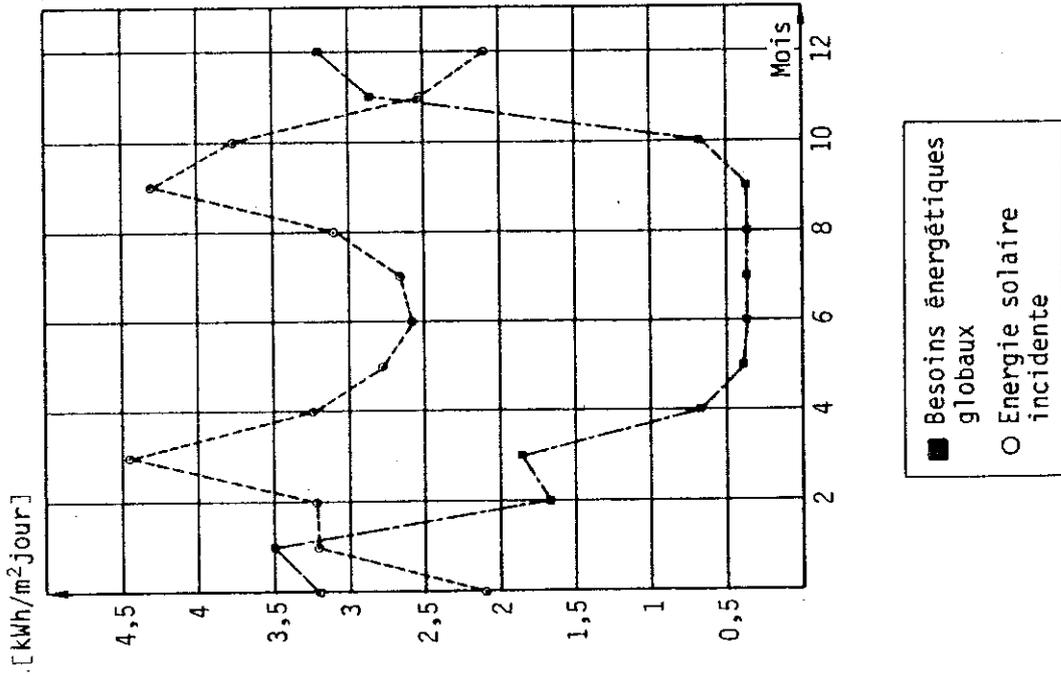


Fig. 20 - Evolutions moyennes mensuelles des besoins énergétiques globaux et de l'énergie solaire incidente verticalement en Sud.

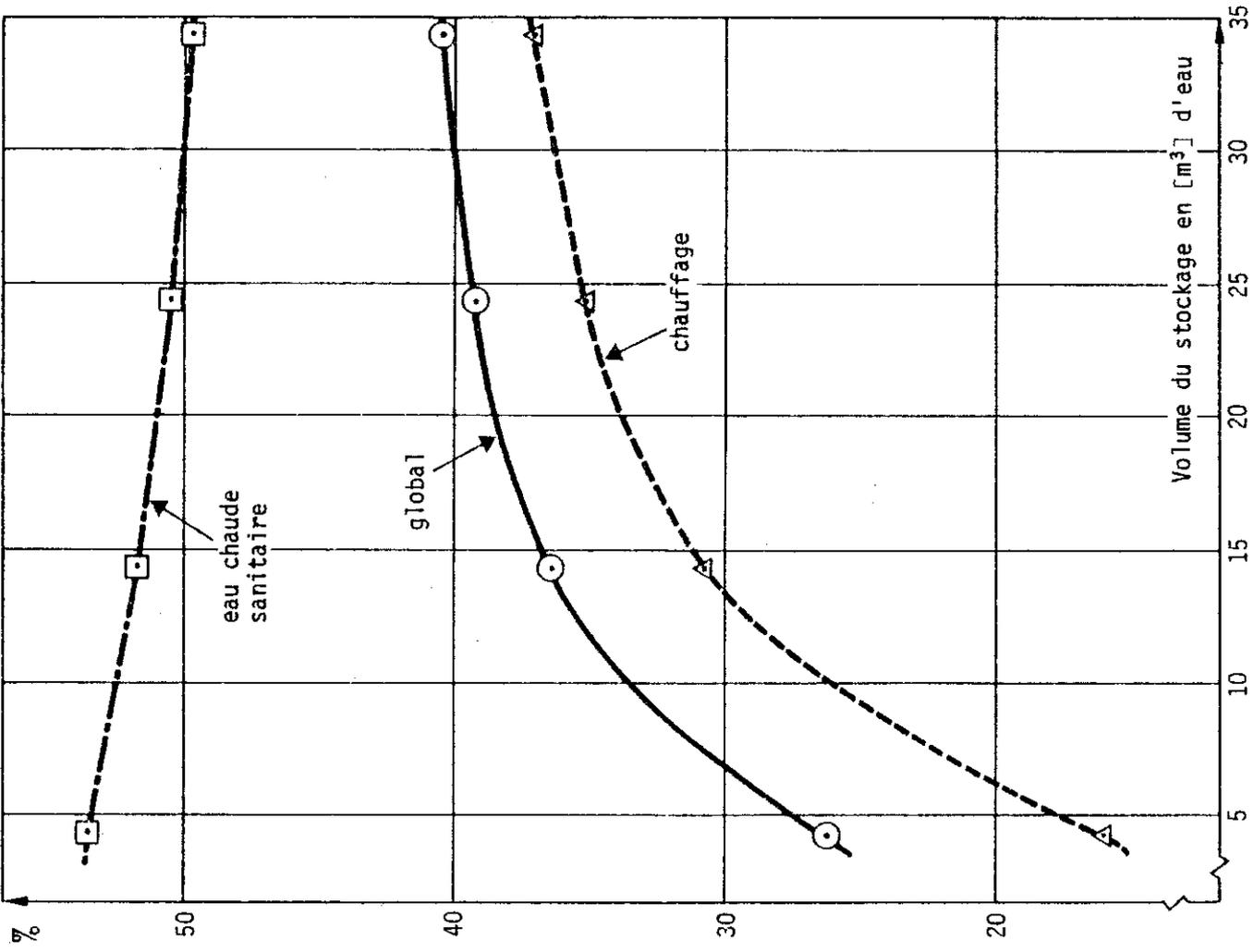
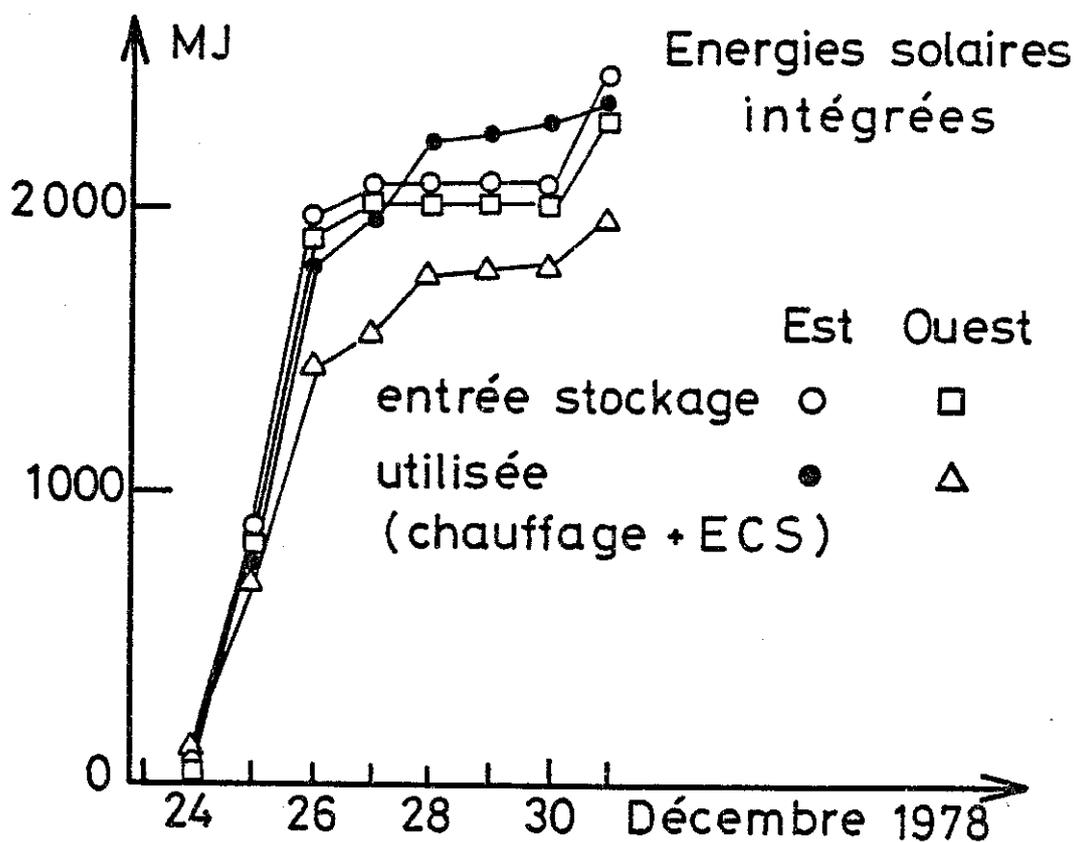
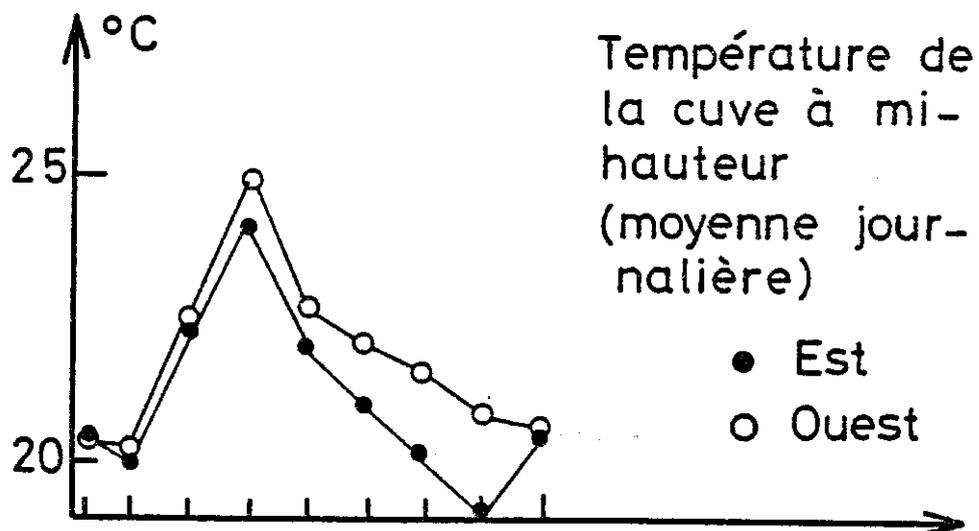
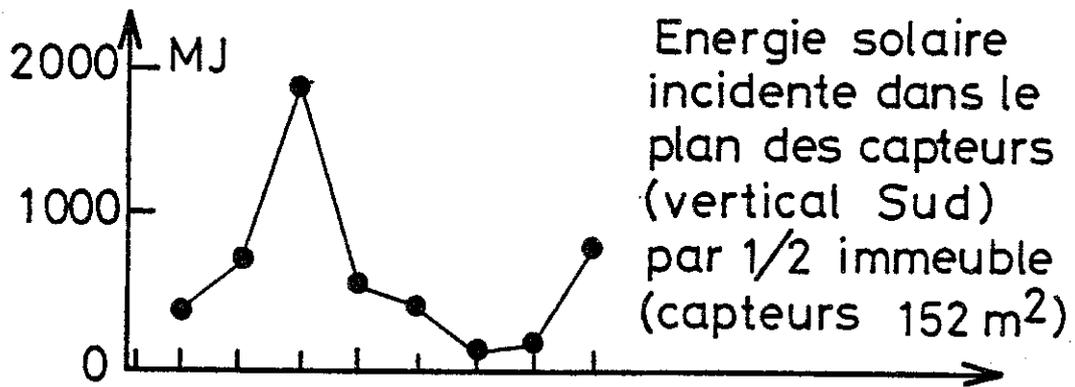


Fig. 19 - Pourcentage annuel brut d'énergie solaire utilisée par rapport aux besoins, selon le volume de stockage simulé (à surface de capteur maximale : 151,8 [m²]).

FIGURE 22



(1 cuve en Est, 3 cuves en Ouest, avril 1980, figure 23, ou décembre 1978, figure 24).

On constate que, globalement, on a bien vérifié qu'on a toujours intérêt, au moins énergétiquement, à augmenter le volume de stockage (figures 25 et 26). De plus, on constate que les performances du système, à volume de stockage donné, varient d'un facteur 2 en fonction des conditions climatiques, du moins si l'on se réfère à des périodes de quelques jours.

Sur la figure n° 25, où nous avons reporté les prévisions annuelles de CLIM + MASOL ci-dessus, on constate que la courbe prévue s'inscrit à peu près dans la moyenne des diverses expériences mesurées. Lorsqu'on passe d'un stockage de  $10 \text{ m}^3$  ( $66 \text{ l/m}^2$  de capteur) à  $30 \text{ m}^3$  ( $197 \text{ l/m}^2$  de capteur) les gains d'énergie restent modestes (15 à 20 %). Les modèles EDF prévoient une chute nette des performances annuelles lorsque le volume de stockage tend vers zéro. Ceci semble moins marqué sur l'expérience (figure 25), qui correspondait à un mois de chauffage (01/03/1979 au 02/04/1979). Mais on a constaté très souvent à Bourgoin, et notamment au cours de cette manipulation, que l'énergie stockée est utilisée le jour même. Enfin le premier pas de variation,  $\Delta V = 10 \text{ m}^3$ , est probablement aussi trop important pour étudier les effets de faible volume de stockage.

L'augmentation du volume de stockage entraîne d'ailleurs une baisse de la température de fonctionnement des capteurs, donc une amélioration de leur rendement. Nous n'avons pas pu introduire ici des mesures précises du rendement dans le but d'expliquer l'effet de taille du volume de stockage, mais nous avons porté, en fonction de  $Q_{inc}$ , le rapport  $\frac{Q_{éch}}{Q_{inc}}$  multiplié par  $\bar{T}_s - \bar{T}_{ext}$ , différence des températures moyennes du stockage et extérieure. Cette corrélation (figure 27) est assez correcte, malgré les approximations faites, et montre bien l'effet très important du niveau d'ensoleillement.

FIGURE 23

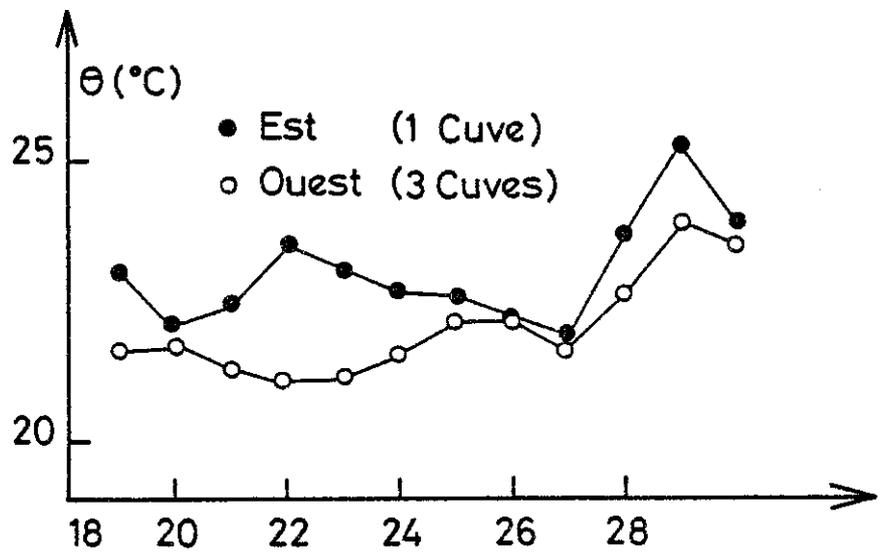
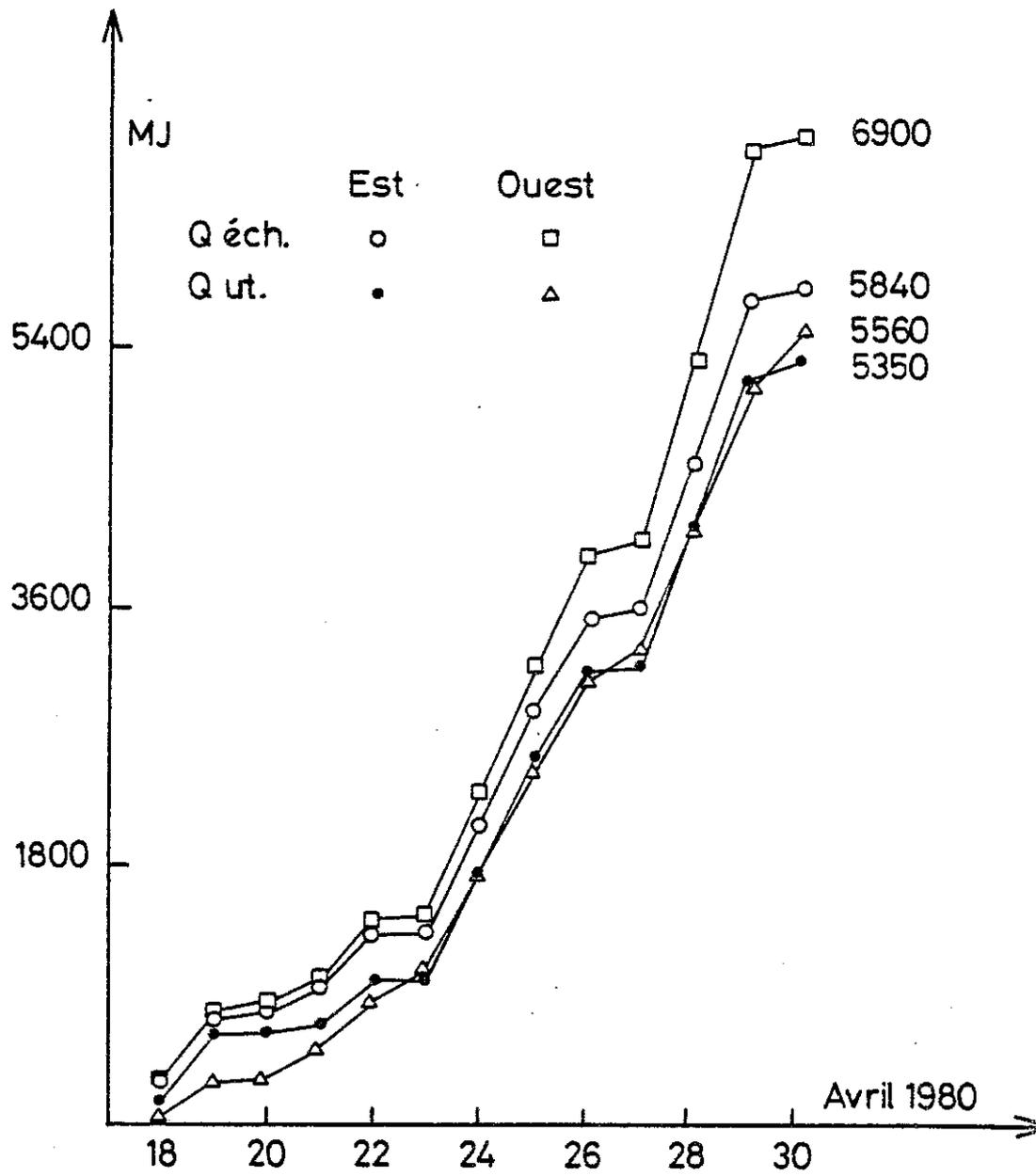


FIGURE 24

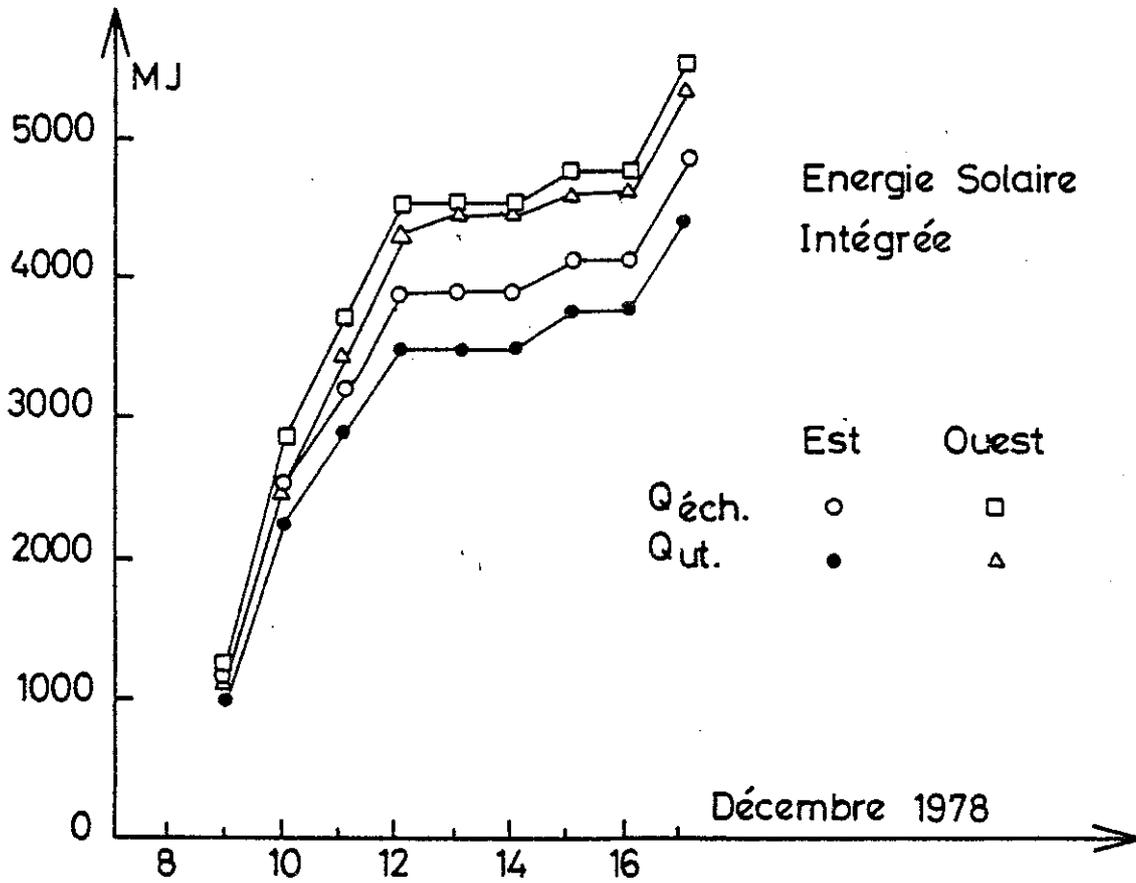
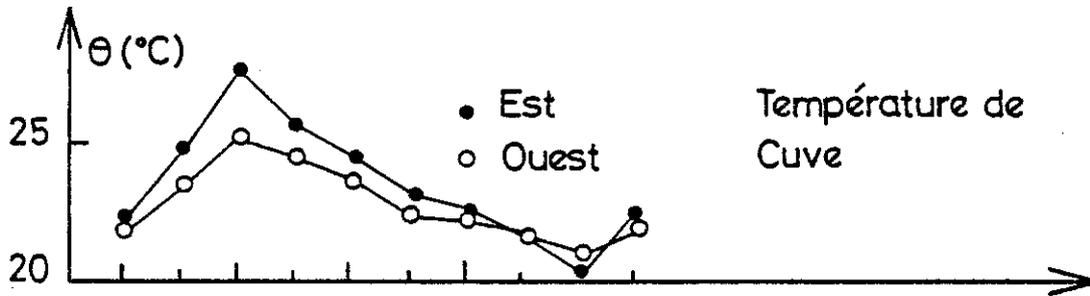
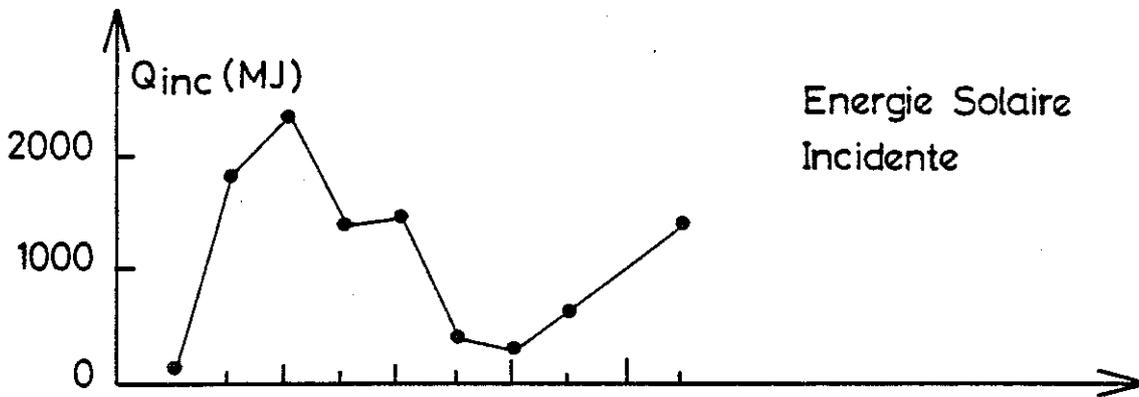


