



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS

34100 TRIESTE (ITALY) - P.O.B. 880 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONE: 2240-1
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460392-I

H4.SMR/193 - 42

"COLLOQUE INTERNATIONAL SUR LA SCIENCE DES MATERIAUX POUR L'ENERGIE".

(26 août - 11 septembre 1986).

"EXPERIENCES PRELIMINAIRES EN VUE DU DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME".

Koua Oi Koua
Yao N'Goran
Michel Hounkpe
Jean Claude Zobo
Jean Caclin
Rouhani Medhi Djafari
I.R.E.N.- Université
Abidjan, Côte d'Ivoire

Ces notes de recherche provisoires, sont destinées aux participants. Eventuellement, d'autres copies seront disponibles au bureau 231.



REFRIGERATION PAR ADSORPTION SOLIDE

EXPERIENCES PRELIMINAIRES EN VUE

DU DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME

INTRODUCTION

Depuis le grand choc pétrolier de 1973, les programmes de recherche sur les énergies de substitution ont connu un regain d'intérêt, surtout dans le domaine de l'énergie solaire.

Plusieurs laboratoires ont ainsi été créés pour étudier les possibilités de stockage de cette énergie ainsi son utilisation comme produit de substitution.

En Afrique, ce besoin de recourir à l'énergie solaire s'est fait le plus sentir avec la grande sécheresse et surtout le besoin grandissant en bois de chauffe des populations rurales qui pour conséquence immédiate la destruction des sols ainsi que l'avancée du désert vers le sud.

Ce deuxième facteur a engendré un autre type de recherche visant à l'amélioration des foyers tant au niveau de la de la structure que de la forme. L'objectif visé étant de limiter la quantité de bois utilisé par kilogramme d'aliment cuit ou de diminuer les pertes thermiques.

Plusieurs laboratoires de la sous région travaillent sur ce sujet: CERFER (Sénégal), Laboratoire de Monsieur GAININVI (Benin), LIER (Burkina-Faso), MCF (Cote D'Ivoire), etc...

Malgré des résultats très probants obtenus par certains laboratoires, les pertes thermiques autour des foyers restent encore très importantes.

De plus, en marge de ces problèmes d'ordre énergétique, se pose aussi le problème de la conservation des denrées alimentaires en milieu rural.

.../...

L'objectif du groupe froid de l'IREN est d'utiliser les pertes thermiques autour du foyer lors de la cuisson des aliments pour la production de froid. Ce froid pouvant être utilisé pour la conservation des denrées alimentaires périssables (fruits, légumes et féculents).

Ce froid sera produit à partir d'un système thermodynamique, sans partie mécanique, utilisant le couple zéolithe-eau.

Des expériences préliminaires nous ont permis de déterminer les températures à différents points du foyer et de déterminer les coefficients globaux d'échange thermique en vue du dimensionnement du premier prototype.

II - PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT

Le système de réfrigération par adsorption solide est basé sur la propriété des zéolithes d'adsorber les vapeurs gazeuses sous certaines conditions physiques (pression, température). L'adsorption de la vapeur provoque l'évaporation du liquide et la chute de température dans l'évaporateur. Celui-ci placé dans une enceinte calorifugée constitue ensemble la chambre froide. Le cycle décrit est représenté par le schéma ci-après (figure 1).

Le matin, lorsque la ménagère commence sa journée, l'état du système est représenté par le point A. Au cours de la cuisson la température de l'adsorbant Tz augmente provoquant une élévation de la pression d'interface zéolithe-vapeur d'eau. Lorsque la pression de vapeur d'eau au dessus de la zéolithe atteint la valeur de la tension de vapeur saturante correspondant à la température du condenseur on ouvre la vanne entre le lit de zéolithes et le condenseur: la condensation commence. Le processus se fait à pression constante et se poursuit jusqu'à ce que la zéolithe atteigne la température maximale TC, fonction de la source de chaleur, de la nature du capteur et de la quantité de zéolithe.

La quantité d'eau condensée est recueillie dans un récipient placé sous le condenseur.

La quantité de combustible diminuant, le flux de chaleur à laquelle est soumise l'adsorbant diminue entraînant une baisse de pression au niveau de l'interface zéolithe-vapeur d'eau.

.../...

Le liquide cyclé est transféré à l'évaporateur. Le condenseur et le réservoir sont isolés de l'adsorbant et de l'évaporateur.

On ouvre la vanne qui relie le lit de zéolithes et l'évaporateur. La température dans le lit de zéolithes continue de décroître jusqu'à ce que la pression de vapeur d'eau au dessus de la zéolithe atteigne la pression de vapeur saturante correspondant à la température de l'évaporateur: l'évaporation commence suivie de l'adsorption. Le processus se fait encore à la pression constante et se poursuit jusqu'à ce que la température de l'adsorbant atteigne la température de fin d'adsorption 1A.