FIGURE 25

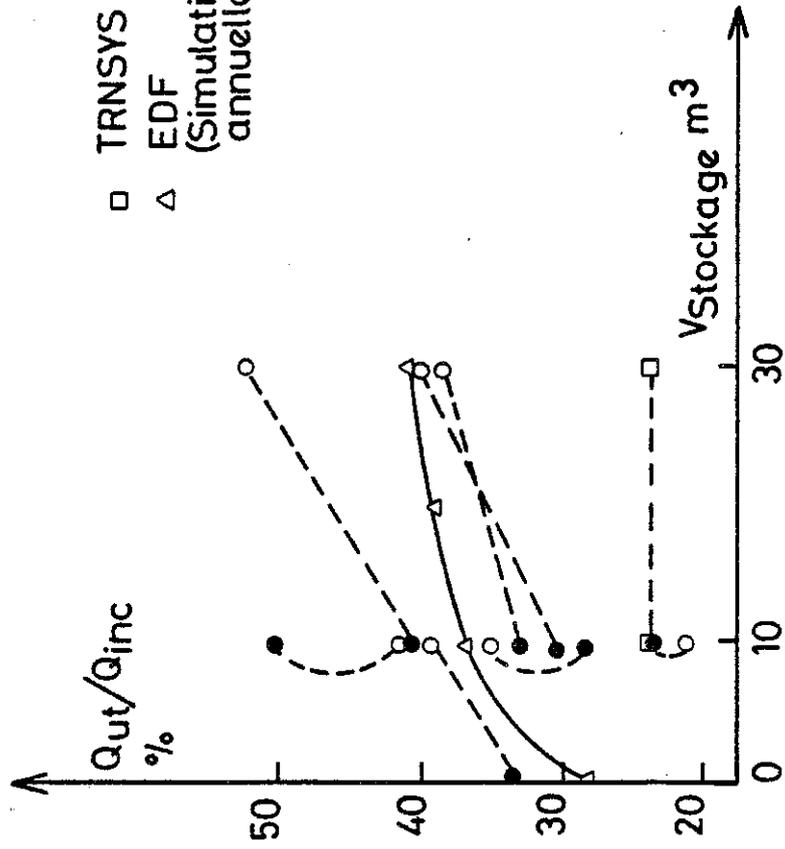
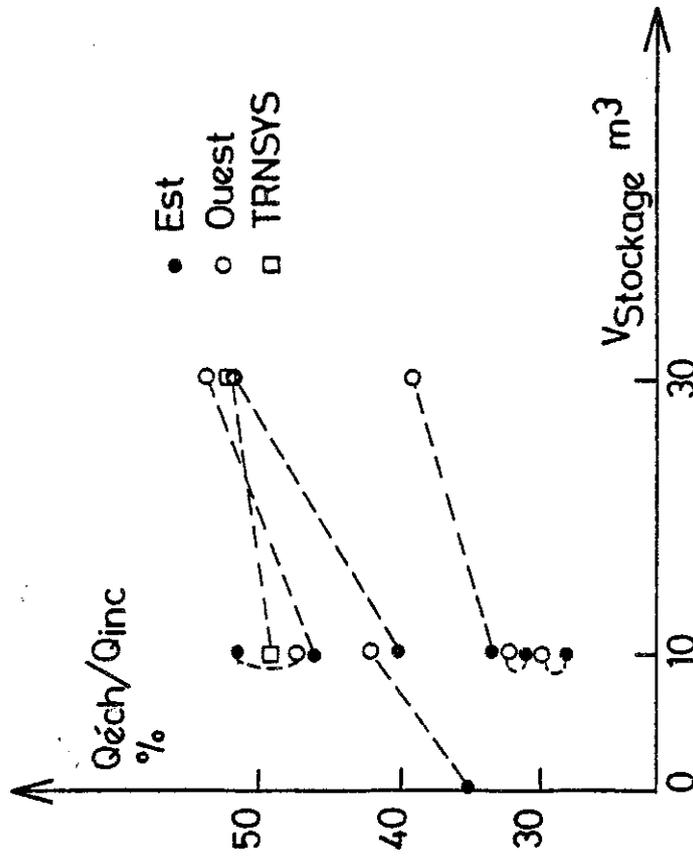


FIGURE 26

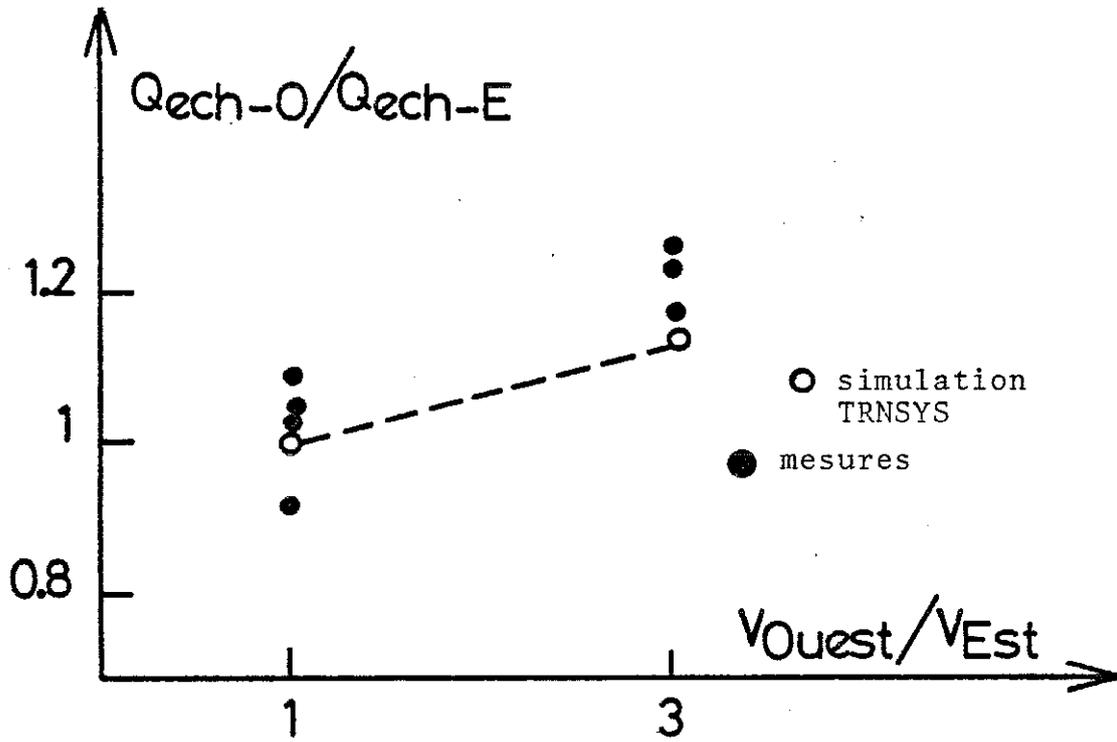
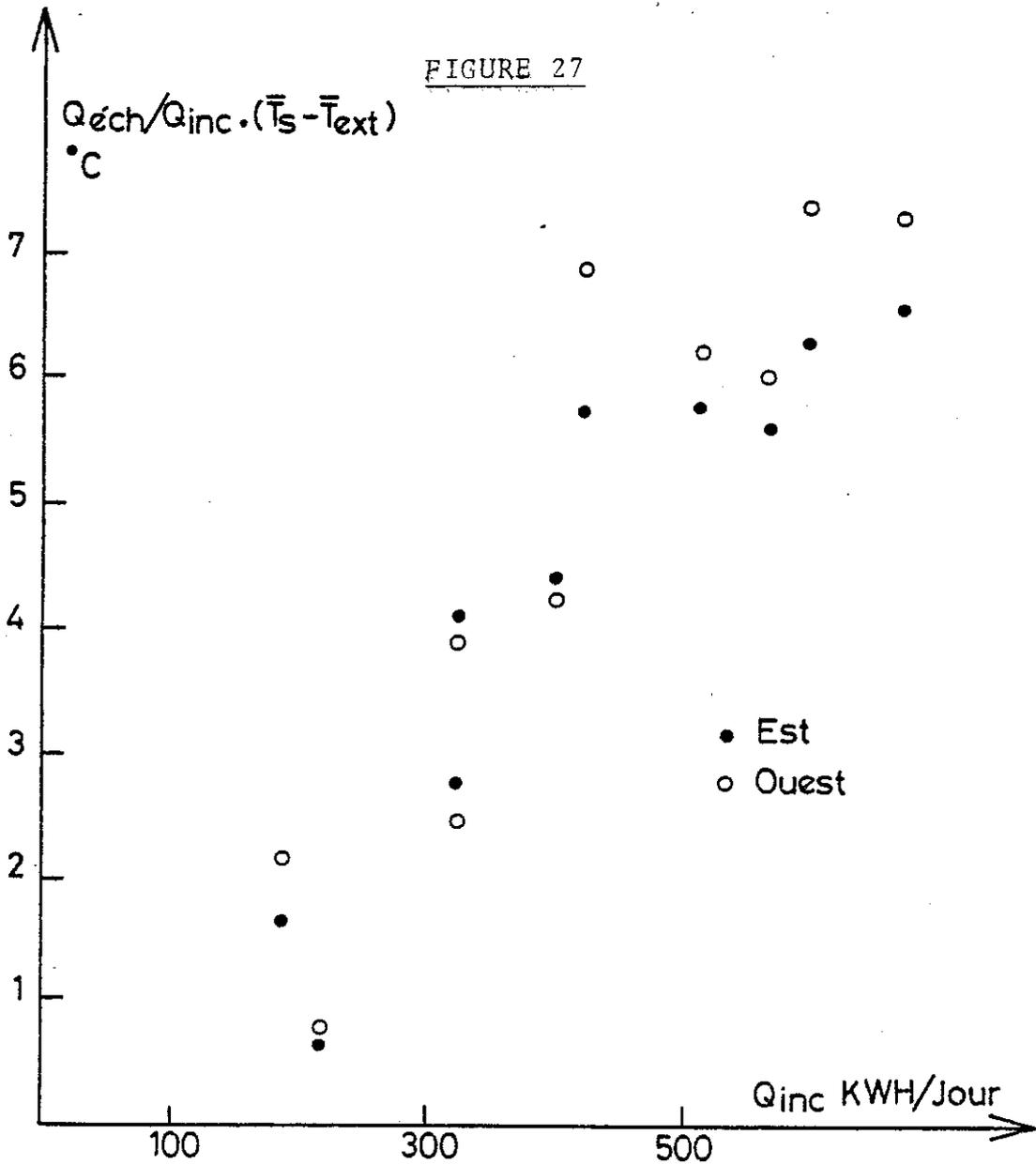


FIGURE 27

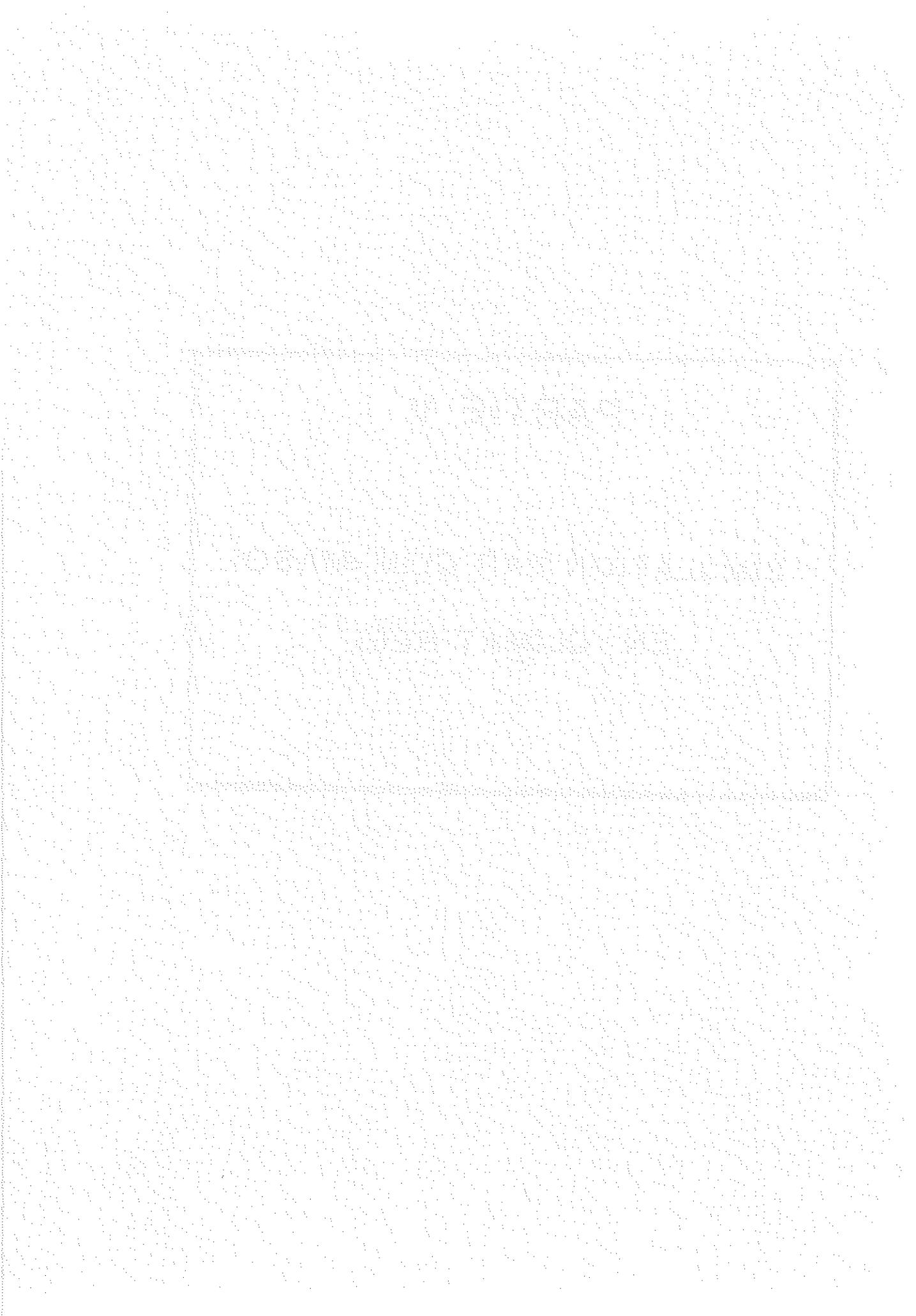




# PARTIE V

SIMULATION PAR CLIM+MASOL

EN CLIMAT REEL



Nous avons modifié le climat de référence de CLIM en insérant dans le climat-type de Lyon 45 jours de climat réel mesuré. L'entrée d'une météo dans CLIM n'était pas prévue par lecture directe des mesures. Il n'était pas question non plus de modifier moi-même le programme de gestion des fichiers météo de CLIM à cause des autres utilisateurs et de la complexité de la programmation (absence de version conversationnelle facilement utilisable à l'époque, nombreux sous-programmes imbriqués, initialisations ou modifications successives par instruction "COMMON", etc...). Nous avons donc ajouté un climat au fichier-source de météo de CLIM en utilisant des entrées simplifiées inspirées de celles des fichiers initiaux.

Nous analysons ici comment cette météo simplifiée reflète le climat mesuré. Nous voyons aussi comment nous avons amélioré la description thermique du local technique et nous comparons sa simulation par CLIM avec les mesures. Enfin, nous comparons, pour les 45 jours de climat réel, les bilans mesurés avec les résultats de la simulation par CLIM + MASOL.



## 5.1. ENTREE D'UN CLIMAT SIMPLIFIE DANS LE FICHIER METEO DE CLIM.

### COMPARAISON AVEC LE CLIMAT MESURE

Nous avons créé 45 cartes journalières comportant, outre la date, les températures extérieures minimale et maximale, la température de rosée et trois coefficients de clarté caractérisant le flux solaire direct horizontal. Nous avons contrôlé alors le climat réellement utilisé par CLIM (par le programme M2, heure par heure) pour le comparer aux mesures. L'humidité relative, déclarée constante sur la journée, est bien respectée conformément à la température de rosée entrée. Nous examinons en détail ci-dessous les autres éléments du climat.

#### 5.1.1. Les températures extérieures : le profil journalier simulé comparé au profil mesuré.

##### 5.1.1.1. Les entrées et le profil créé :

Le pas de temps du calcul étant la demi-heure, le programme CLIM s'impose une réduction de la taille des fichiers de données météo. Au lieu de 48 températures, il ne retient pour chaque jour que les températures extérieures  $T_{\text{minimale}}$  et  $T_{\text{maximale}}$ . On a vu (§ 3.1.2.) comment le sous-programme TEMEX recrée un profil journalier de températures à partir de  $T_{\text{min}}$  (affectée arbitrairement à 6 h),  $T_{\text{max}}$  (affectée à 15 h),  $T_{\text{max}}$  de la veille (à 15 h) et  $T_{\text{min}}$  du lendemain (à 6 h). Nous examinons ci-dessous quel est l'écart de ce profil théorique recréé avec le profil réel.

##### 5.1.1.2. Détail de quelques journées :

Pour septembre 1978, nous avons analysé en détail 6 jours de climat de types différents. Nous avons calculé les écarts des températures moyennes journalières et les degrés-heures de base  $16,8^{\circ}\text{C}$  (température de non-chauffage). On note les points suivants :

- les températures moyennes journalières sont très bien respectées : la différence simulée-mesurée va de  $-0,3^{\circ}\text{C}$  à  $+0,1^{\circ}\text{C}$ , avec une exception à  $-0,96^{\circ}\text{C}$  un jour très ensoleillé ;
- le profil réel semble bien suivi, aussi bien par bon ensoleillement que par temps couvert, et ceci même si l'amplitude  $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$  de la variation journalière est élevée (fig. 28 et 29 des 16 et 28 septembre) ;
- pour ces six jours, la somme des degrés-heures de base  $16,8^{\circ}\text{C}$  est 355 (simulé) contre 322 (mesuré), soit +10%.

Pour octobre 1978, nous avons retenu 12 jours qui ont des ensoleillements variés et qui sont très complets pour les mesures. Les écarts des températures moyennes journalières vont de  $-0,8^{\circ}\text{C}$  à  $+0,3^{\circ}\text{C}$ , avec une exception à  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Le suivi horaire des températures est encore bon. On constate parfois des distorsions en fin de journée dues au décalage horaire du minimum du lendemain matin (fig. 30 du 18/10, par exemple, parce que le minimum mesuré le 19 octobre était à 9 h). Pour ces 12 jours, les degrés-heures de base  $16,8^{\circ}\text{C}$  valent 1 477 (simulés) contre 1 404 (mesurés), soit +5 %.

Pour l'ensemble des 18 jours analysés (septembre et octobre), les degrés-heures simulés excèdent de 6 % les degrés-heures mesurés.

#### 5.1.1.3. En guise de conclusion :

Les écarts entre la simulation et les mesures pour les températures moyennes journalières restent faibles et sont du même ordre de grandeur que les différences que l'on obtiendrait probablement en déplaçant la station météo de la terrasse vers d'autres points de l'immeuble. A défaut d'autres mesures sur le site, nous avons comparé nos mesures de température extérieure avec les relevés des températures minimale et maximale de Bourgoin-ville (Météorologie Nationale), pour les jours analysés ci-dessus.

SIMULATION DETAILLEE D'UNE JOURNEE

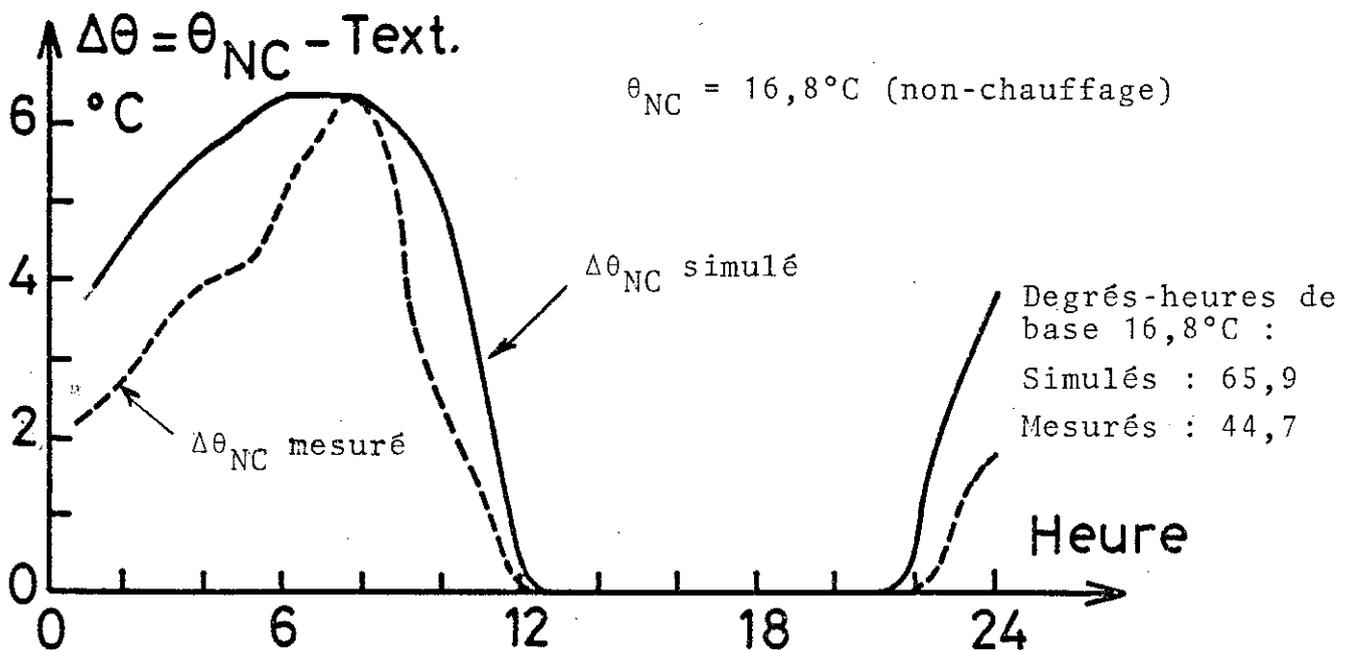
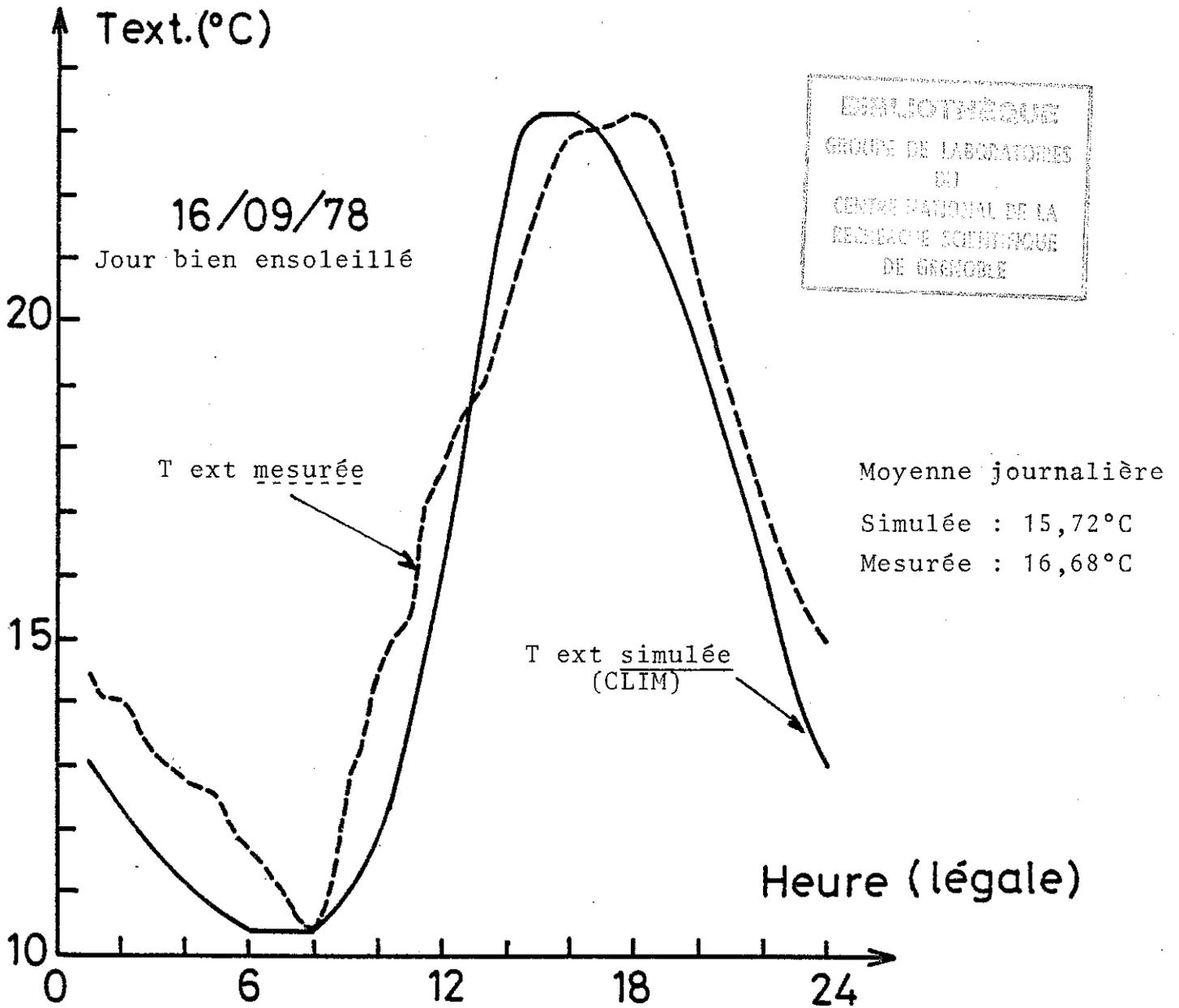
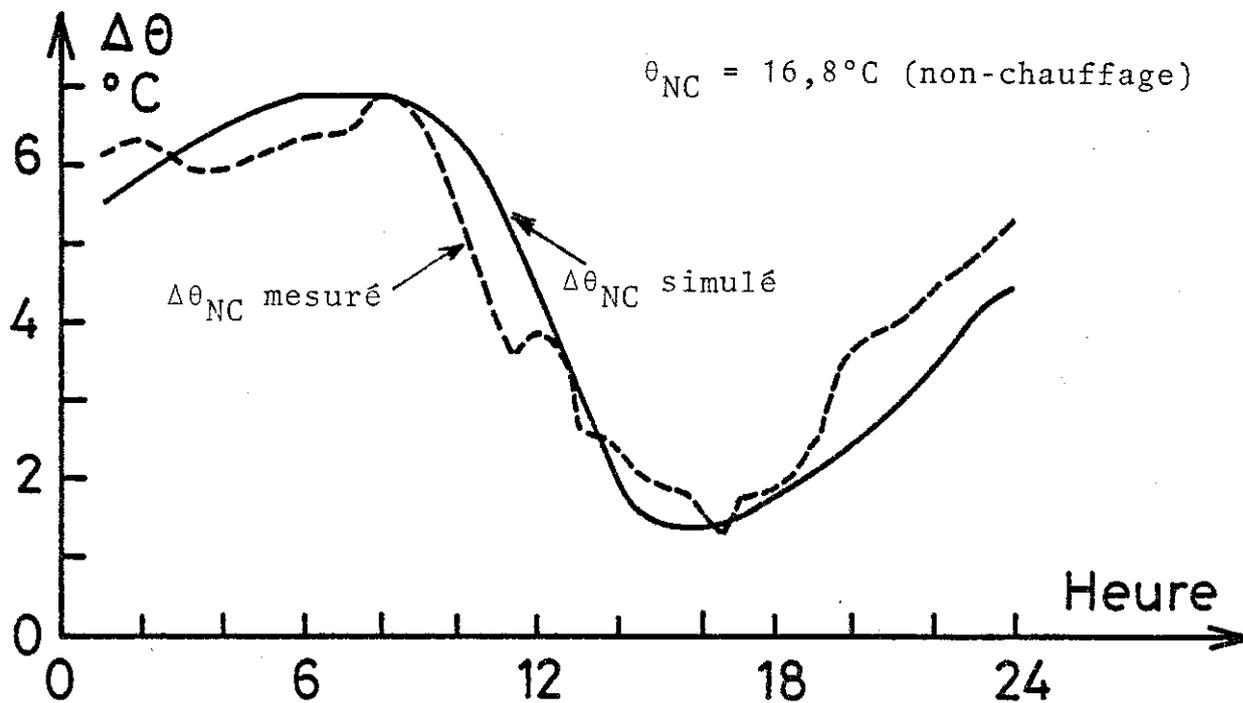
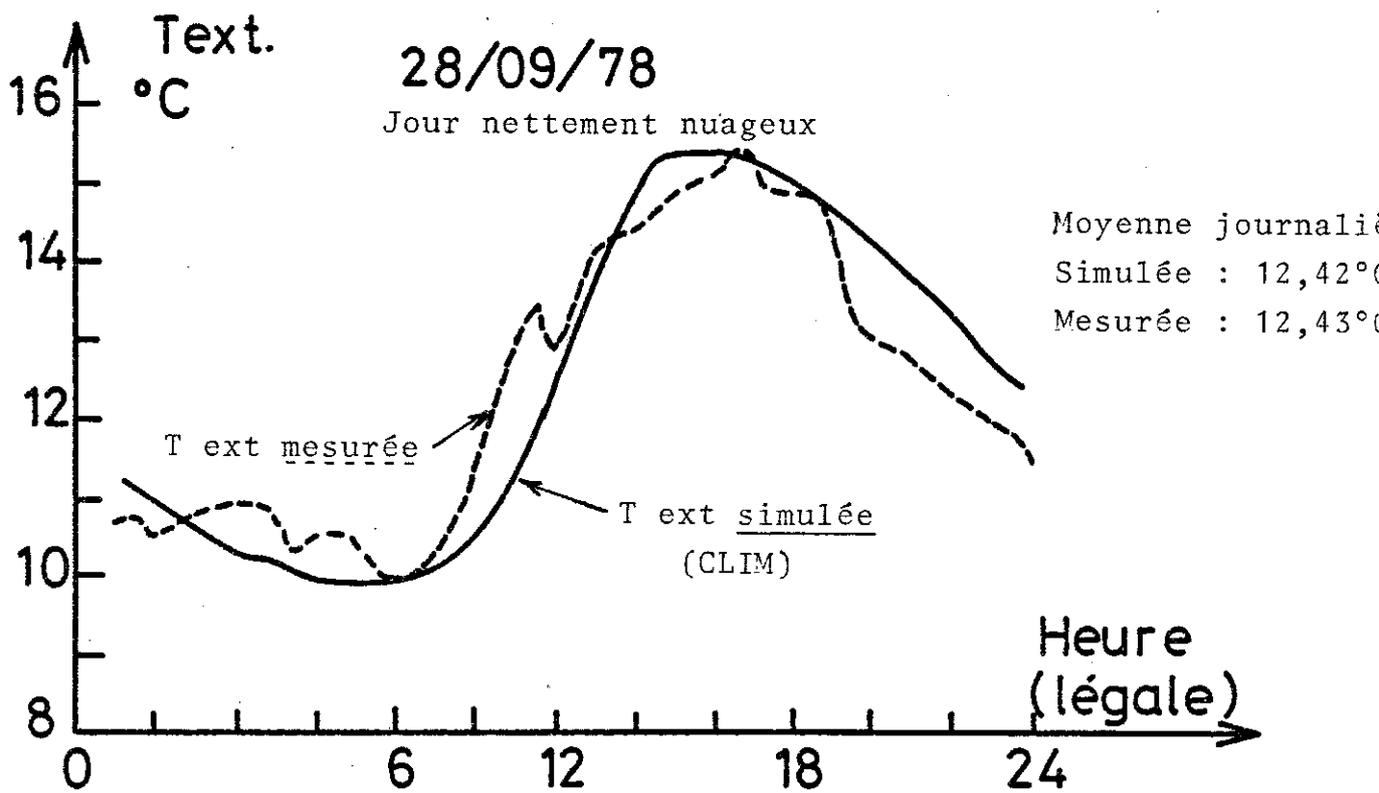


FIGURE 29  
SIMULATION DETAILLEE D'UNE JOURNEE



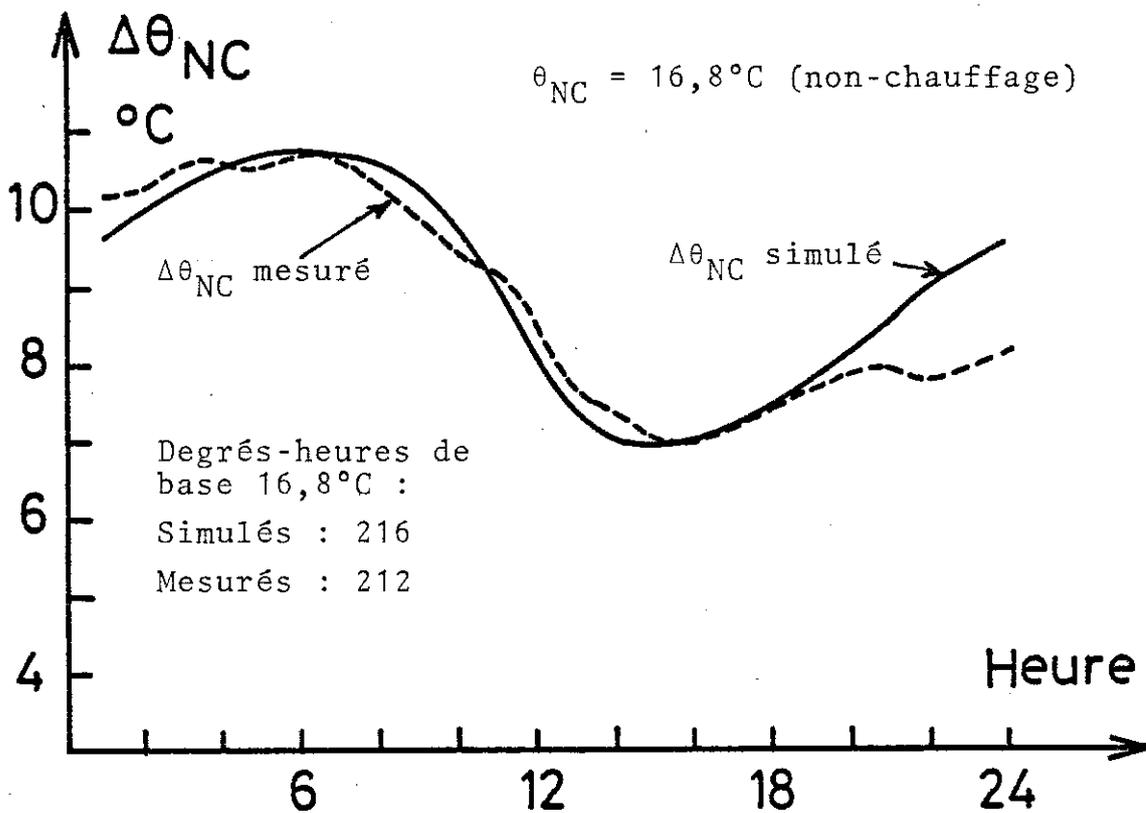
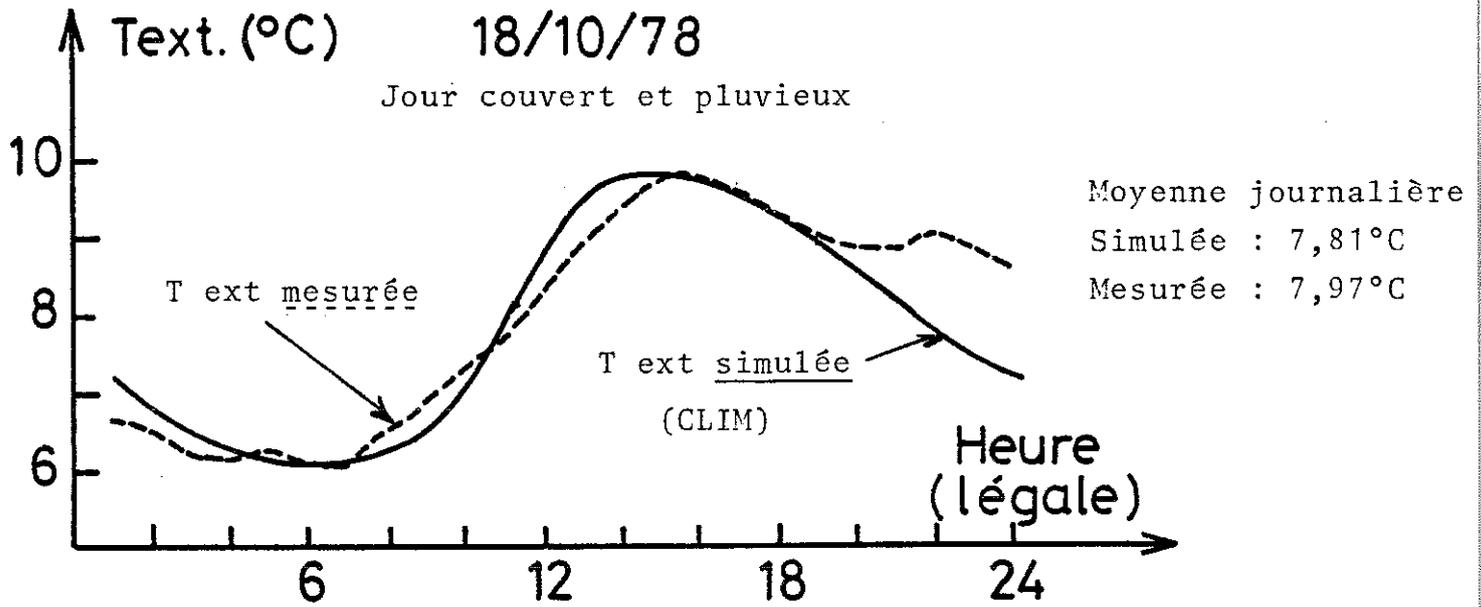
Degrés-heures de base  $16,8^{\circ}\text{C}$  :

Simulés : 105

Mesurés : 107

FIGURE 30

## SIMULATION DETAILLEE D'UNE JOURNEE



Les températures minimales, par exemple, diffèrent de  $-1,4^{\circ}\text{C}$  à  $+1,48^{\circ}\text{C}$  en septembre et de  $-2,3^{\circ}\text{C}$  à  $+1,97^{\circ}\text{C}$  en octobre, la différence moyenne étant  $0,13^{\circ}\text{C}$ .

Les degrés-jours de base  $16,8^{\circ}\text{C}$ , calculés avec  $\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2}$  chaque jour, pour les 17 jours sont 52,4 (Bourgoin-ville) et 53,5 (site), soit  $+ 2 \%$  sur le site. Les différences des températures moyennes journalières fluctuent de  $-1,14^{\circ}\text{C}$  à  $+1,14^{\circ}\text{C}$ .

Donc, vu le peu d'informations nécessaire à l'emploi de TEMEX, on constate que la simulation respecte bien les températures moyennes et les degrés-jours. Le suivi horaire n'est pas toujours parfait et les heures des minima et maxima ne sont évidemment pas respectées. Ces inconvénients semblent mineurs si l'on ne s'intéresse qu'aux besoins en chauffage.

#### 5.1.2. La simulation des flux solaires dans CLIM.

Le programme CLIM prend en compte les flux solaires par un mélange de calculs précis (cosmographiques) et d'approximations. Le flux direct était évalué en utilisant des données imprécises, souvent les seules disponibles à l'époque, concernant la couverture nuageuse. Le flux diffus et le flux réfléchi par le sol (albedo estimé à 0,2) sont évalués avec des hypothèses classiques [13, § 813/02 chap. II] .

##### 5.1.2.1. Le flux direct (horizontal) et le problème des entrées :

Le fichier météo initial de CLIM utilisait les nébulosités données par la Météorologie Nationale : chiffres en octas, de 0 (ciel très clair) à 8/8 (très couvert), donnés toutes les heures,  $n_1$  à 0 h T.U.,  $n_2$  à 3 h T.U., etc...,  $n_8$  à 21 h T.U. On n'en retenait que 3 clartés : de 0 h à 10 h T.U.,  $K_1 = \frac{8 - n_4}{8}$ , de 10 h à 15 h T.U.,

$$k_2 = \frac{8 - \frac{n_5 + n_6}{2}}{8} \quad \text{et de 15 h à 24 h T.U., } K_3 = \frac{8 - n_7}{8} .$$

Enfin le programme appliquait, sur ces trois plages horaires, trois coefficients multiplicatifs du flux direct maximal obtenus par la formule :

$C_i = \text{Inf} [aK_i + b, 1]$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Les paramètres  $a$  et  $b$  étaient alors

"adaptés" pour chaque ville pour que la somme des flux direct et diffus horizontaux sur l'année soit plausible... ou en accord avec d'éventuelles mesures ou approximations.

Nous disposons des octas à Lyon-Satolas et des mesures, à Bourgoin (terrasse), du flux direct horizontal, par différence du global et du diffus.

Pour chaque jour, nous avons calculé, selon une formule citée notamment par Chouard [6] , le flux direct horizontal théorique maximal :

$$I = I_0 CA \exp\left(-\frac{B}{\sin h}\right)$$

où  $I_0 = 1\,380 \text{ W/m}^2$  (constante solaire),

$C$  = coefficient de distance terre-soleil, variable avec le jour [6, § 1.2.3.] ,

$h$  = hauteur du soleil sur l'horizon.

Ce flux est maximal parce que nous adoptons pour les coefficients de trouble  $A$  et  $B$  des valeurs d'un ciel très clair selon Ch. Perrin de Brichambaut [35] :  $A = 0,86$  ;  $B = 0,20$ . Nous en avons alors déduit chaque jour les 3 coefficients  $C_i$  égaux à l'intégrale, sur les trois plages horaires, du flux direct (horizontal) mesuré divisée par l'intégrale du flux direct maximal théorique.

Nous n'avons entré, chaque jour, que ces trois coefficients pour caractériser l'ensoleillement. Nous comparons pour les 45 jours de climat réel les flux horizontaux direct et global simulé et mesuré, ainsi que les flux globaux verticaux restitués par CLIM et mesurés dans le plan des capteurs.

#### 5.1.2.2. Les flux solaires horizontaux : la simulation comparée aux mesures

En comparant les énergies journalières reçues par une surface horizontale, on trouve que la simulation du flux solaire direct horizontal est assez médiocre. Les écarts relatifs d'énergie journalière oscillent couramment de -10% à +15% en septembre, atteignent ponctuellement -26%,

+30% et même +42%, surtout lorsque l'énergie totale journalière est faible. En octobre, le flux simulé est assez régulièrement supérieur au flux mesuré, de 20 % en moyenne. Globalement, sur 44 jours retenus, le flux solaire direct horizontal donne une énergie de  $117,3 \text{ Kwh/m}^2$  (simulée) contre  $100,8 \text{ Kwh/m}^2$  (mesurée) soit un excès global de +16,3%.

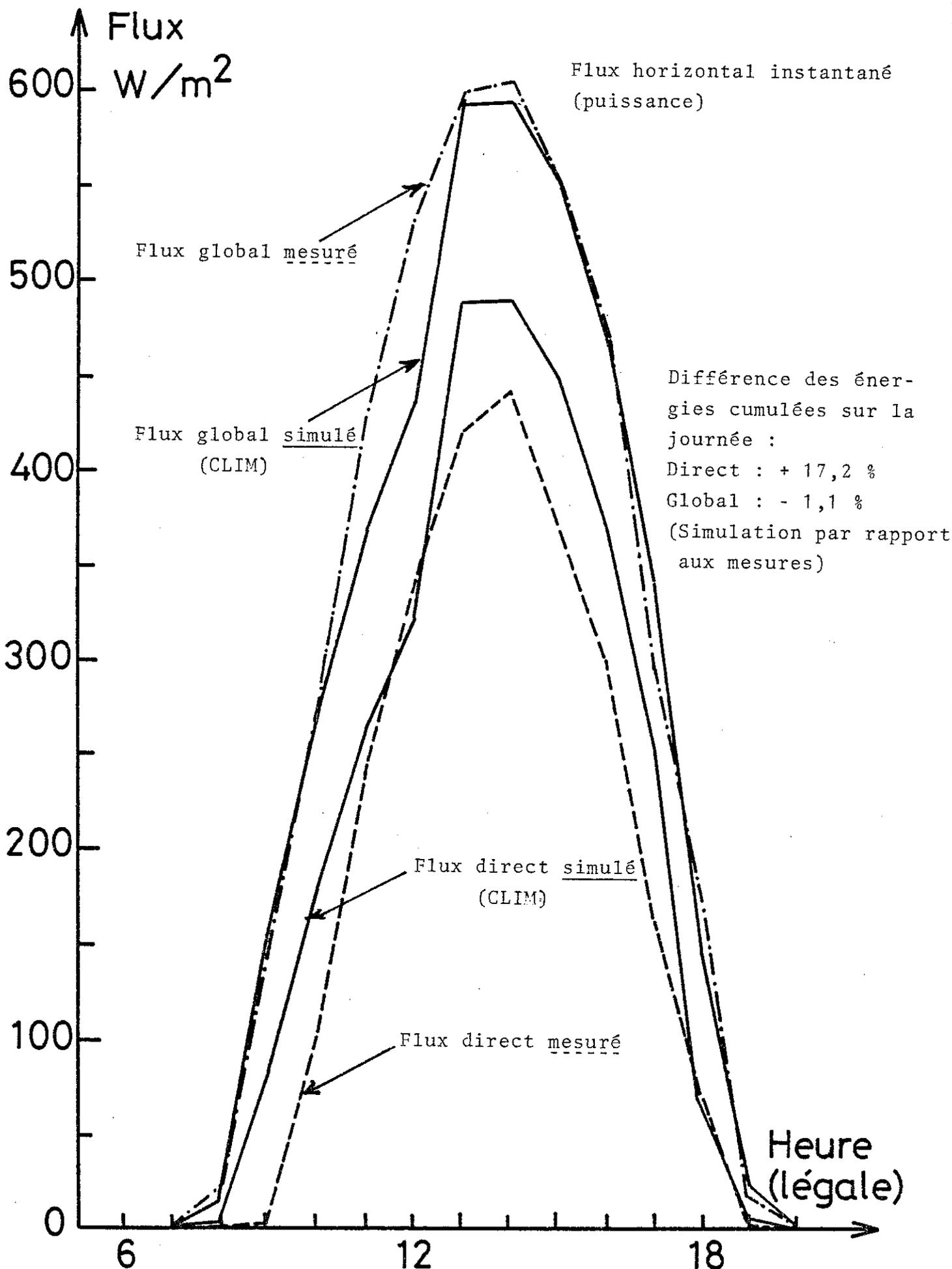
Le flux solaire global horizontal est obtenu pour CLIM en ajoutant au flux direct précédent un flux indirect (diffus + réfléchi), que l'on suppose réparti de façon symétrique sur chaque journée. Ce flux est calculé en fonction du direct instantané et de l'incidence [13, § 813/02, II.2]. Le flux global horizontal simulé reste pour plus de 40 % des jours dans la fourchette d'écart  $\pm 5 \%$  par rapport au mesuré, et pour plus de 90 % des cas à  $\pm 15 \%$ . Les écarts plus importants (18/9 :  $612 \text{ Kwh/m}^2$  et  $- 20 \%$  et 28/9 :  $1\ 088 \text{ Wh/m}^2$  et  $- 54 \%$ ) s'expliquent par la présence de brouillard, avec un flux diffus réel plus important en fait que le niveau régulier simulé. Ce flux global, évidemment mieux lié à l'énergie récupérable, semble donc nettement mieux simulé que le direct. A ce sujet, précisons que les mesures de diffus sont sujettes à caution, notamment lorsque le soleil est bas sur l'horizon [40]. De plus, les calculs de diffus sont discutables lorsqu'il y a des nuages [id., p. 60].

En examinant le découpage horaire de quelques journées (fig. 31 à 33), on peut noter les points suivants :

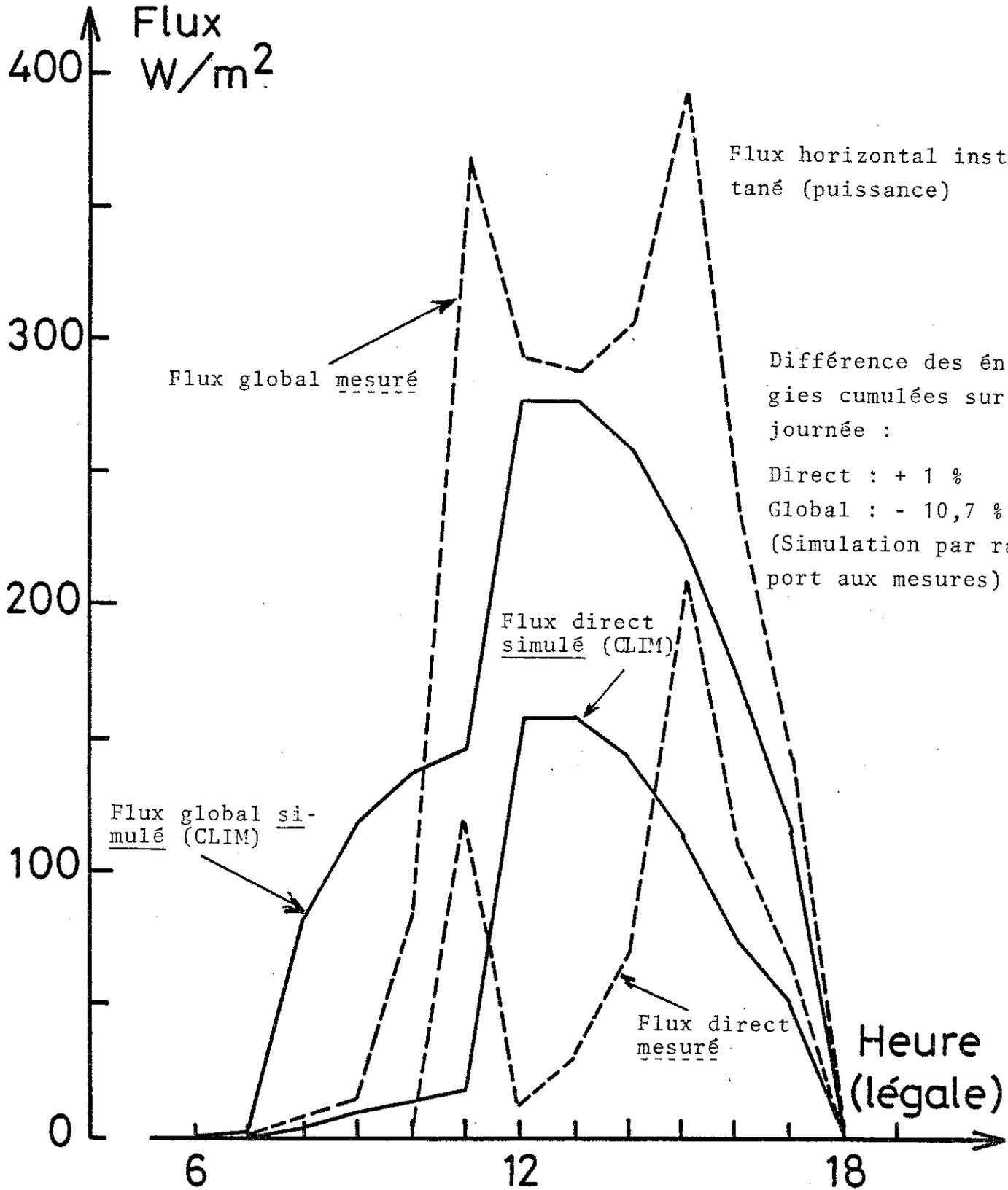
- le flux direct simulé est assez régulièrement au-dessus du direct mesuré;
- les 3 zones horaires homogènes imposées par cette simulation suivent évidemment assez mal les évolutions réelles brutales en cours de journée ;
- le suivi horaire du flux global est nettement amélioré et les discontinuités dues au découpage en 3 périodes s'estompent ici, et a fortiori pour les intégrations sur la journée.

Enfin, nous avons analysé en détail 27 jours (sur les 45) d'ensoleillements divers et nous avons représenté les énergies cumulées (en  $\text{Wh/m}^2$ ) pour les flux globaux horizontaux simulé et mesuré (fig. n° 34). On constate un suivi très correct.

DETAIL D'UNE JOURNEE : 26 SEPTEMBRE



DETAIL D'UNE JOURNEE : 4 OCTOBRE



DETAIL D'UNE JOURNEE : 10 OCTOBRE

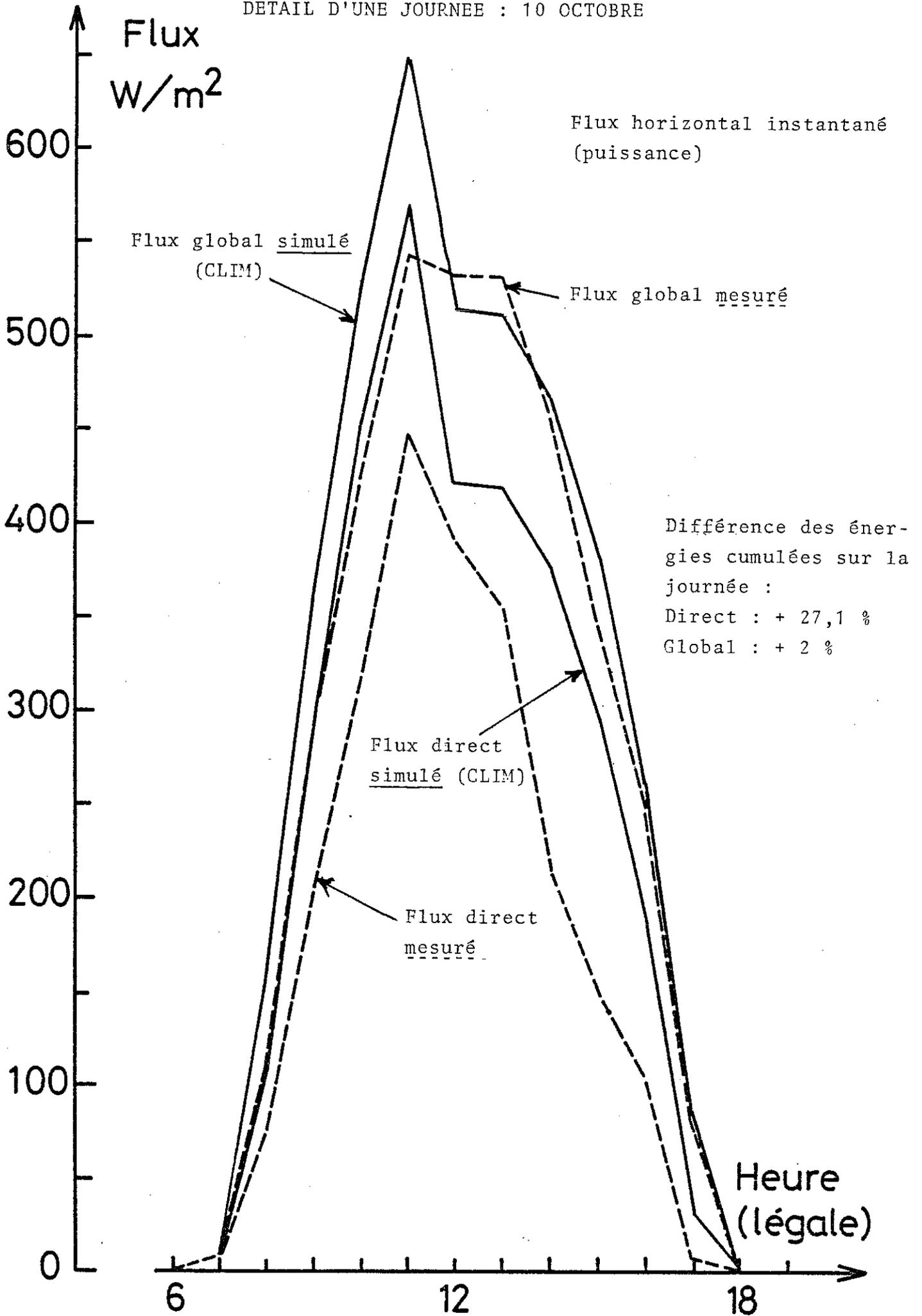
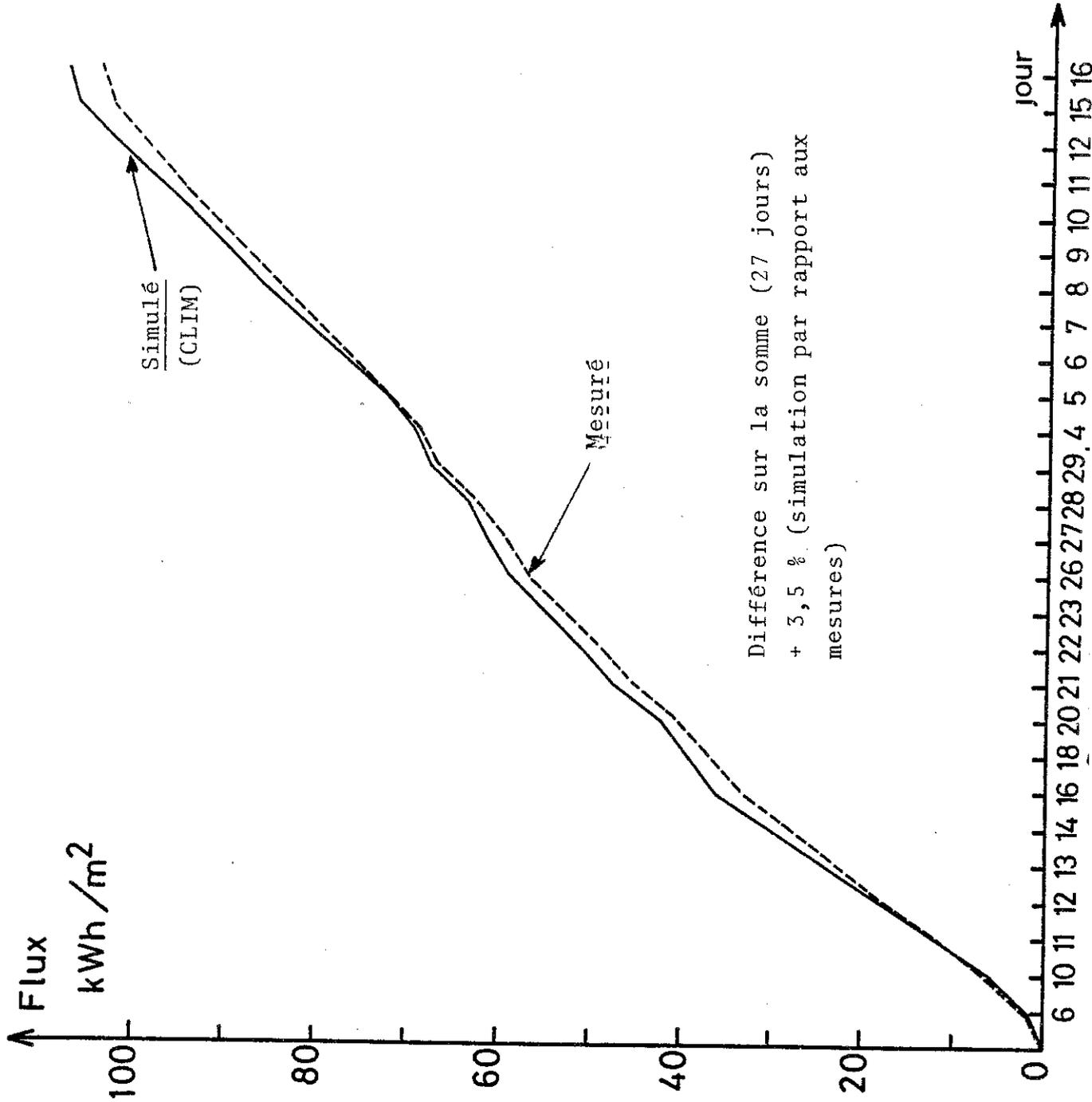


FIGURE 34  
FLUX GLOBAL HORIZONTAL CUMULE



### 5.1.2.3. Le flux solaire global vertical Sud :

Nous analysons le flux global vertical calculé par CLIM au niveau de la paroi Sud, et utilisé notamment par MASOL sur les capteurs, la simulation étant toujours faite avec les entrées concernant le flux direct horizontal (§ 5.1.2.1.).

. Les suivis horaires sont très corrects pour les belles journées régulières (par exemple, fig. 36). Par contre, pour un jour dans l'ensemble couvert et pluvieux (fig. 35), les écarts horaires peuvent être importants et le maximum simulé est surestimé de 30 % environ. Pour le 10 octobre, jour de bon ensoleillement mais avec un passage nuageux en milieu de journée, on peut comparer les simulations du global horizontal (fig. 33) et du global vertical (fig. 37) : dans l'ensemble, le suivi horaire est meilleur pour le vertical. Entre 10 h et 15 h, on voit que le diffus horizontal simulé compense bien l'erreur du flux direct simulé. Pour le flux vertical, le passage nuageux reste mal pris en compte.

. Pour les intégrales journalières, on constate, pour le flux global vertical, que les énergies mesurées sont souvent légèrement supérieures aux énergies simulées. Pour 17 jours, contrôlés heure par heure, les écarts journaliers vont de  $-0,59 \text{ Kwh/m}^2$  à  $+0,45 \text{ Kwh/m}^2$ , mais la différence moyenne est de  $0,154 \text{ Kwh/m}^2$  et la différence des énergies cumulées est  $2,61 \text{ Kwh/m}^2$  seulement (soit 3,3 %).

. Pour 32 jours, nous avons représenté les énergies cumulées dues au flux solaire global vertical (fig. 38). On constate que le suivi est très bon. Globalement, pour ces 32 jours, la différence des énergies cumulées, mesurée-simulée, est  $2,01 \text{ Kwh/m}^2$ , soit +1,2% environ.

. Pour une suite de 21 jours d'ensoleillement divers, nous avons représenté les rapports  $Y = \frac{\text{Energie du global horizontal mesurée}}{\text{Energie du global horizontal simulée}}$  et

$Z = \frac{\text{Energie du global vertical mesurée}}{\text{Energie du global vertical simulée}}$  (fig. 39). Pour les 4 jours de mauvais temps, on note :  $Z < Y$  et  $Y > 1$ . Par contre pour les journées ensoleillées, on a toujours :  $Z > Y$ , et plus fréquemment  $Z$  voisin de 1. Donc, par ciel très couvert, il semblerait que le flux diffus vertical simulé soit surévalué. Par contre par beau temps, et comme nous l'avons

FIGURE 35  
 DETAIL D'UNE JOURNEE : 9 SEPTEMBRE

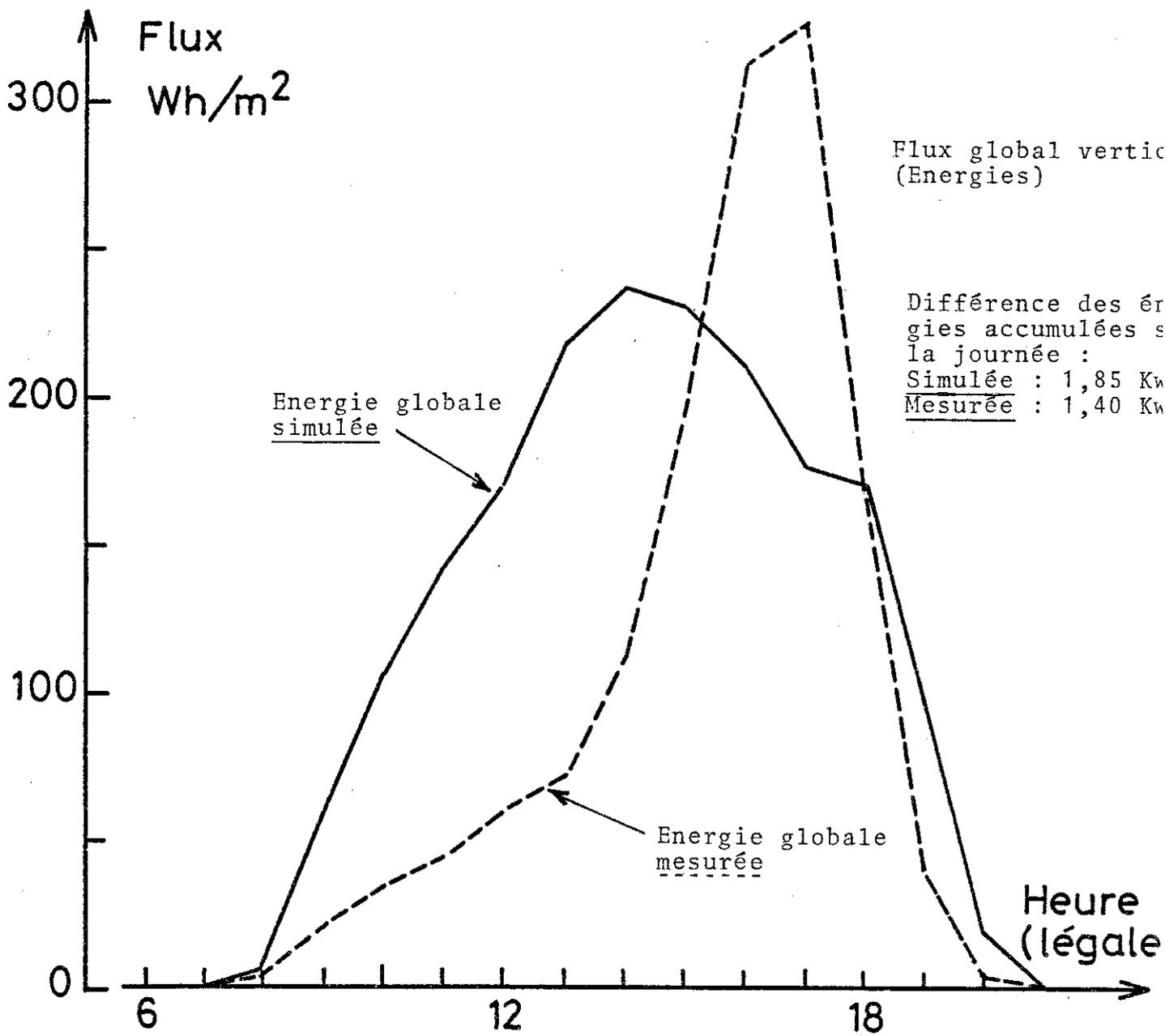


FIGURE 36

DETAIL D'UNE JOURNEE : 13 OCTOBRE

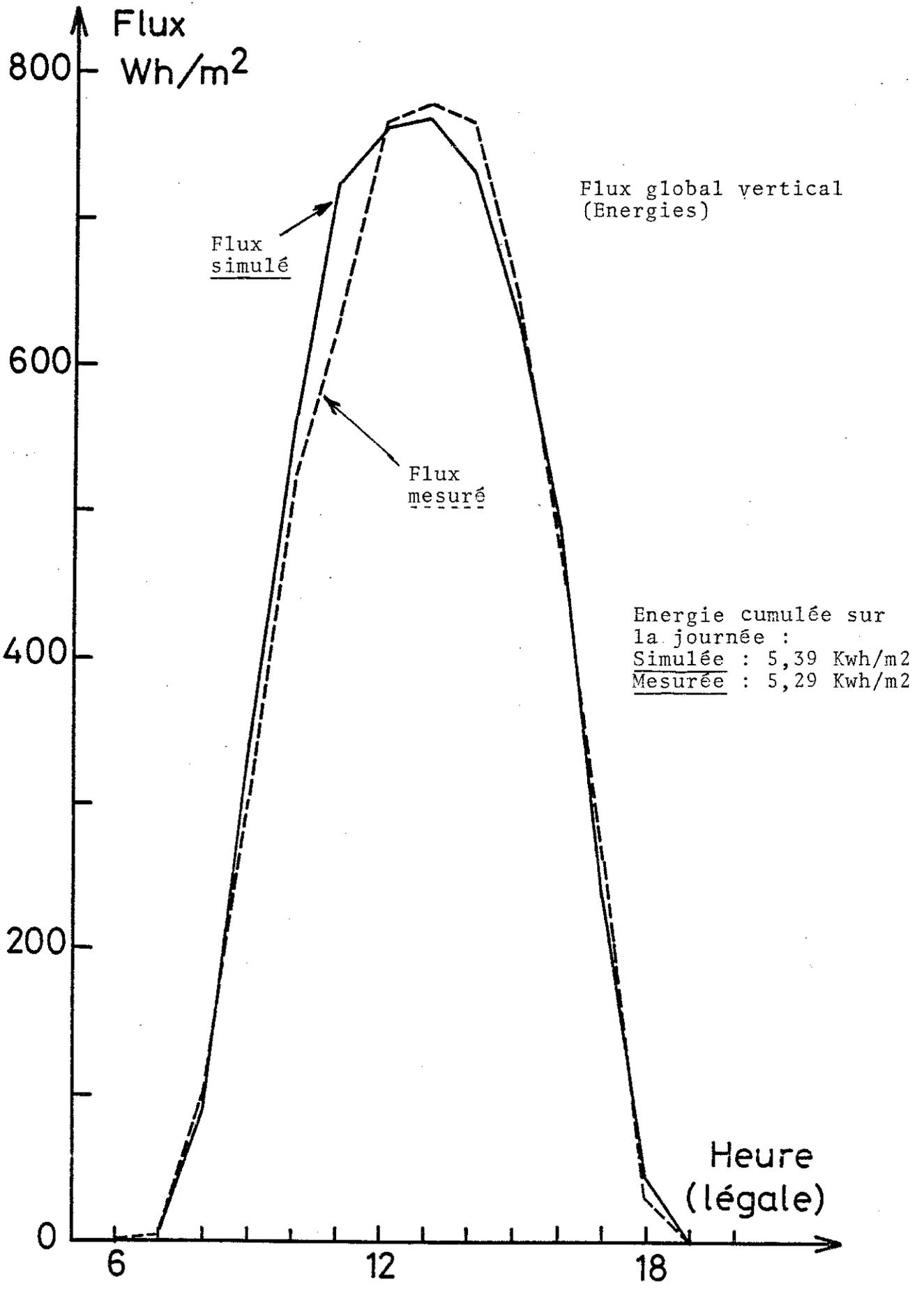


FIGURE 37

DETAIL D'UNE JOURNEE : 10 OCTOBRE

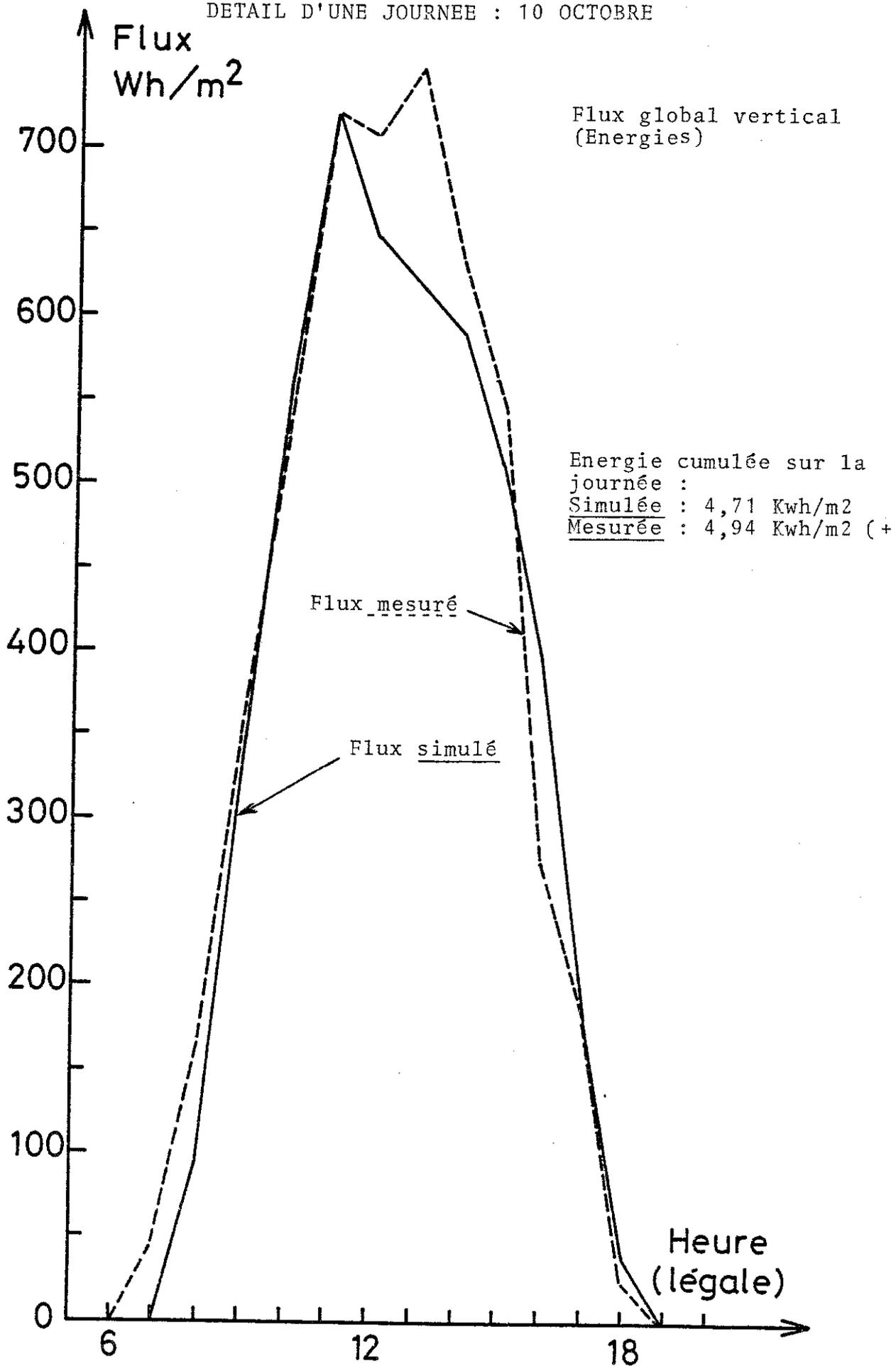


FIGURE 38

## FLUX GLOBAL VERTICAL (SUD) CUMULE

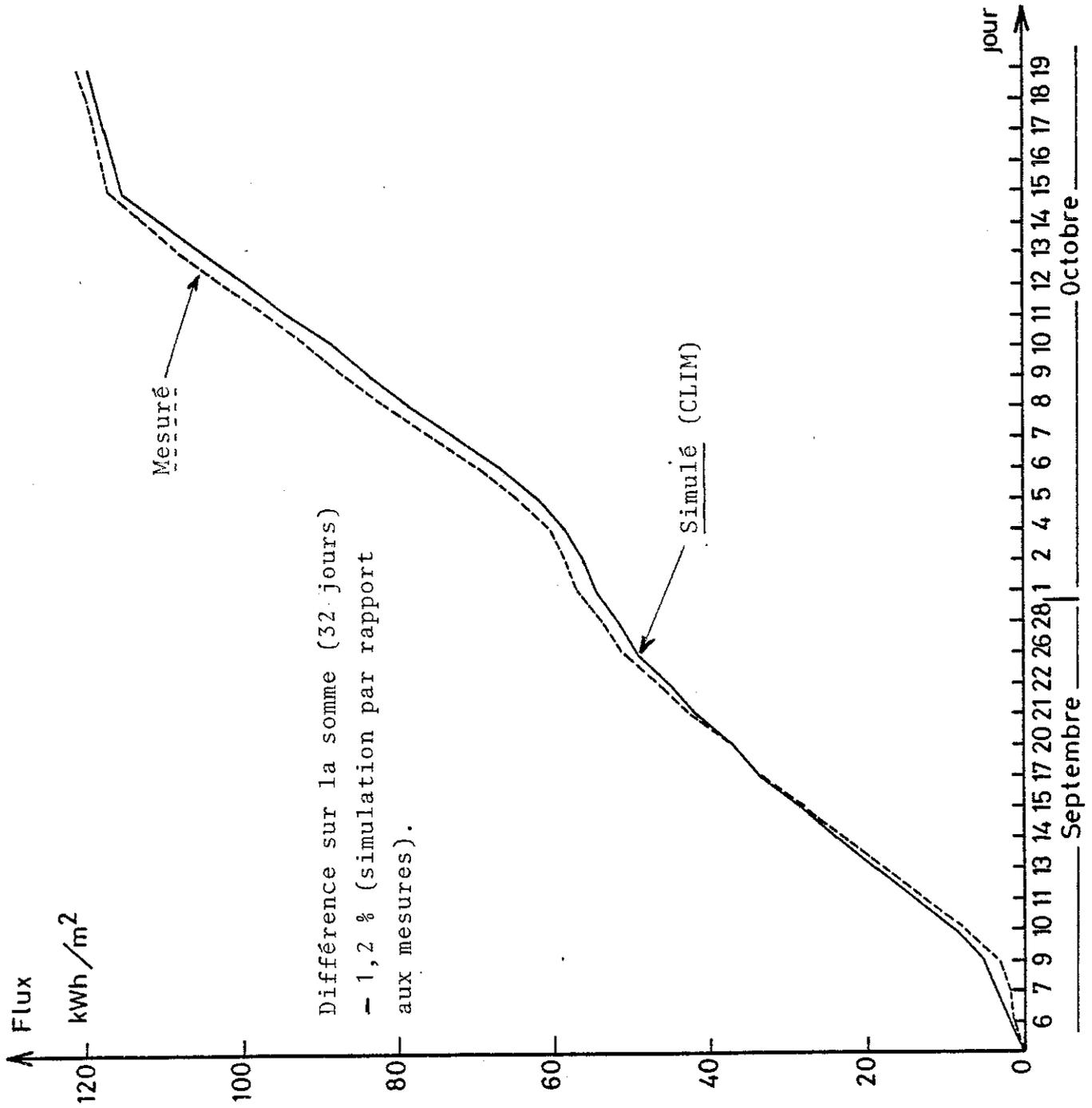
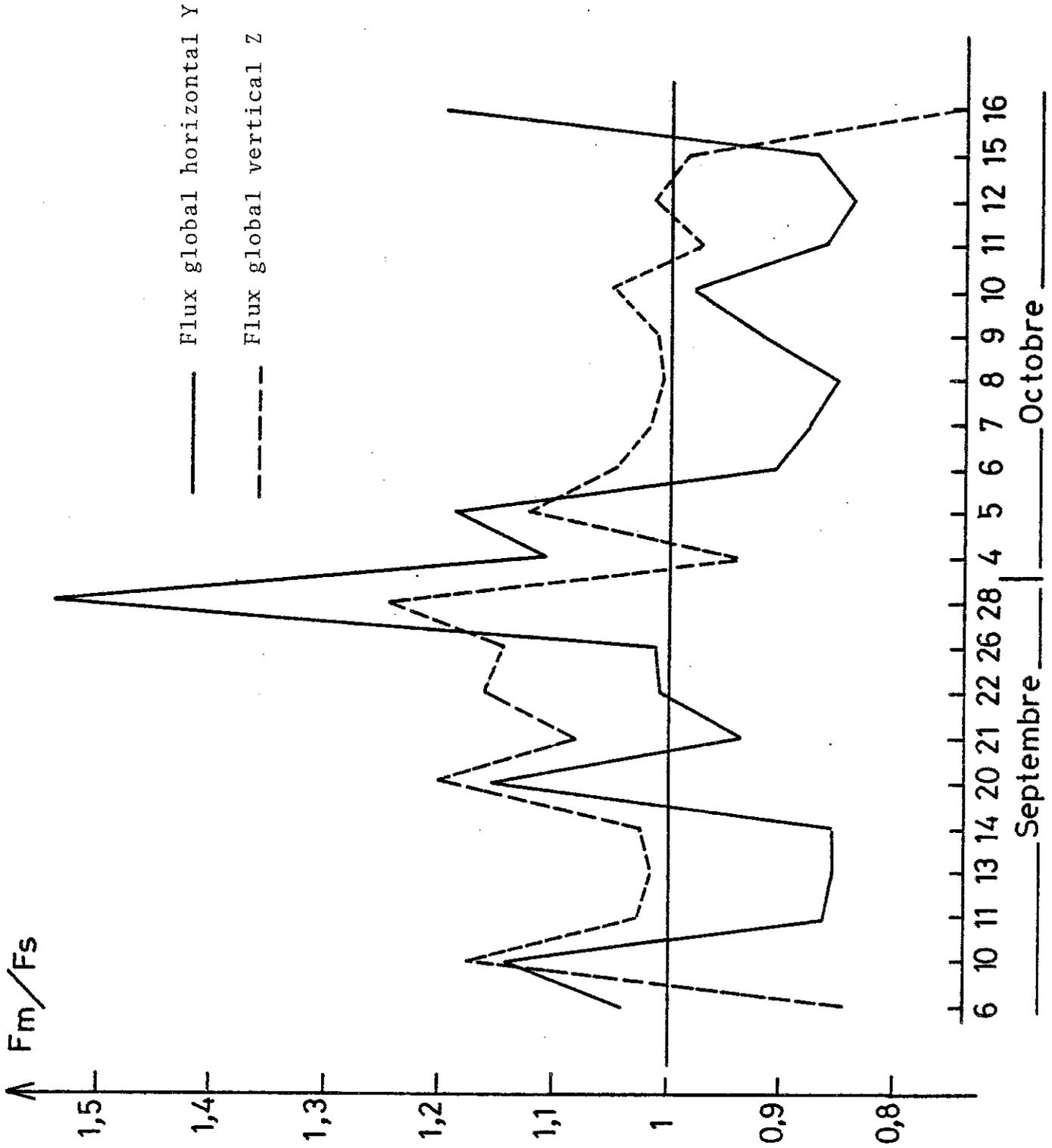


FIGURE 39

RAPPORT FLUX MESURE  
FLUX SIMULE  
(Energies)



vu en 5.1.2.2., le flux direct horizontal simulé est supérieur au mesuré, d'où plus fréquemment  $Y < 1 < Z$ . Pour les jours bien ensoleillés, on voit aussi que le flux vertical est bien simulé. C'est ce flux qui nous importe puisqu'il est pris en compte pour l'énergie incidente sur les capteurs. Pour les jours très couverts, la mauvaise simulation de ce flux est sans conséquence, et l'on a vérifié que l'énergie captée est effectivement nulle ou très faible.

#### 5.1.2.4. Conclusion sur la simulation des flux solaires :

Nous avons opté pour une entrée simplifiée de 3 paramètres journaliers déduits des mesures caractérisant le flux solaire direct horizontal (§ 5.1.2.1.). Cette entrée est plus élaborée que celle qui a permis initialement de calculer les climats-types de CLIM, laquelle reposait sur les nébulosités.

Au niveau journalier, après analyse des différents flux, on voit que les distorsions entre ensoleillements réel et simulé peuvent être assez importantes (de 0 à 20 %, en énergie), et le seraient peut-être plus au niveau des parts des flux direct et indirect. Par contre, il apparaît que les énergies solaires globales sont simulées à moins de 5 % près si l'on se réfère à des périodes d'au moins quelques jours.

Pour notre simulation, l'écart sur l'énergie verticale cumulée peut certainement être négligé devant les autres sources d'erreur.



## 5.2 VALIDATION DES CALCULS ANNEXES DE BILAN THERMIQUE DU LOCAL TECHNIQUE (sous-station) : SA PREVISION FACE AUX MESURES

La première simulation évaluait une puissance correspondant à une approximation des éléments chauds contenus dans la sous-station pour l'intégrer dans CLIM en tant qu'apport interne moyen dans le module TE (ou TW) décrivant ce local (§ 4.1.1., pp.34 à 36).

Ici, nous précisons comment nous avons affiné les hypothèses initiales par une analyse détaillée des circuits, selon la configuration solaire retenue. Ceci a nécessité la mise au point d'un programme auxiliaire permettant de calculer le bilan thermique du local, en moyennant sur le mois, mais avec itération sur les principales températures inconnues (par exemple celle du module  $T_4$  sus-jacent, celle du stockage selon le nombre de citernes, etc...). Cette étude a permis ensuite de mieux décrire, dans MASOL, le stockage d'énergie et ses déperditions selon la configuration solaire choisie.

### 5.2.1. Analyse complète de la sous-station.

Nous avons constaté des écarts importants entre les maxima et minima des températures de stockage mesurés et ceux initialement prévus par le programme manuel (§ 4.3.2.1.) ou par CLIM + MASOL (§ 4.5.3.). Nous avons donc revu la description initiale du stockage équivalent (§ 4.3.1., début) et des déperditions des divers éléments internes au local technique.

Pour cela, nous avons d'abord analysé tous les circuits d'eau, ballons ou réservoirs dans leur partie interne à ce local. Nous les répartissons en deux groupes :

- circuits et ballons ne participant pas au stockage d'énergie proprement dit (de MASOL) mais susceptibles de déperditions dans le local :
  - circuit primaire - échangeur - circuit secondaire commun à tous les cas de stockage et partie ajoutée selon le cas choisi - circuits E.C.S. dans leur partie électrique et ballons associés ;

- circuits et réservoirs participant au stockage solaire (cuve équivalente de MASOL) par leur volume d'eau et leurs déperditions :
  - citerne(s) de stockage ou ballon d'équilibrage, selon le cas choisi
  - circuit tertiaire vers le réchauffeur solaire E.C.S., ballon solaire E.C.S. et circuit afférent - circuit tertiaire vers les planchers chauffants, selon l'option choisie pour le stockage et selon sa température, pendant les mois de chauffage évidemment.

Nous avons recensé pour tous les tuyaux : le type et le calorifugeage (11 cas), les longueurs concernées selon le cas de stockage et la saison, les organes accessoires susceptibles de déperditions thermiques tels que vannes (7 types), supports et brides, purges, diaphragmes, etc... Nous avons également calculé dans chaque cas, par mètre linéique, la surface de déperdition (en  $m^2/m$ ), le volume en eau incluant l'équivalent en eau de l'acier lorsque le tuyau fait partie du stockage (en l/m). Pour les déperditions, nous décomptons tous les accessoires précédents en longueur équivalente du tuyau correspondant, selon une méthode classique du COSTIC [28, 6.X p. 346] . Lorsque ces annexes sont liées au stockage, nous incluons l'équivalent en eau de leur poids. Nous procédons à la même analyse pour tous les réservoirs, ballons et leurs annexes.

Nous recensons aussi, selon l'option solaire retenue, tous les appareils susceptibles d'apporter de la chaleur sensible au local : pompes, échangeurs, etc... Dans le programme, nous avons d'ailleurs introduit des chroniques pour les temps de fonctionnement des circuits non permanents.

#### 5.2.2. Le programme auxiliaire de calcul du stockage et du bilan thermique du local technique.

Le nombre important de paramètres qui varient avec la température et selon le cas de stockage choisi, et la nécessité d'approcher le bilan thermique du local par itération nous imposaient une résolution informatisée. Nous l'avons réalisée sur un assembleur Hewlett-Packard (HP 9810 A). Un premier programme permettait de déterminer les

coefficients de déperdition linéiques (W/m.K) des divers tuyaux et surfaciques (W/m<sup>2</sup>.K) des divers réservoirs selon des abaques classiques [28, p. 341 à 344] . Une interpolation linéaire était nécessaire mois par mois puisque ces coefficients (31 par mois) dépendent du  $\Delta\theta$  moyen. On entre donc ici, chaque mois, une température du local et une du stockage, donc un  $\Delta\theta$  moyen, températures que l'on s'impose de retrouver après itération(s) à l'issue du bilan thermique du local.

Le 2ème programme consiste précisément à calculer mois par mois le bilan thermique du local : on égale les déperditions par les parois extérieures et par renouvellement d'air (selon D.T.U.) à tous les apports, par les locaux adjacents (escalier, T4 sus-jacent), par les pompes et l'échangeur, par les pertes des réservoirs et des tuyaux dans leur partie interne à ce local. On entre chaque mois la température moyenne extérieure à Bourgoin [14] , la température du logement sus-jacent (T41E), les températures du stockage, des capteurs, de la distribution d'énergie, du local (pour les  $\Delta\theta$ ). Toutes ces températures inconnues étaient, au premier passage, estimées d'après leur niveau dans le premier CLIM (sur météo LYON) et les premiers MASOL associés aux variations des paramètres solaires (§ 4.5.).

Pour toutes les pompes, nous considérons que la puissance évacuée dans le local est :  $S = \frac{1}{2}(P - q_v \Delta p)$ , où  $P$  = puissance nominale ;  $q_v$  et  $\Delta p$  = débit volumique et surpression de fonctionnement. De plus, on affecte à tous les circuits non permanents un temps de fonctionnement mensuel moyen :

- circuit primaire : nombre d'heures de jour du mois ;
- circuit secondaire : si  $T_{\text{capt}} \geq T_{\text{stock}}$ , et selon le nombre d'heures d'insolation moyenne (cf. 4.3.2.2.), recalé pour la somme annuelle sur le temps de fonctionnement annuel donné par MASOL pour la pompe de charge du stockage, selon l'option choisie (calculs prévisionnels) ;
- circuit tertiaire des dalles chauffantes : temps de fonctionnement annuel donné par MASOL pour la pompe de circulation, réparti en moyennes mensuelles d'après les besoins de chauffage.

L'échangeur principal, rattaché au secondaire, est décompté comme un ballon de 100 litres, avec des déperditions à travers son enceinte ( $K = 2,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Le ballon de préchauffage solaire F.C.S. est déclaré, en moyenne, à la température du stockage.

La température moyenne de l'escalier est calculée comme intermédiaire entre  $T_i$  (température des locaux chauffés) et  $T_{\text{ext}}$  (extérieure) par  $T_{\text{esc}} = 0,314 T_{\text{ext}} + 0,686 T_i$ , d'après  $\epsilon = \frac{T_i - T_{\text{esc}}}{T_i - T_{\text{ext}}}$ , évalué à 0,314 [21, p. 25 § 2.3.4.b.] .

Enfin, selon les configurations choisies, on a décompté les éléments immédiatement contigus, mais non sollicités par l'écoulement, comme participant aux déperditions pour le tiers des longueurs ou des volumes adjacents.

Le programme restitue chaque mois la température moyenne calculée du local, la puissance moyenne correspondant à ses apports internes, le coefficient surfacique de déperdition moyenne de la cuve équivalente au stockage de MASOL (§ 4.1.2.b.). On a aussi le total annuel des déperditions du stockage.

Ainsi, pour l'option "3 citernes", on a retenu dans CLIM une puissance interne au local avec 2 niveaux : jour (7 h à 20 h), 2800 W et nuit (11 h restantes), 3000 W. On diminue légèrement cette puissance le jour pour traduire l'ouverture des portes, en respectant l'intégrale moyenne des déperditions journalières (2892 W). Pour MASOL, la déperdition de l'ensemble des éléments participant au stockage d'énergie se traduit l'été par 181 W/K (la moyenne du local étant 32°C) et en saison de chauffage par 168 W/K (local à 20,3°C en moyenne).

Ces valeurs sont comparables aux pertes mesurées depuis, en saison de chauffage : de l'ordre de 30 W/K par citerne de stockage et de 60 à 80 W/K pour le circuit tertiaire associé.

### 5.2.3. La simulation du local technique (module TE) et son comportement en climat réel.

Nous pouvons suivre l'évolution horaire de la température intérieure du module TE décrit dans CLIM sur le climat réel les 1er et 15 octobre (fig. 40 et 41). Nous indiquons pour référence la température du garage GE contigu, sans isolation, évidemment calculé sans apport interne. La consigne intérieure des modules chauffés adjacents (T41E pour TE et T51E pour GE) est ici 20°C. Mais, sur une version à 21°C, toutes choses égales d'ailleurs, les différences de la température interne (moyenne journalière) de TE restent inférieures à 0,01°C le 1er octobre et à 0,06°C le 15 octobre. Pour les deux jours, on remarque que la puissance, simulée en continu, ne reflète pas les écarts brutaux. Par contre les moyennes journalières sont bien respectées, l'écart quadratique moyen de la différence ( $T_{sim} - T_{mes}$ ) restant de l'ordre du degré. Elles diffèrent nettement des moyennes journalières simulées avec le climat-type de Lyon : 27,87°C le 1er octobre (contre 24,08°C) et 27,94°C le 15 octobre (contre 25,35°C).

Nous comparons aussi les températures moyennes mensuelles des modules TE et GE. En septembre : pour TE la moyenne simulée sur climat-type Lyon est 28,5°C ; la moyenne simulée sur climat réel 78 est : 27,0°C et mesurée: 27,09°C. Pour GE, la moyenne simulée sur climat réel est : 18,0°C. En octobre : pour TE la moyenne simulée sur climat-type Lyon est 26,2°C ; la moyenne simulée sur climat réel 78 est : 23,2°C et mesurée : 23,03°C ; celle de GE simulée sur climat réel 78 est : 14,1°C.

L'ensemble de ces résultats semble donc justifier la puissance équivalente aux déperditions des divers éléments internes au local technique, si l'on en juge du moins par l'évolution de la température ambiante moyenne de ce module.

DETAIL D'UNE JOURNEE : 1er OCTOBRE 1978

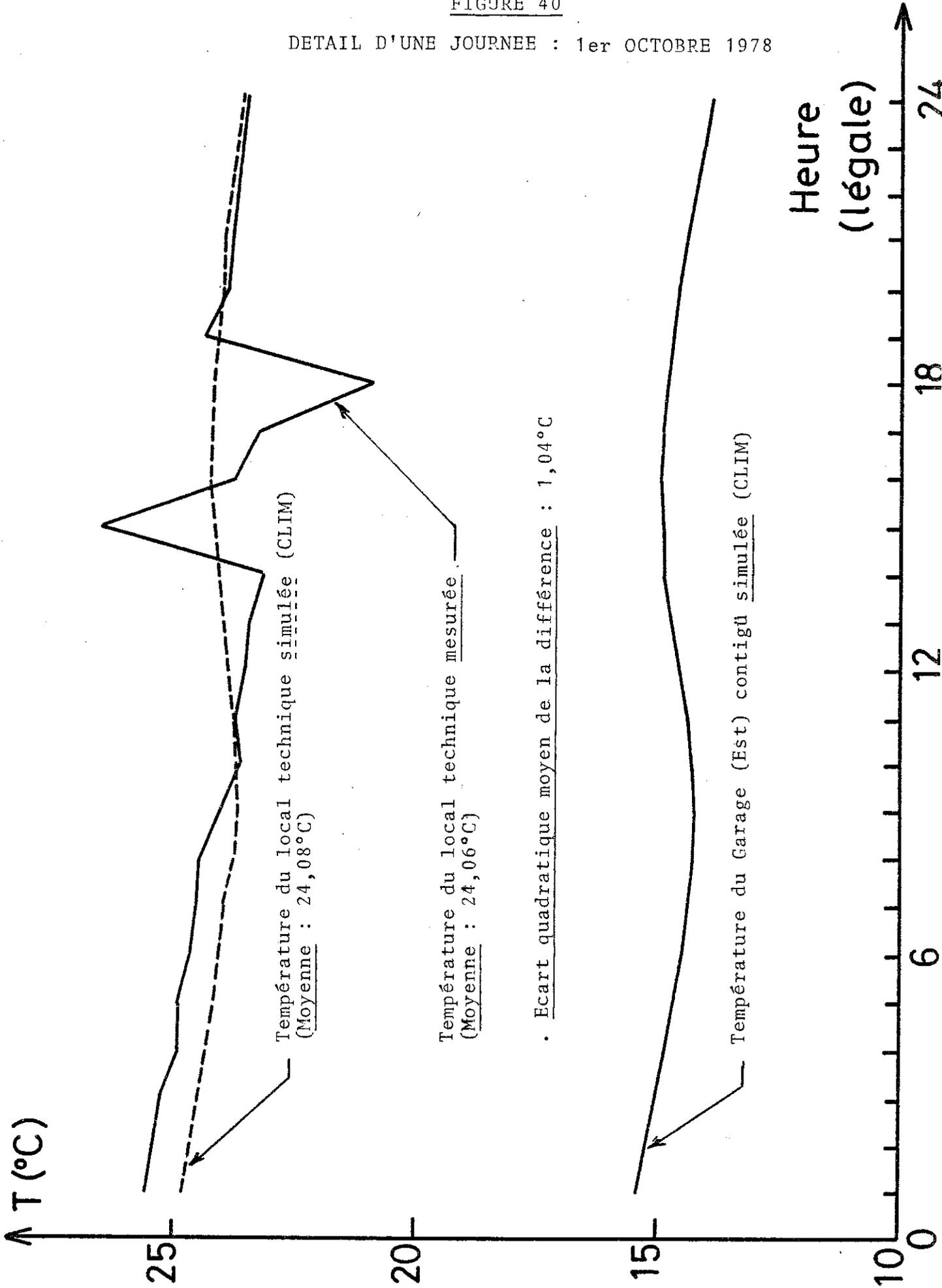
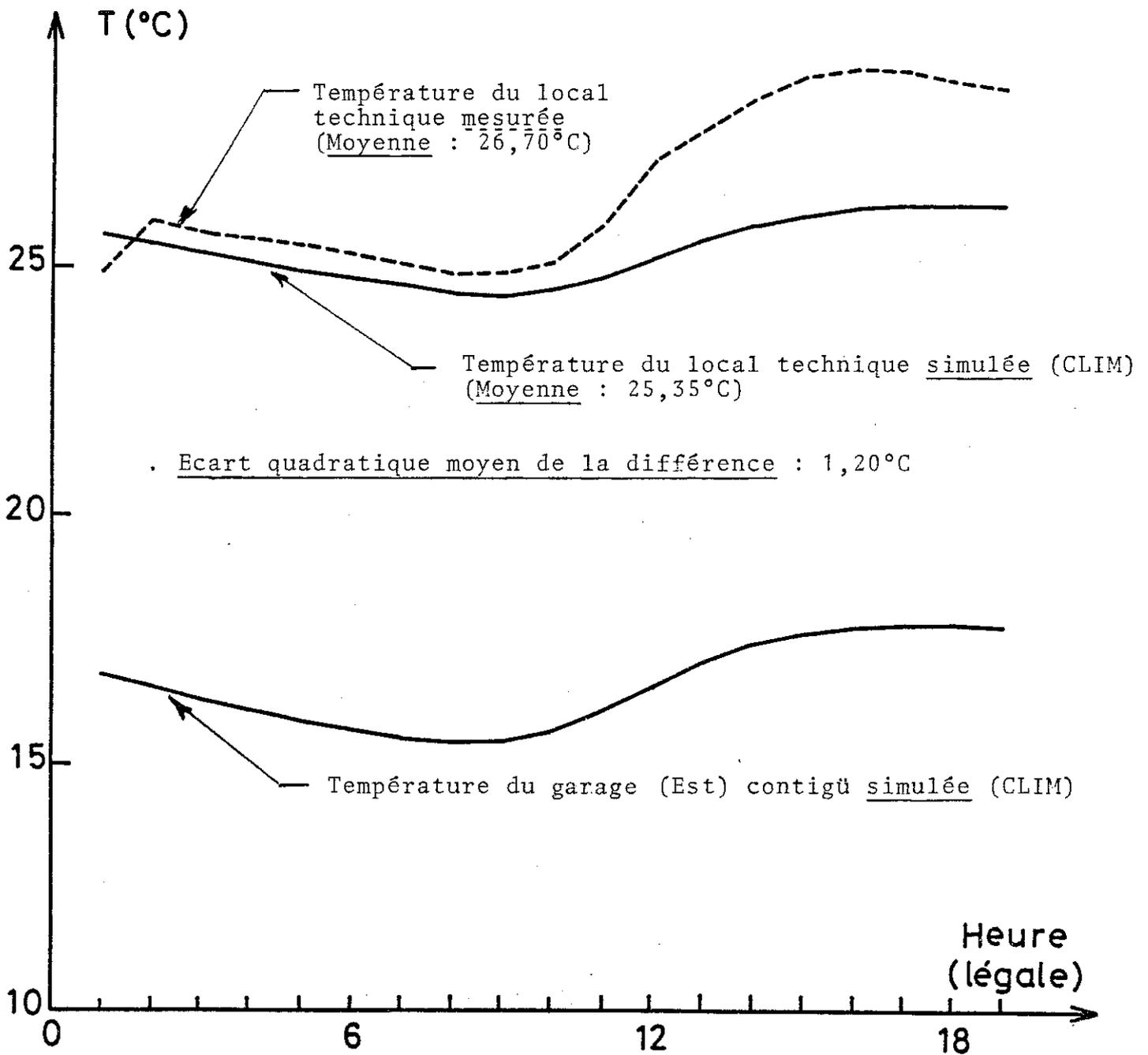


FIGURE 41

DETAIL D'UNE JOURNEE : 15 OCTOBRE 1978





### 5.3. SIMULATION DE L'EAU CHAUDE SANITAIRE SOLAIRE PAR CLIM + MASOL

(climat réel : septembre 78)

Nous précisons comment nous avons rectifié la simulation du module E.C.S. dans MASOL après la mauvaise concordance des mesures avec les calculs prévisionnels (§ 4.3.1.1.). Nous comparons pour septembre 78 les bilans d'énergie simulés et mesurés, concernant les consommations d'eau chaude sanitaire. Nous contrôlons, selon le cas simulé, l'évolution des températures du stockage solaire principal. La référence est encore le demi-immeuble.

#### 5.3.1. Rectification de la simulation du système E.C.S. de Bourgoin dans le programme MASOL.

La consommation moyenne annuelle en eau chaude avait été correctement prévue (§ 4.3.1.2. p. 49). Pourtant la simulation E.C.S. initiale (§ 4.1.2.b) restituait mal les bilans énergétiques (§ 4.3.1.2.). Cette distorsion ne pouvait s'expliquer ni par la baisse de l'occupation des locaux en été ni par la dispersion importante des consommations en E.C.S. selon les foyers. Nous avons donc revu, pour MASOL, la description du système E.C.S.

Nous n'avons pas modifié le principe de la simulation de l'E.C.S. par MASOL consistant à décrire un chauffe-eau unique, alimenté en eau à la température du stockage solaire principal, et éventuellement porté à 60°C par résistance électrique. Par contre, nous avons amélioré le profil journalier de la demande et modifié légèrement l'énergie moyenne journalière nécessaire à l'E.C.S. d'un demi-immeuble d'après la moyenne mesurée à l'époque : 57,1 Kwh/jour contre 56,4 Kwh/jour du 1er calcul. Pour prendre en compte l'inertie de l'ensemble du système producteur d'E.C.S., nous simulons un volume global de 3 280 litres, contre 1 500 litres du calcul initial. Ce volume correspond aux éléments

suivants :

- le ballon solaire de 1 500 l, dont la température passe de celle de l'eau froide à celle du stockage solaire (l'échangeur E.C.S. est permanent) ;
- le ballon électrique de 1 500 l et le ballon de bouclage de 150 l, qui passent de la température du stockage à 60°C par l'électricité ;
- un volume annexe pour l'eau des circuits de bouclage et un équivalent en eau de la masse totale de l'acier.

Pour les déperditions de l'ensemble (i.e. du ballon équivalent au système E.C.S.), nous avons trouvé l'été 41,5 W/K et en saison de chauffage 39,4 W/K contre 4,3 W/K pour le 1er ballon simulé, assimilé à un cumulus électrique simple. Pour estimer ces pertes thermiques, nous avons tenu compte des différents niveaux de températures (moyennes) et, pour certains circuits, nous avons adopté des coefficients correcteurs correspondant au temps moyen d'utilisation.

### 5.3.2. Les bilans d'énergie simulés et mesurés (pour l'E.C.S., en septembre 1978).

#### 5.3.2.1. Corrections diverses avant comparaison :

Pour comparer les bilans d'énergie concernant l'E.C.S., nous avons choisi 11 jours de septembre 1978 (bien mesurés et selon l'option solaire retenue).

Nous avons corrigé les énergies simulées (solaire utilisée et d'appoint électrique) proportionnellement aux mesures de la consommation d'eau chaude. En effet, le programme déclarait un besoin journalier de 57,1 Kwh/jour. En septembre 1978, pour 5 logements occupés, on a relevé en Est une consommation de 17 m<sup>3</sup> d'eau chaude. On peut en déduire une énergie moyenne journalière nécessaire par  $\eta m C_p \Delta\theta$ , avec  $\eta = 1,18$  (§ 4.3.1.1., p.53) et  $\Delta\theta = 44^\circ\text{C}$  (mesuré). On trouve :  $\frac{17}{30} \times 44 \times 1,163 \times 1,18 \times \frac{6}{5} = 41$  Kwh/jour pour le demi-immeuble Est. En Ouest, également

TABLEAU 12

Tableau n° 12 Date (sept.)	Energie solaire utilisée ECS (Kwh)		Ecart Mes - Sim		Appoint électrique ECS (Kwh)		Ecart Mes - Sim		Energie globale ECS (Kwh)		Ecart Mes - Sim	Nombre d'heures de mesu- res manquant entre 6'Het 24 H. N
	Simulée	Mesurée	Mes	Sim	Simulée	Mesurée	Simulée	Mesurée	Mes	Sim		
13	39,1	49,8	10,7		23,3	19,1	- 4,2		62,4	68,9	6,5	5,5
14	34,9	33,8	- 1,1		34,7	29,8	- 4,9		69,6	63,6	- 6,0	2
15	35,1	32,4	- 2,7		17,4	26,5	9,1		52,5	58,9	6,4	12,25
17	37,0	37,4	0,4		17,4	27,2	9,8		54,4	64,6	10,2	2,5
20	35,7	37,9	2,2		37,9	25,3	- 12,6		73,6	63,2	- 10,4	1
21	32,8	29,0	- 3,8		19,8	16,4	- 3,4		52,6	45,4	- 7,2	1,25
22	34,8	32,5	- 2,3		37,8	22,7 <sup>+</sup>	- 15,1		72,6	55,2	- 17,4	1,25
23	37,9	40,0	2,1		26,3	30,8	4,5		64,2	70,8	6,6	4
26	40,7	39,9	- 0,8		20,4	26,9	6,5		61,1	66,8	5,7	1,25
28	34,3	29,3	- 5,0		40,8	29,9	- 10,9		75,1	59,2	- 15,9	1
30	34,3	35,7	1,4		35,0	55,1	20,1		69,3	90,8	21,5	12,25
Total	397	398	1		311	310	- 1		707	707	0	22 %

+ Partiel

pour 5 logements, on a noté une consommation E.C.S. de 20 m<sup>3</sup>, d'où une énergie moyenne journalière de 48,3 Kwh/jour. Pour la comparaison, nous prenons les mesures du demi-immeuble qui était dans l'état simulé (cas de stockage, cas d'inertie primaire, etc...).

Nous corrigeons aussi quelques mesures de totaux journaliers d'énergie solaire extraite du stockage vers l'E.C.S., à cause de pas de temps manquants (dans les séquences enregistrées). S'il manque N heures de mesures entre 6 h du matin et 24 h (N faible), nous multiplions les énergies par  $\frac{18}{18-N}$ . Par contre les appoints électriques, consommations mesurées par des compteurs EDF usuels, ont été conservés tels quels.

#### 5.3.2.2. Les bilans d'énergie (Kwh par demi-immeuble) :

On constate (tableau 12) que les écarts journaliers de l'énergie solaire utilisée pour l'E.C.S. (mesurée-simulée) vont de -5 à +10,7 Kwh. La différence moyenne ( $\bar{d} = 0,1$  Kwh) et son écart quadratique moyen ( $s_d = 4,2$  Kwh) indiquent un suivi correct. La très bonne prévision du total est sans doute due au hasard (choix des jours, caractère sommaire des corrections). Ainsi, une erreur de 2°C sur la moyenne  $\Delta\theta$  mesurée conduirait à un total simulé dépassant de 4 % le total mesuré. De même, pour l'appoint électrique E.C.S., l'écart journalier est faible en moyenne (-0,1 Kwh) et au total, mais l'écart quadratique moyen de la différence atteint 11 Kwh.

L'énergie globale E.C.S. est prévue, pour ces 11 jours, exactement, mais l'écart journalier (mesuré-simulé) fluctue de -17,4 Kwh à +21,5 Kwh, et l'écart quadratique moyen de la différence est 12,2 Kwh.

#### 5.3.2.3. Conclusion des comparaisons de bilans énergétiques E.C.S. :

Après ces comparaisons, on constate que la rectification de la description du système E.C.S. (§ 5.3.1.) a nettement amélioré la prévision des bilans d'énergie E.C.S. On a pu vérifier que les appoints électriques sont bien importants, malgré un niveau d'énergie stockée

élevé (§ 5.3.3. ci-dessous) et des consommations E.C.S. faibles. Pour ces 11 jours, la part solaire simulée (56,1 %) ou mesurée (56,2 %) est plus réaliste que celle de la première prévision (§ 4.3.1.2. : 85 %). Sans doute convient-il de comparer les différences d'énergie journalière (simulée-mesurée) avec les pertes journalières minimales en l'absence de toute consommation (§ 4.3.1.2.). La simulation de l'E.C.S. ainsi rectifiée semble donc correcte, vu la fluctuation probable du profil de demande journalière.

### 5.3.3. Evolution des températures du stockage.

L'énergie extraite du stockage solaire principal pour l'E.C.S. est à coup sûr faible, en septembre, par rapport aux apports diurnes des jours bien ensoleillés et souvent elle est du même ordre de grandeur que les déperditions propres du stockage. Pourtant, le bon ensoleillement de la période choisie, sûrement favorable à une participation solaire importante à l'E.C.S., et le fait que l'échangeur solaire E.C.S. fonctionne seul et en permanence nous incitent à comparer les évolutions des températures de stockage (prévue et mesurée).

#### 5.3.3.1. Choix d'une température de stockage de comparaison :

La température de stockage issue du programme MASOL correspond à la température moyenne de la cuve unique simulant le stockage (cf. § 3.2.1., 3.2.3., 4.1.2.b.). Au niveau des mesures, pour les citernes à eau, nous pouvions adopter comme température de stockage :

- a) la moyenne des mesures de 4 sondes de température, réparties de façon à peu près uniforme sur la hauteur, d'une des citernes en parallèle ;
- b) les mesures issues d'une sonde située à mi-hauteur dans l'une des cuves en parallèle ;
- c) la moyenne des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur solaire E.C.S.

Nous n'avons pas retenu le choix a) à cause d'une stratification en température assez fréquente dans les cuves. En effet, en observant les mesures instantanées des sondes extrêmes (1 et 4) d'une même citerne, on peut noter, par exemple à minuit, des écarts allant de  $0,1^{\circ}\text{C}$  à  $8,2^{\circ}\text{C}$  (du 08/09 au 29/09/1978). Ces écarts atteignent fréquemment 2 à 4 degrés en cours de journée [41], et l'on a pu vérifier que l'équilibre thermique d'une citerne était souvent rétabli, par convection naturelle, à 5 h du matin. Mais cette température est mal corrélée à l'évolution de la moyenne des 4 sondes pendant la journée qui précède.

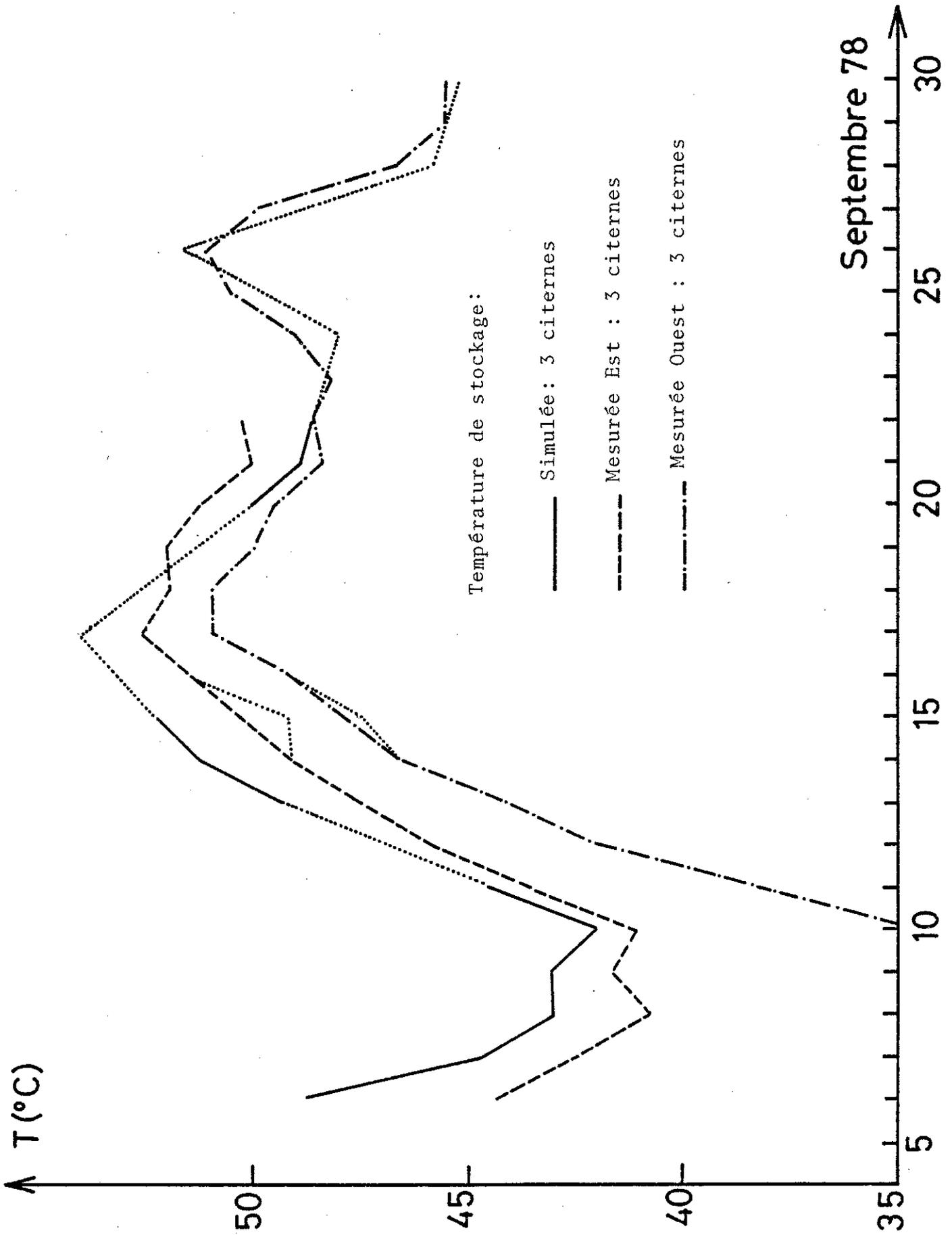
Le choix b) risque de ne pas être bon à notre avis puisqu'en examinant certaines évolutions journalières des températures d'une sonde médiane, on constate des discontinuités assez brutales [41, fig. IV.1, IV.2, IV.12] . En effet, lorsque la pompe solaire E.C.S. se met en marche, l'eau froide remplace progressivement l'eau chaude par plans horizontaux. La descente en température de la sonde médiane est très brusque [41, § IV.3.1.] , et la mesure reflète mal la température moyenne du stockage.

Nous avons plutôt retenu la 3ème solution c), qui correspond mieux à la simulation du stockage de MASOL (§ 3.2.3.), notamment pour les pertes thermiques dynamiques du circuit de charge E.C.S. De plus, lorsque le stockage a lieu par 3 citernes en parallèle, cette mesure correspond probablement mieux à une température moyenne de stockage.

#### 5.3.3.2. Comparaison des variations des températures moyennes journalières du stockage prévues et mesurées :

Simulation de 2 citernes (Ouest, du 6 au 8 septembre) : l'état initial des cuves simulées et mesurées étant différent, on constate une évolution relativement semblable des températures moyennes journalières : chute de  $4,7^{\circ}\text{C}$  (mesurés) et  $7,1^{\circ}\text{C}$  (simulés). Un bilan relatif aux pertes de l'énergie initialement stockée ressort à 18 % (simulé) contre 13 % (mesuré).

FIGURE 42



Simulation de 3 citernes (fig. 42). En Est, on constate un bon suivi global. Nous ne poussons pas plus loin l'analyse de détail puisque, par suite d'une erreur de manipulation, l'échangeur principal pouvait être en circuit direct avec le réchauffeur solaire. En Ouest, les comparaisons ne peuvent commencer qu'à partir du 11/09 (initialisations différentes). On note, jusqu'au 18/09, un accroissement journalier mesuré plus important que prévu. Ceci provient probablement d'un meilleur rendement des capteurs puisqu'ils fonctionnent en réalité à température plus basse. Lorsque les températures de stockage deviennent assez proches, du 20 au 30/09, on peut voir que les évolutions de détail sont bien simulées.

#### 5.4. ETUDE DE LA SIMULATION GLOBALE (chauffage + E.C.S.) PAR LES PROGRAMMES CLIM ET MASOL SUR OCTOBRE 1978

Nous avons pu étudier la simulation des besoins en chauffage par CLIM pour octobre 1978. La version finale du programme utilisée (§ 4.1.3., § 4.4.3.) comportait un taux d'occupation jour-nuit correspondant au taux réel d'habitation. Les apports internes (éclairage et électroménager) ont été ajustés d'après la consommation électrique domestique globale de la 1ère année de mesures (cf. § 4.3.). Nous étudions aussi les bilans d'énergie globaux de chauffage et d'E.C.S. par MASOL, et nous examinons comme pour septembre les évolutions des températures du stockage selon le cas simulé.

##### 5.4.1. Comparaison des bilans d'énergie pour octobre 1978.

Nous analysons séparément la simulation E.C.S., qui concerne essentiellement le programme MASOL, et celle du chauffage, qui fait intervenir CLIM et MASOL.

##### 5.4.1.1. Les prévisions et les mesures concernant l'E.C.S. :

Nous analysons 14 jours consécutifs, comme pour septembre (§ 5.3.2.1.). Nous multiplions éventuellement les énergies extraites pour l'E.C.S. par le facteur  $\frac{18}{18 - N}$ , N étant le nombre d'heures de mesures manquantes de 6 h du matin à minuit. Pour les énergies simulées (solaire et électrique), nous rectifions le besoin moyen journalier d'énergie pour l'E.C.S. d'après la consommation d'eau chaude mesurée pour le mois : 19,5 m<sup>3</sup>, en Est comme en Ouest, pour 6 logements occupés. D'où l'énergie nécessaire (§ 5.3.2.1.), avec  $\Delta\theta = 46^\circ\text{C}$  (moyenne mesurée):

$$\frac{19,5}{31} \times 46 \times 1,163 \times 1,18 = 39,7 \text{ Kwh/jour et le facteur correctif :}$$

$$\frac{39,7}{57,1} = 0,7.$$

Les appoints électriques, mesurés par compteurs EDF usuels, ne sont pas rectifiés.

TABLEAU 13

Date (Octobre)	Nombre d'heures de mesures manquées entre 6 H et 24 H N	Energie solaire (Kwh) ECS		Appoint électrique (Kwh) ECS		Bilan ECS (Kwh)	
		Sim.	Mes.	Sim.	Mes.	Sim.	Mes.
4	1,35	13	12,1	40,3	42,3	53,8	54,4
5	3,0	14,5	11	55,1	53,6	69,6	64,6
6	3,65	17,7	16,3	38,4	49,1	56,1	65,4
7	1,85	21,6	21,7	36	38,1	57,6	59,8
8	2,0	27,4	29,3	33,6	50,7	61	80
9	1,45	31,1	25,9	33,6	38,2	64,7	64,1
10	1,10	33	36,4	16,8	32,9	49,8	69,3
11	2,15	35,7	38,5	33,6	30	69,3	68,5
12	3,0	37,7	41,5	16,8	24,6	54,5	66,1
13	1,9	38,8	43,2	26,4	24,2	65,2	67,4
14	2,40	39,1	42,8	16,8	18,7	55,9	61,5
15	5,0	39,2	43,8	33,6	24,1	72,8	67,9
16	3,35	37	39	16,8	26,2	53,8	65,2
17	2,05	34,3	30,4	33,6	27,8	67,9	58,2
TOTAL	14 %	420	432	432	481	852	912
$\bar{x}$							
SD							

Les résultats (tableau 13) confirment le bon suivi journalier déjà observé en septembre. L'écart journalier entre les énergies solaires prévues et mesurées reste faible ( $\pm 5$  Kwh au maximum), alors que pour les appoints électriques, l'écart est souvent plus important (mesuré-simulé de  $-10$  à  $+17$  Kwh). Pour l'écart mesuré-simulé de l'énergie globale E.C.S., on trouve un  $t$  de Student très acceptable :

$$t = \frac{\bar{d} \sqrt{14}}{s_{\bar{d}}} = 1,83 \text{ (probabilité de dépassement inférieure à 10 \%)}.$$

#### 5.4.1.2. Les prévisions et les mesures concernant le chauffage :

Les mesures de l'énergie solaire entrant chaque jour dans les dalles chauffantes ont été multipliées par le facteur correctif  $\frac{24}{24 - N_1}$ , où  $N_1$  est le nombre d'heures de mesures manquantes entre 0 h et 24 h. La consigne intérieure du CLIM utilisé pour ces bilans est  $20^\circ\text{C}$ .

On constate (tableau 14) que les besoins prévus par CLIM ne sont pas surestimés. En effet les énergies journalières consommées pour le chauffage sont supérieures en général aux énergies prévues, sauf les 02/10 et 19/10. Mais si l'on cumule, dans ces deux cas, les énergies avec celles du jour précédent, cette anomalie disparaît. L'énergie solaire utilisée pour le chauffage est prévue chaque jour par MASOL comme voisine des besoins. Les appoints électriques simulés sont négligeables (prévision totale : 161 Kwh) et les appoints électriques de chauffage mesurés sont quasi nuls sur cette même période (pour 3 appartements contrôlés : 2 Kwh). Par contre l'énergie solaire mesurée dans les planchers chauffants est souvent supérieure à l'énergie solaire utilisée prévue, et le total mesuré dépasse le total prévu d'un facteur 2. On a calculé (sommairement, avec un GV global) une "surchauffe maximale" des appartements correspondant à cette différence d'énergie journalière consommée-prévue (tableau 14). Cette divergence apparemment importante nous suggère les 3 hypothèses suivantes :

- le plancher chauffant décrit dans MASOL simule mal les dalles chauffantes de Bourgoin : le calcul de l'émission globale du plancher (§ 4.1.2.c.) ne nous semble pas en cause, mais plutôt le fait que MASOL ne prend en compte ni l'inertie d'une telle distribution, ni

TABLEAU 14 : BILANS DE CHAUFFAGE

+ Sans correction : 66,7 et 2,1°C

Date (Octobre)	Nombre d'heures de mesures manquantes de 8 H à 24 H N <sub>1</sub> (h)	Besoins prévus par CLIM (Kwh)	Energie solaire prévue par MASOL (Kwh)	Energie solaire consommée (Kwh)	Surchauffe maximale des appartements °C	Température extérieure moyenne °C
1	4,6	51,8	57,6	443,3	10	9,4
2	2,68	166,1	163,5	95,1		8,2
3	7,25	221,9	220	262,3	1,3	9,2
4	2,85	216,2	200	242,1	0,8	9,5
5	4,0	191,3	104,2	304,7	3,6	9,7
6	3,65	189	143,3	405,6	6,8	9,2
7	1,85	150,8	154,6	335	5,8	11,8
8	2,75	25,11	34,21	278,3	7,9	16,3
9	1,45	1,8	0	267,3	8,3	16,7
10	2,6	0	0	25,2	0,8	17,4
11	2,15	0	0	33	1	16,0
12	3,5	0	0	53,3	1,7	15,6
13	2,15	0	0	75,7	2,4	15,3
14	2,65	0	0	55,9	1,7	15,1
15	5,5	0	0	56,2 <sup>+</sup>	1,8 <sup>+</sup>	14,5
16	9,35	0	0	109,2	3,4	14,3
17	2,3	21,7	37,1	34,7	0	10,2
18	2,65	178,6	168	348,2		8,0
19	1,25	299,3	295,5	142,1	0,4	7,6
TOTAL	14 %	1 713,5	1 575	3 567		

la régulation par vanne trois voies ;

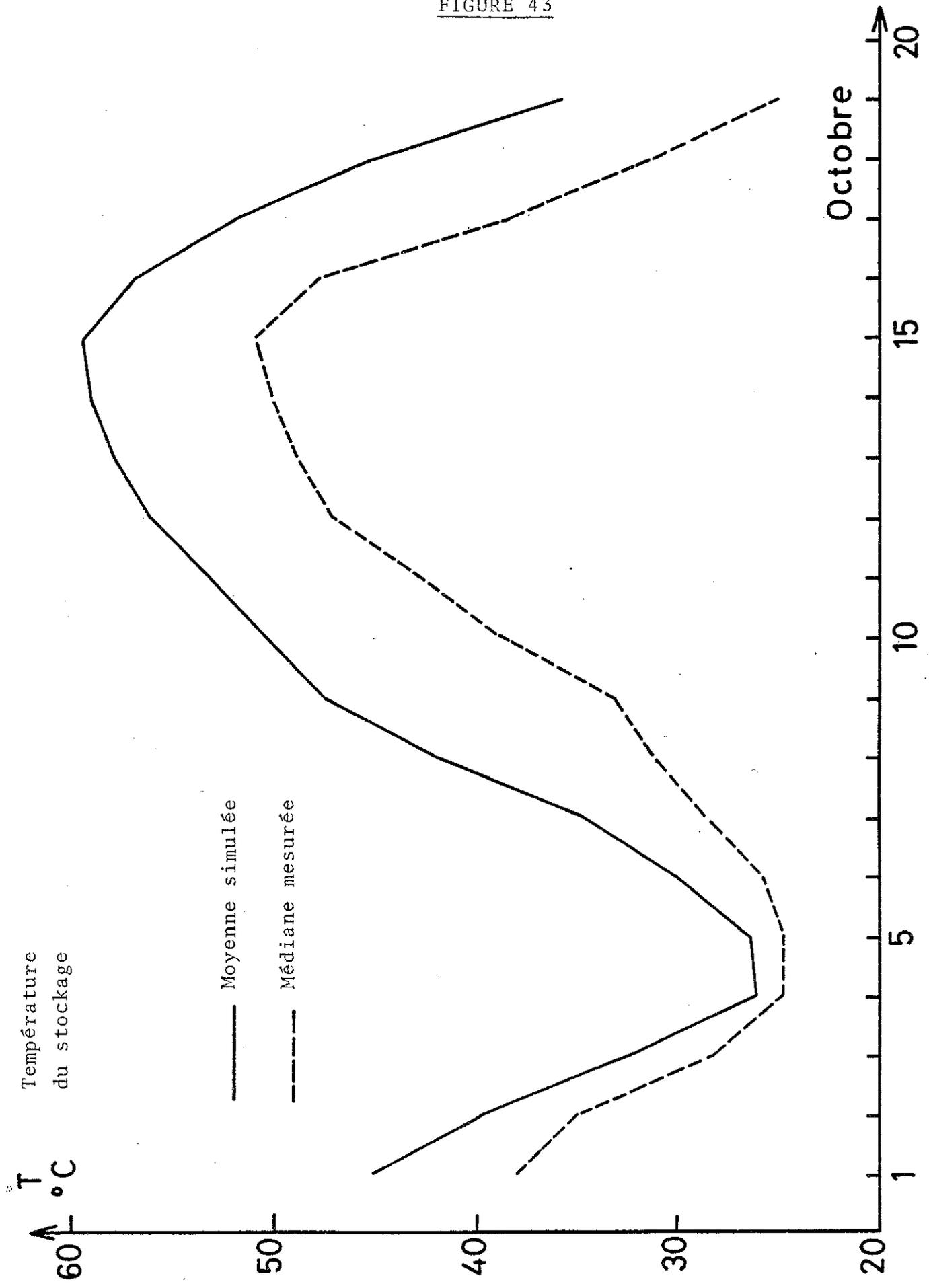
- les mesures de l'énergie entrant dans les planchers chauffants ne sont pas toujours très précises. En effet, le principe de la mesure nous impose deux sources d'erreur : sur le débit et sur la différence de température. Ainsi, sur l'échangeur principal par exemple, l'énergie secondaire fluctue fréquemment de  $\pm 10 \%$  par rapport à l'énergie primaire. De plus, la correction sommaire de ces mesures par le facteur global  $\frac{24}{24 - N_1}$  est probablement pénalisante. Ainsi, le 16, on a sans correction une consommation de 66,7 Kwh, contre 109,2 Kwh corrigée ;
- le comportement réel des habitants n'est pas simulé : ainsi, le 7 octobre 1978, à 10 h 30, on a pu constater, par bon ensoleillement, mais avec une température extérieure de 17°C, que toutes les portes-fenêtres des loggias en Sud étaient ouvertes, sauf une, et que 2 appartements sur 6 en Ouest et 5 sur 6 en Est avaient des fenêtres ouvertes en Nord. On a observé aussi que le comportement usuel des occupants consiste à laisser pénétrer le soleil par les portes-fenêtres ouvertes en Sud lorsqu'il n'y a pas de vent, et ceci même par faible température extérieure.

On peut donc penser, pour conclure, que CLIM n'a pas prévu trop d'énergie pour maintenir la consigne à 20°C, et que MASOL a bien prévu que l'énergie solaire suffirait seule à satisfaire les besoins en chauffage. Le fait que l'énergie solaire consommée dépasse nettement celle prévue sur cette première période réellement solaire dans le chauffage de l'immeuble, n'est pas suffisant pour incriminer MASOL.

#### 5.4.2. Evolution des températures du stockage.

Pour cette période, au niveau des citernes de stockage, nous ne disposions que des mesures par deux sondes de température en Ouest et une en Est. Nous avons choisi, des deux côtés, la sonde à mi-hauteur de citerne. En effet, la pompe d'extraction vers les dalles chauffantes n'entraîne pas les discontinuités de température pour la sonde médiane

FIGURE 43



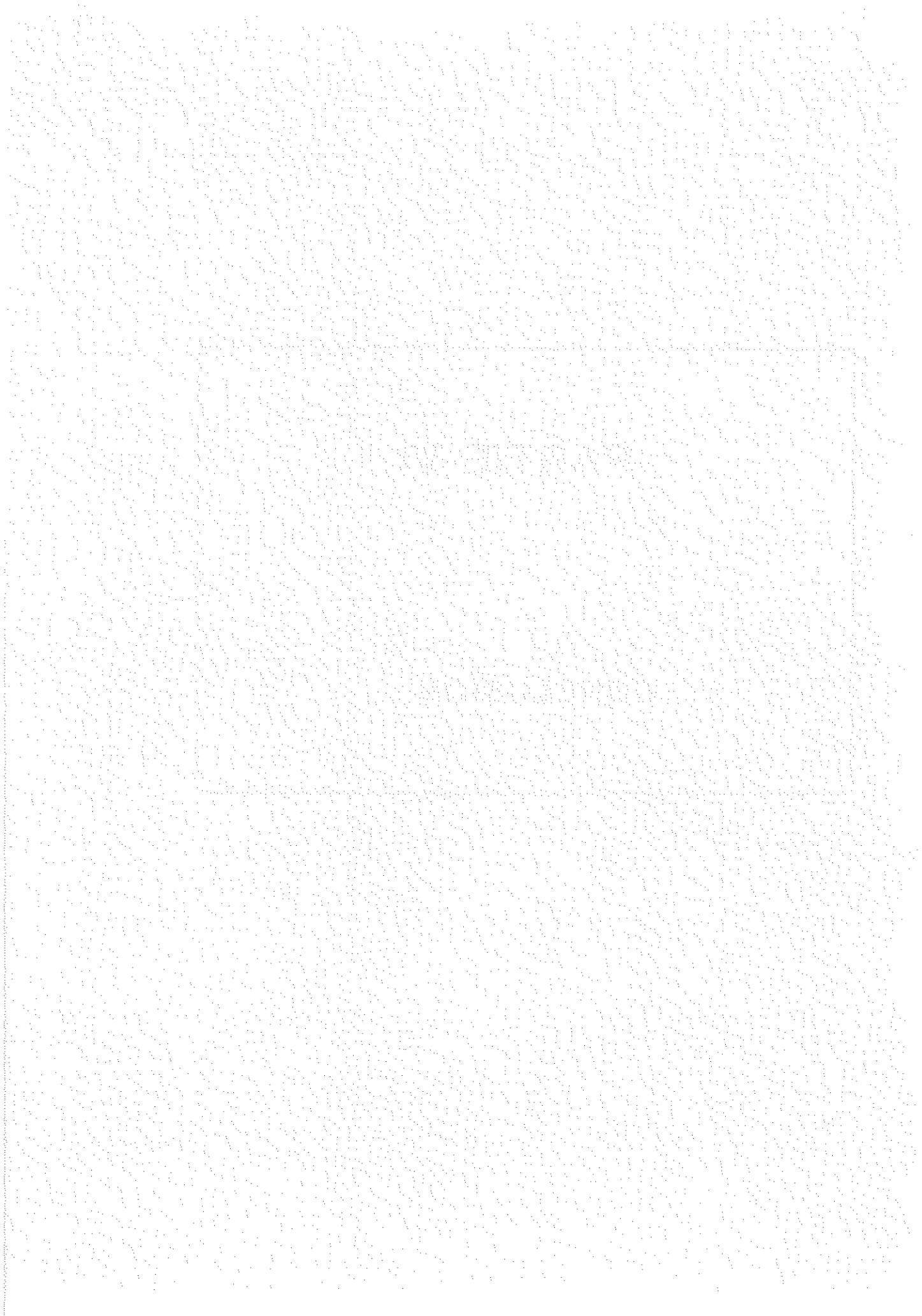
que l'on avait constatées lorsque le réchauffeur E.C.S. est seul à fonctionner (§ 5.3.3.1.). Par contre, la température moyenne d'entrée-sortie de l'échangeur E.C.S. ne suffit plus à traduire la température moyenne du stockage.

On constate, pour 3 cuves en parallèle et à inertie primaire minimale, que le suivi d'ensemble des températures du stockage est assez mauvais (figure 43). Il correspond à la divergence des extractions d'énergie pour le chauffage que l'on a constatée pour les bilans d'énergie (§ 5.3.).



# PARTIE VI

CONCLUSION



Grâce à différentes méthodes E.D.F., élaborées au sein du département de recherche A.D.E., nous avons pu mener à bien des calculs prévisionnels de bilans énergétiques de l'immeuble solaire de Bourgoin. L'expérimentation de l'équipe solaire du C.R.T.B.T. a permis de confronter mois par mois ces prévisions avec les résultats de trois années consécutives de mesures.

Nous avons pu conclure que le programme CLIM de Thermique du Bâtiment a pu donner un ordre de grandeur très acceptable des besoins moyens en chauffage du bâtiment, sur des périodes de quelques mois ou d'une année entière, et ceci alors même qu'on ne dispose que d'un climat-type de référence. Ce bilan prévisionnel semble par contre très sensible au niveau des apports gratuits retenus ainsi qu'à la température de consigne exigée et il convient d'être très prudent pour ces deux simulations. Parallèlement, le programme MASOL a permis de traduire assez fidèlement l'ensemble du système solaire dans des situations variées, avec les besoins en chauffage calculés par CLIM sur le climat-type. On a constaté que les moyennes d'énergie solaire utilisée pour le chauffage des locaux, annuelles ou mensuelles, restent très proches des valeurs prévues. Par contre les appoints électriques prévus ne sont en général pas atteints, probablement à cause d'un comportement basse-énergie des occupants. On a pu mettre en évidence l'existence d'un seuil à partir duquel le flux solaire commence à être vraiment utilisé par l'ensemble du système solaire de l'immeuble. MASOL ne prenant pas ceci en compte, on peut penser que cela explique partiellement les légères distorsions entre les performances prévues et mesurées, surtout pour les mois d'ensoleillement plus faible (janvier à mars).

Des méthodes de calcul plus sommaires, manuelle ou implantée sur mini-ordinateur, ont donné des bilans annuels prévisionnels plus discutables. Elles peuvent suffire probablement pour un avant-projet rapide, mais ne permettent pas une analyse de détail très fine, ni une étude chronologique, par exemple mensuelle.

La supériorité des programmes élaborés CLIM et MASOL tient aussi au fait qu'on peut étudier, à climat égal, les effets des variations de plusieurs paramètres, architecturaux, thermiques ou proprement solaires. On a pu constater que les réponses de ces programmes à de telles

variations sont réalistes, et on a pu tester dans la plupart des cas au moins la tendance de l'évolution prévue.

Notre projet initial, outre les calculs prévisionnels, était d'utiliser directement pour CLIM le climat réel mesuré. Nous n'avons pu entrer qu'une version simplifiée du climat réel, pour 45 jours (§ 5.1.). Nous avons pourtant pu vérifier que CLIM a reconstitué un climat très proche du climat réel, à partir des seules entrées journalières suivantes : températures extérieures minimale et maximale et trois pourcentages d'ensoleillement direct horizontal par jour. Nous avons pu comparer pour cette période la prévision des énergies dépensées pour le chauffage avec les consommations réelles. CLIM n'a pas été mis en défaut pour cette courte période de chauffage (01-19 octobre). Sans aucun doute, il aurait fallu entrer des périodes plus longues ou bien simultanément plus froides et moins ensoleillées pour améliorer l'analyse critique de CLIM (et de MASOL) dans la simulation du chauffage. Le calcul prévisionnel initial, par MASOL, de l'eau chaude sanitaire solaire avec appoint électrique, n'était pas en bon accord avec les mesures moyennes ultérieures. Mais, en reprenant la description du système E.C.S. propre à l'immeuble, nous avons trouvé en climat réel, aussi bien en septembre qu'en octobre, un très bon accord des prévisions de MASOL avec les énergies mesurées pour ce poste.

Le programme CLIM a été récemment amélioré pour recevoir directement une météorologie mesurée. Ce type d'étude pourra donc être repris dans de meilleures conditions. Le système d'acquisition de données a été aussi, récemment, perfectionné à Bourgoin et l'on peut espérer que les mesures permettront une analyse plus fine et vraiment quantitative des effets de la variation des paramètres solaires étudiée par MASOL.

Au cours de notre travail, nous avons souvent été gênés par l'absence de mesures concernant le comportement thermique réel des occupants de l'immeuble. Une instrumentation supplémentaire des appartements de Bourgoin et la mise en place d'enregistreurs pour les compteurs électriques spécifiques du chauffage permet de penser qu'on pourra mieux tester le programme CLIM. En particulier, on pourra sans doute contrôler

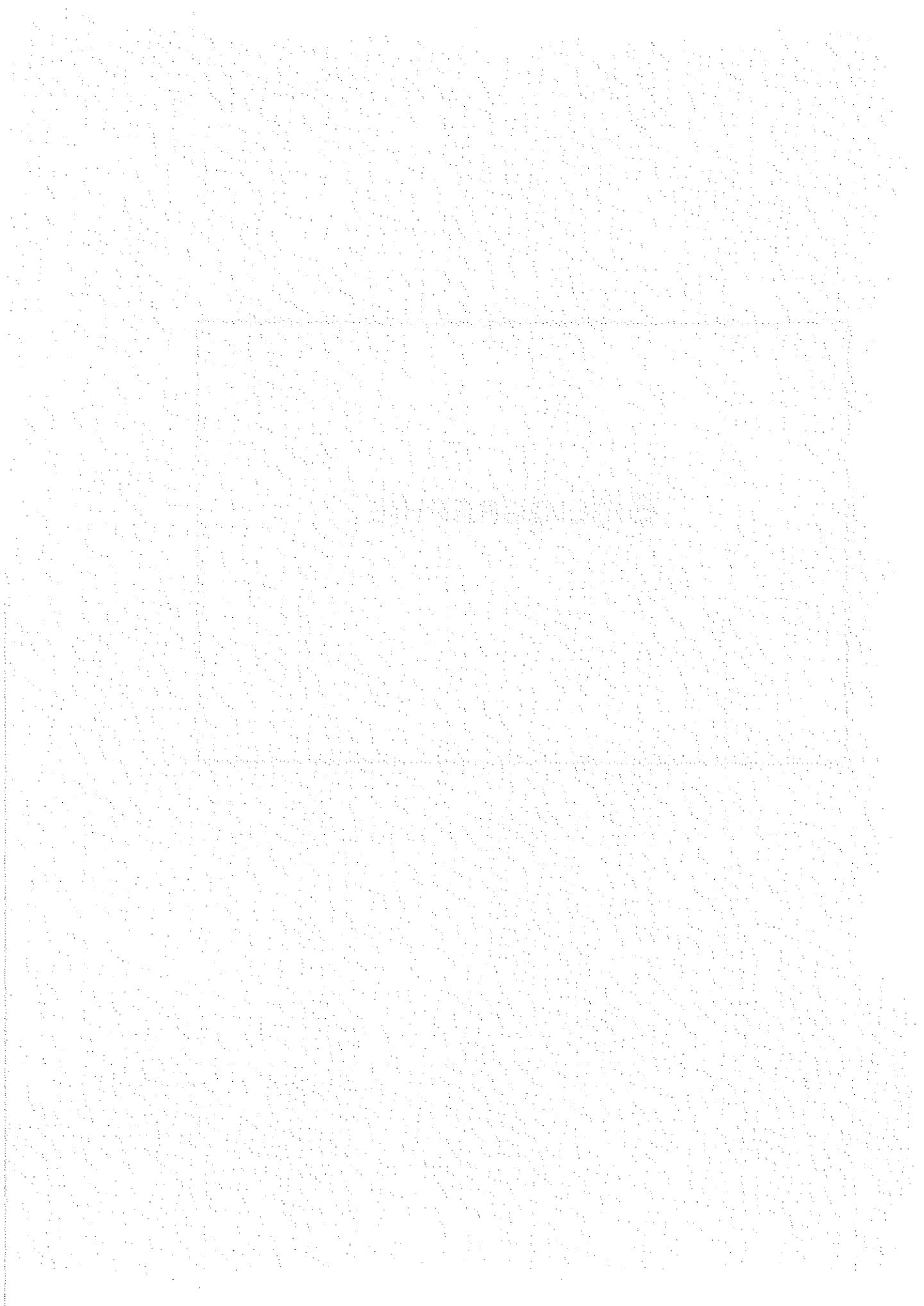
les niveaux de puissance appelée par rapport au comportement réel des habitants.

Mais, comme dirait R. Kipling, ceci sera une autre histoire...

---



# BIBLIOGRAPHIE



- (1) A.S.H.R.A.E. :  
American Society for Heating, Refrigeration, Air conditioning Engineers.
- (2) "DOE2" :  
Draft, Building Energy Analysis Group, Lawrence Berkeley Laboratory, California (mars 1980).
- (3) COSTIC :  
Comité Scientifique et Technique de l'Industrie du Chauffage, de la ventilation et du conditionnement d'air.
- (4) C.S.T.B. :  
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- (5) M. CHATEAUMINÔIS, D. MANDINEAU, D. ROUX :  
Calcul d'Installations Solaires à Eau - Collection de l'Ec. Sup. des Ing. de Marseille (ESIM) - EDISUD/Pyc Edition (1979).
- (6) Ph. CHOUARD, H. MICHEL, M.F. SIMON :  
Bilan thermique d'une maison solaire. Eyrolles -Paris (1977).
- (7) "TRNSYS" :  
A transient system simulation program, S.A. Klein et al., Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin (juin 1979).
- (8) "MASOL" :  
R. FRANCHISSEUR. Modélisation d'une Maison Solaire. EDF. Etudes et Recherches. Dept ADE/Renardières, Doc. n° HE112 T343 (février 79) (\*)
- (9) B. RUEL, G. KUHN :  
Immeuble Solaire Expérimental de Bourgoin-Jallieu (Isère). Bilans prévisionnels. Promoclim E. Tome 9E n° 3 (juin 1978).
- (10) FRELIN, HUMBERT :  
Etablissement d'un avant-projet de climatisation à l'aide d'un ordinateur. Doc. EDF Renardières, Dept ADE n° HC312W681 à W687 (1968 à 1974).
- (11) D.T.U. du C.S.T.B. [ 4 ] :  
Document Technique Unifié. Utilisés : Titres I, II, III de février 1975. Règles TH-K 77 et Th-G77 de novembre 77.
- (12) J. HENRY :  
Analyse Statistique de Données Météorologiques. Doc. EDF Renardières Dept ADE n° HC 332 W 821 (climats-types retenus pour le programme CLIM) (1974).
- (13) Ch. MAILLARD :  
Programme de Climatisation. Dossier Technique. Tome I. Doc. EDF. Service Informatique & Mathématiques Appliquées (1975).

---

(\*) Programme déjà opérationnel en juin 1977 sous sa forme élaborée.



- (14) Météorologie Nationale-Grenoble :  
Moyennes mensuelles des températures extérieures à Bourgoin-Jallieu, établies à l'aide de relevés journaliers des températures minimale et maximale de 1959 à 1975. Communiquées par M.N. Grenoble-Saint Martin d'Hères.
- (15) Ch. MAILLARD :  
Programme de Climatisation. Dossier méthodologique. Doc. EDF. Service Informatique et Math. Appl. (1974).
- (16) R.S. VARGA :  
Matrix Iterative Analysis. Prentice Hall. Series in Automatic Computation (1962).
- (17) J.F. MONFORT, R. PESCEIDA, Ph. CHOUARD :  
Résultats des Essais de Capteurs Solaires à Eau. Rapport EDF/ADE n° HE 142 NS 1051 (1978).
- (18) Comité Français d'Electrothermie :  
L'eau chaude sanitaire par l'électricité dans l'habitat, n° IB 7. Colloque de Versailles (décembre 1975).
- (19) D.J. CLOSE :  
A design approach for solar processes. Solar Energy. Vol. 11 n° 2 (1967).
- (20) G. GUTTIERREZ, F.HINCAPIE, J.A. DUFFIE, W.A. BECKMAN :  
Simulation of forced circulation water heaters ; effects of auxiliary energy supply, load type and storage capacity. Solar Energy, vol. 15, pp. 287-298 (1974).
- (21) B. RUEL :  
Un immeuble solaire expérimental à Bourgoin. Simulation et Calculs Prévisionnels. D.E.A. Grenoble (septembre 1977).
- (22) G. KUHN :  
Immeuble Solaire de Bourgoin-Jallieu : un an d'expériences. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. N° 388 (novembre 1980).
- (23) G. KUHN :  
Reporting Format for Solar Heating Systems. P.M.G. Commission of the European Communities (may 1981).
- (24) A. DESPLANCHES :  
Méthode de Calcul des Apports Thermiques dans les Bâtiments. Guide A.I.C.V.F., Fascicule 2, Paris (1964).
- (25) Statistiques diverses :  
a) COSTIC. Charges de Climatisation. Promoclim T4 : n° 13 du 19/11/1973 et n° 5 de mai 1974.  
b) Etude technico-économique d'une maison solaire. Rapport CNES-EDF (décembre 1976) (communication privée).  
c) Normes de puissances et consommations. Doc. EDF-SEPAC (juillet 1973) (communication privée).  
d) Statistiques H.L.M. sur les consommations d'eau chaude sanitaire (communication privée).



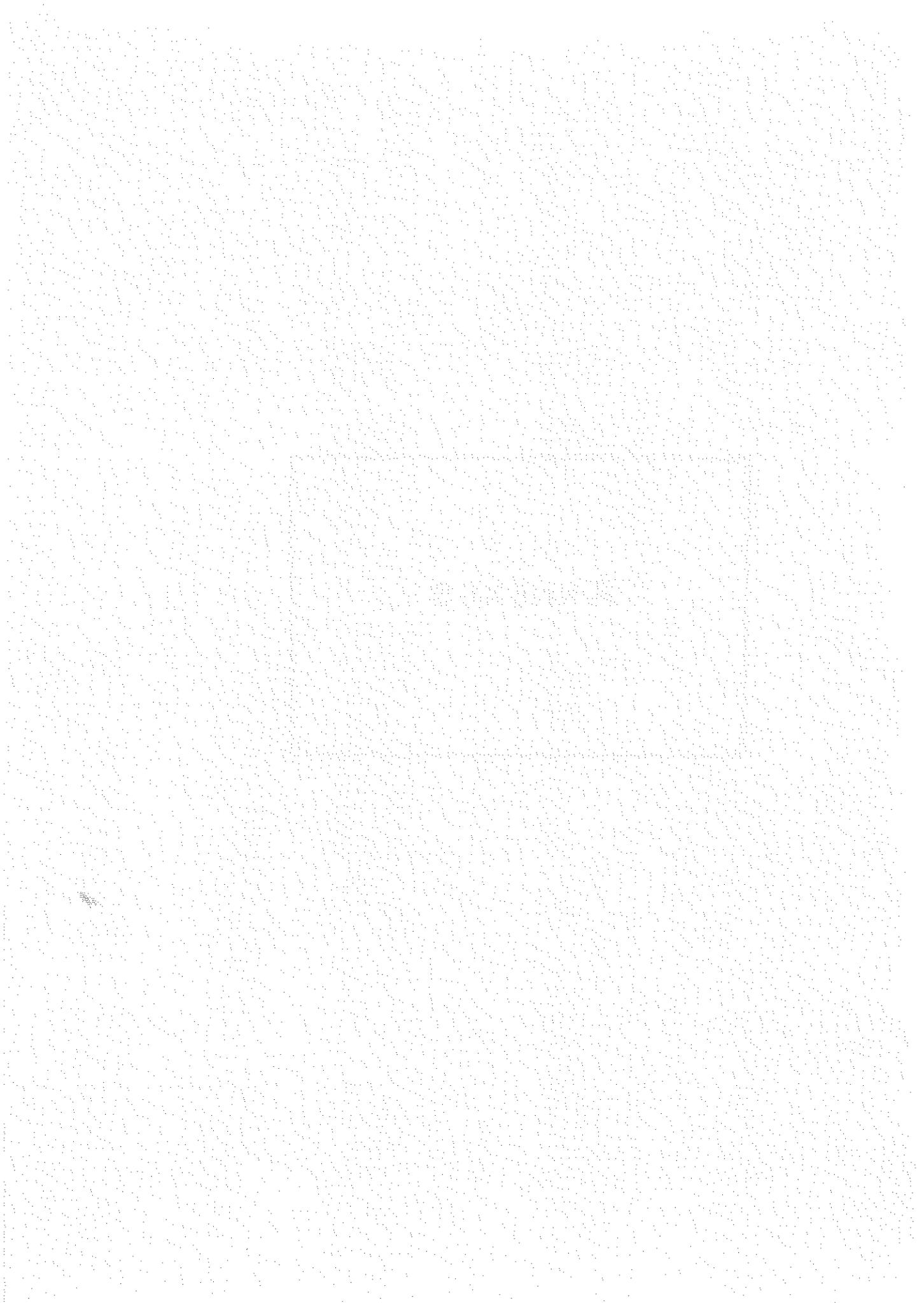
- (26) R. WOLF :  
Chauffage et Conditionnement électriques des locaux. Eyrolles  
(avril 1974).
- (27) R. LE GOFF :  
a) Consommations et Puissances dans les logements "tout-  
électrique" : synthèse de 5 années de mesure. Doc. EDF-  
Renardières. Dept. T.E.G.A.E.H. n° HC 323 T 242 (décembre  
1972).  
b) Logements "tout électrique" : synthèse des résultats de  
mesures de puissances et d'énergie. Doc. EDF-Renardières.  
T.E.G.A.E.H. n° HC 332 T 196 (octobre 1976).
- (28) COSTIC [3] :  
Manuel des Industries Thermiques et Aérauliques. Tome 1.  
Thermique. Dunod (1970).
- (29) G. OLIVE :  
Actualisation du Calcul des Planchers Chauffants. Promoclim E.  
Tome 7E, n° 4 (décembre 1976).
- (30) E.D.F. :  
Etablissement des avant -projets de chauffage électrique.  
Doc. E.D.F., division Techniques des Applications, TAl (juin  
1973).
- (31) Ph. CHOUARD :  
Optimisation des moyens de chauffage d'une habitation peu  
isolée. Doc. EDF-Renardières. T.E.G.A.E.H. n° HC 312 T 210  
(mars 1974).
- (32) C.C.U.E. :  
Méthode de Calcul du nombre de degrés-jours à base quelconque  
et des courbes de fréquence des températures extérieures  
(1977). (communication privée).
- (33) J. ADNOT, R. GICQUEL, G. WATREMEZ :  
Etude du Comportement Dynamique des boucles de Captation de  
l'Energie Solaire régulées par Tout-ou-Rien. Revue Gén. de  
Thermique n° 216 (décembre 1979).
- (34) Météorologie Nationale :  
Durées moyennes d'insolation (heures). Moyennes de 1951 à 1970.  
S.D.I.E.N. Energie Solaire (décembre 1977).
- (35) Ch. PERRIN DE BRICHAMBAUT :  
Estimation des Ressources Energétiques Solaires en France.  
Supplément au Cahier AFEDES n° 1. Ed. Thermique et Industrie  
(juillet 1975).
- (36) J.A. DUFFIE, W.A. BECKMAN :  
Solar Engineering of Thermal Processes. J. Wiley & Sons (1980).
- (37) K. CHANG, A. MINARDI :  
An optimization formulation for solar heating systems. Solar  
Energy, Vol. 24, pp. 90 to 103 (septembre 1979).



- (38) F. FLOUQUET :  
The Bourgoin-Jallieu Experimental Apartment Building :  
Optimization of the Collector System - International Symposia,  
Modelling, Policy and Decision in Energy Systems. San  
Francisco (may 1981).
- (39) W.A. BECKMAN, S.A. KLEIN, J.A. DUFFIE :  
Solar Heating Design by the f-chart Method. J. Wiley (juin  
1977).
- (40) Ch. PERRIN DE BRICHAMBAUT :  
A propos des données sur le rayonnement solaire. Bâtiment-  
Energie n° 21 (juin-juillet 1982).
- (41) Cl. AUBERT-DASSE :  
Comparaison expérimentale et théorique d'un système de  
stockage à eau et d'un système de stockage par matériau à  
changement de phase sur l'immeuble solaire expérimental de  
Bourgoin-Jallieu (Isère). Thèse de 3ème Cycle (juin 1981).

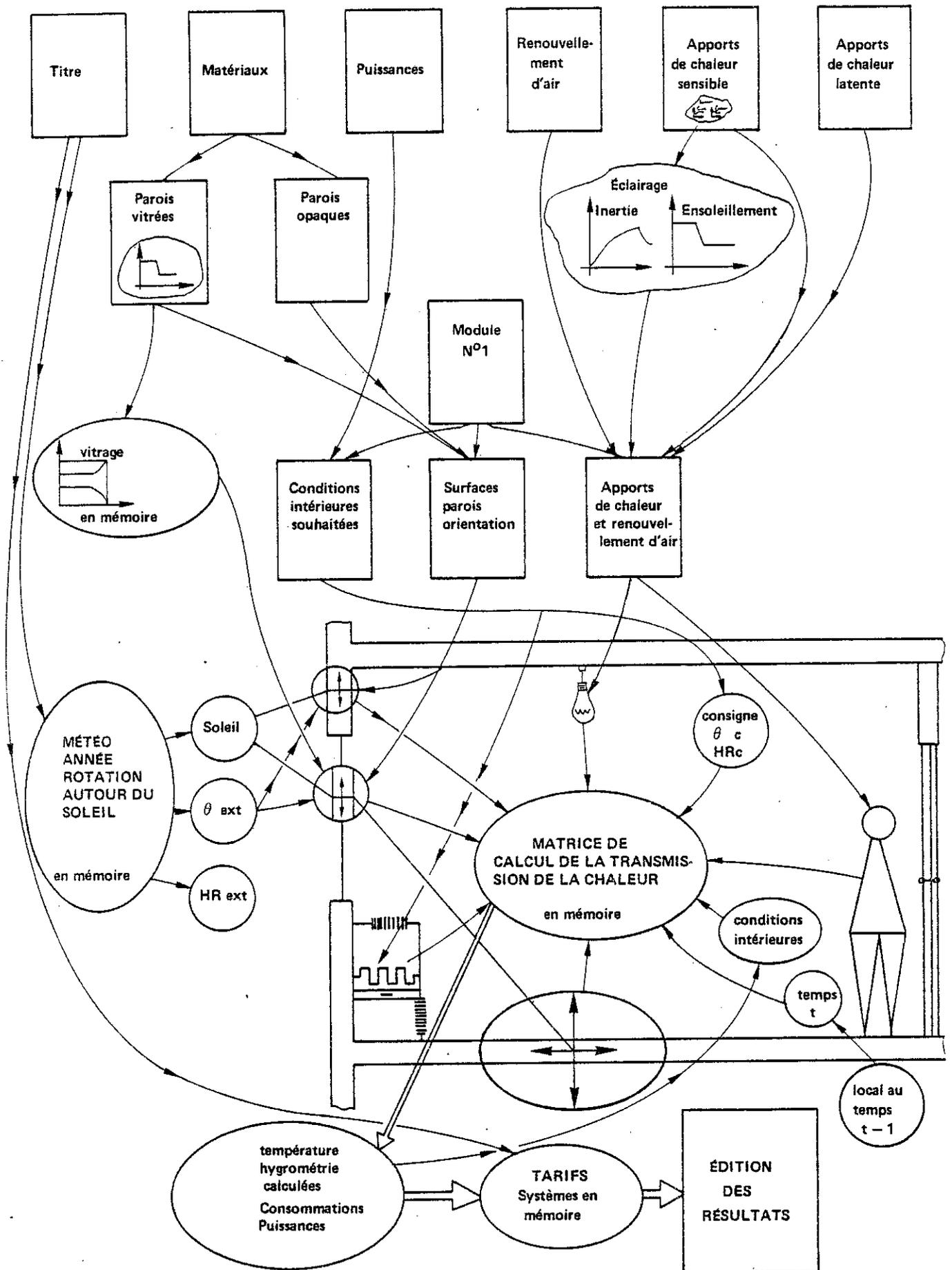


# ANNEXES



ANNEXE 1

Programme de climatisation





ANNEXE 2 (Page 1)

(D'après note EDF HI 1782/02 [13])

SOUS-PROGRAMMETEMEX1. - OBJECTIFS :

TEMEX crée et lit la pseudo-sinusoïde représentant la température journalière. Les valeurs retenues pour cette sinusoïde sont

0 h	- 1.6	12 h	2.1
1 h	- 2.1	13 h	3.8
2 h	- 2.5	14 h	4.5
3 h	- 2.9	15 h	4.5
4 h	- 3.1	16 h	4.3
5 h	- 3.4	17 h	3.8
6 h	- 3.4	18 h	3.2
7 h	- 3.4	19 h	2.5
8 h	- 3.1	20 h	1.6
9 h	- 2.6	21 h	0.8
10 h	- 1.4	22 h	- 0.4
11 h	- 0.2	23 h	- 1.

2. - EMPLOI :

L'appel se fait par la séquence

CALL TEMEX(T1, T2, T3, T4, TIN, HEU, LL)

2 cas sont possibles :

a)  $LL < 2$  : on crée la sinusoïde : T1, T2, T3, T4 sont les entrées et représentent respectivement :

T1 : température maximale la veille à 15 h.

T2 : température minimale le matin à 6 h.

T3 : température maximale l'après midi à 15 h.

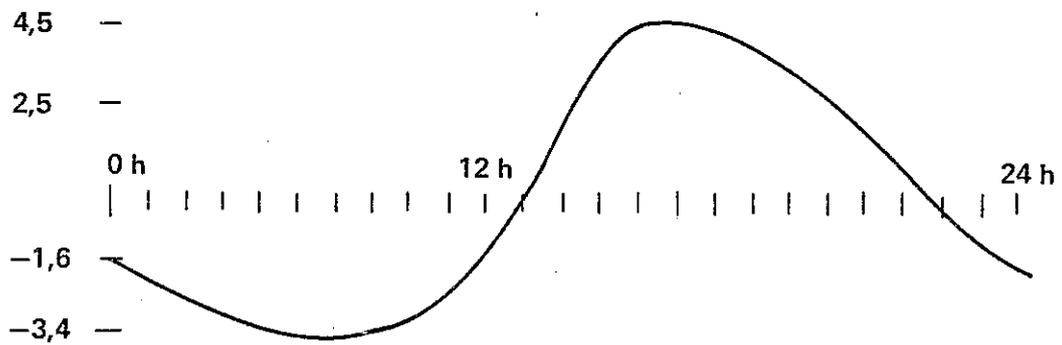
T4 : température minimale le lendemain à 6 h.

Le résultat est stocké sur le common TEMEXA.

b)  $LL \geq 2$ . On exploite la sinusoïde : l'entrée est HEU, l'heure, et la sortie TIN la température de l'air à cette heure.

ANNEXE 2 (Page 2)

## La pseudo-sinusoïde du programme «CLIM»



Le minimum entre 5 h. et 7 h et le maximum entre 14 h et 15 h.

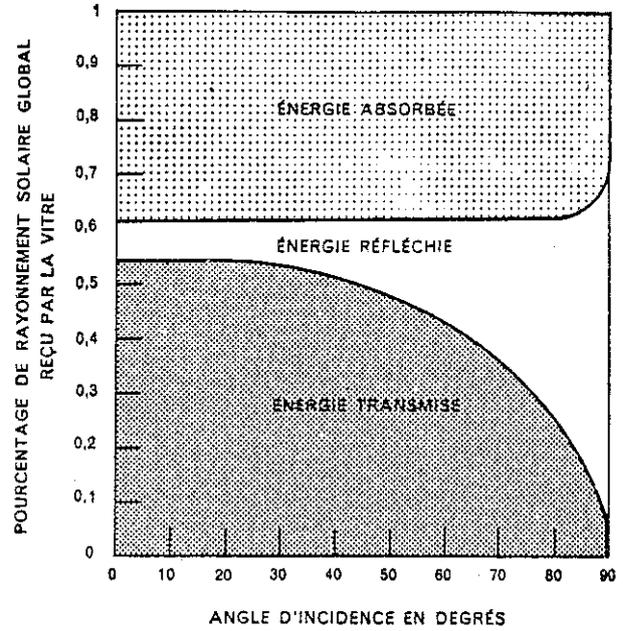
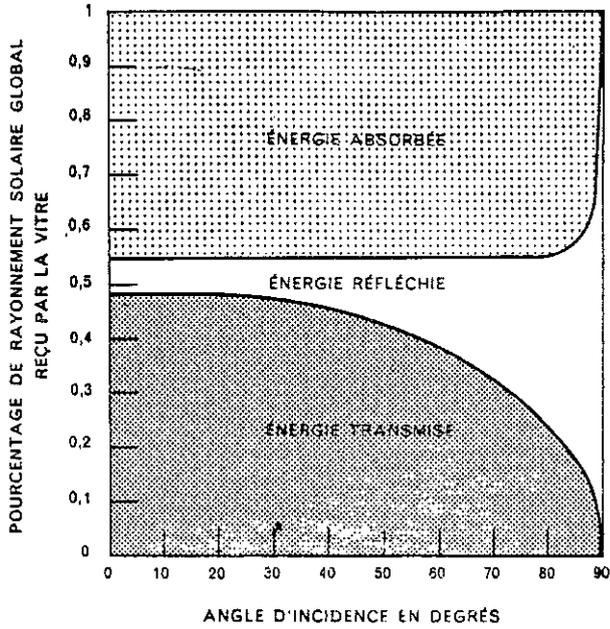
(D'après D. Clément - Ph. Chouard)

(Note EDF/Renardières HE 132 NS 1268 - Septembre 78)

ANNEXE 3

44 - GLACE OMBRAL 6,5 mm

45 - VERRE GRIS 3 mm

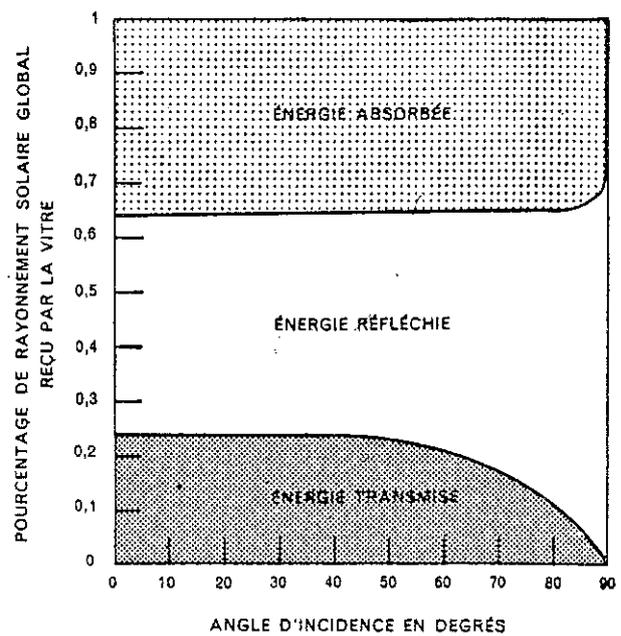
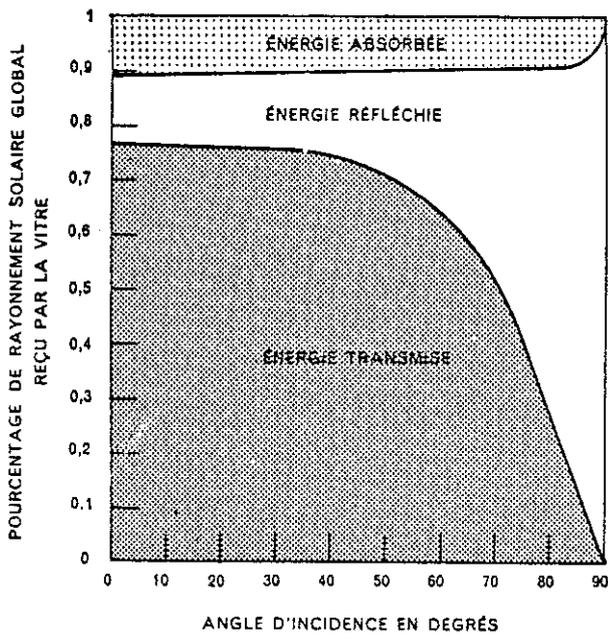


II. VITRAGES DOUBLES

50 - NORMAL  
(Cas de Bourgoin)  
2 VERRES DE 3 mm  
LAME D'AIR 12 mm

51 - STOPRAY

GLACE STOPRAY 6 mm  
GLACE CLAIRE 6 mm  
LAME D'AIR 12 mm





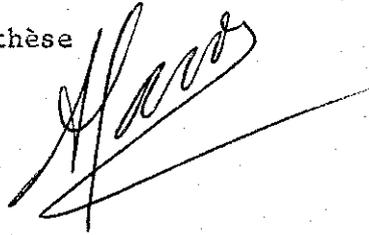
Dernière page d'une thèse

---

VU

Grenoble, le 25-10-82

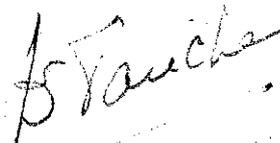
Le Président de la thèse



Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université Scientifique et Médicale



Le Pr.

M. TANCHE



MOTS-CLES :

Energie solaire - Logement collectif - Mesures in situ - Simulation CLIM (programme) - MASOL (programme)

Bilan énergétique prévisionnel - Climat-type - Climat réel.

RESUME :

Ce travail a été effectué au sein de l'équipe solaire du C.R.T.B.T. à Grenoble sur l'immeuble solaire expérimental de Bourgoin (Isère). Cet immeuble est effectivement habité et la plupart des paramètres solaires sont variables et mesurables. A l'aide de deux programmes de calcul E.D.F. (CLIM et MASOL), nous avons calculé les bilans énergétiques prévisionnels de l'immeuble avec le climat-type de Lyon comme référence et pour divers états des paramètres solaires. Puis nous avons confronté ces résultats avec les bilans de trois années de mesures. Nous avons créé ensuite un climat simplifié pour CLIM d'après 45 jours de climat réel mesuré. Après analyse du climat restitué, nous avons comparé les bilans d'énergie simulés, pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire collective, avec les bilans d'énergie mesurés sur cette période.