III - CONDITIONS EXPERIMENTALES ET MESURES

L'adsorbant utilisé est la ZÉOLITHES 13X de formule brute $\text{Na86(AlO2)86(SiO2)106,276H2O}$ appartenant à la famille des SODALITES. Elle possède des cavités $6700(\text{\AA})^3$ et $1200(\text{\AA})^3$. Déshydratée à 350° et sous 10^{-5} Torr, la zéolithe 13X a une masse volumique de $1,43 \text{ g/cm}^3$ et une masse molaire de 18391 g. Elle a été disposée dans une couronne enroulée directement sur le foyer. Le foyer à charbon de bois que nous avons utilisé a la forme circulaire. Il est en tôle d'acier doux (Figure 2).

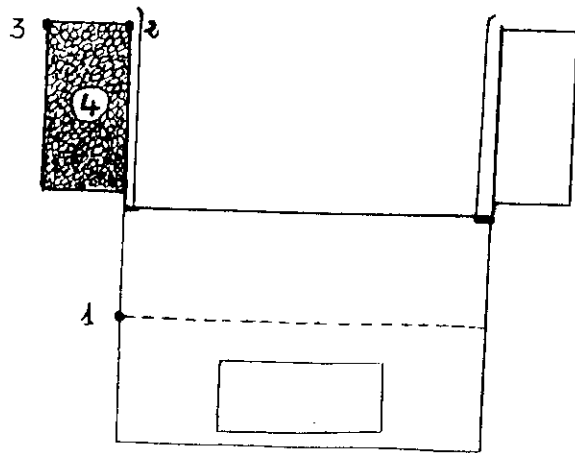


Figure 2 : Ensemble foyer capteur et les différents

Les mesures de températures ont été effectuées aux points 1,2,3 et à l'intérieur de la couche de zéolithes (point 4) (voir schéma).Elles ont été réalisées à l'aide de thermocouples de type T (cuivre - constantan) reliés à l'entrée d'un enregistreur continu à 12 voies de type POLICOMP 2 modèle universel.

La source froide est constituée par l'environnement ambiant.Nous mesurons donc directement la température différentielle.

La charge est une casserole en acier doux contenant un litre d'eau.

Quatre types d'essais ont effectués:

- | | | |
|-----|---------------------------------|-------------|
| 1°) | Sans zéolithe
et sans charge | (-Z , -C) |
| 2°) | Sans zéolithe
avec charge | (-Z , +C) |
| 3°) | Avec zéolithe
et sans charge | (+Z , -C) |
| 4°) | Avec zéolithe
et avec charge | (+Z , +C) |

Toutes les manipulations ont été réalisées le matin pour minimiser l'influence de la température ambiante sur les mesures. La durée de l'expérience est de trois heures.

Le feu est allumé à l'aide de brindilles de bois sec et l'enregistreur est mis en marche après la disparition des flammes. Dans le cas où une charge est utilisée ,celle-ci est posée sur le foyer juste après l'allumage du feu.Nous la retirons après une heure d'ébullition effective. Le contrôle de l'ébullition est réalisé à l'aide d'un thermomètre à mercure; Le volume de l'eau restant dans la casserole est mesuré après refroidissement.

IV - RESULTATS OBTENUS

La figure 3 donne à titre d'exemple l'évolution des différentes températures en fonction du temps $T = f(t)$.

La température monte rapidement dans les premières minutes, se stabilise et décroît lentement jusqu'à la température ambiante (figure 3).

Après avoir retiré la casserole du feu, toutes les températures subissent une augmentation rapide avant de décroître à nouveau. Les valeurs maximales des températures T1, T2, T3 et T4 correspondant de début d'équilibre thermique sont consignées dans le tableau 1.

	(-Z,-C)	(-Z,-C)	(-Z,-C)	(-Z,-C)
T1 (°C)	300	300	300	300
T2 (°C)	200	170	200	130
T3 (°C)	80	60	60	55
T4 (°C)	--	--	110	100

Tableau 1 : températures de début d'équilibre thermique pour les quatre types d'essais.

V - ANALYSE DES RESULTATS

- Il ressort de ces résultats que :
- la charge n'a aucun effet sur la température T1, ce qui est normal vu la position de la sonde au point 1.

- par contre son effet est notable sur T2, T3 et T4.

En effet, lorsque la charge est utilisée, elle joue le rôle de régulateur de température. Celle-ci se faisant par transfert radiatif entre la paroi intérieure du foyer et la casserole maintenue à la température constante d'ébullition de l'eau (100°C). Cet effet régulateur se traduit sur la courbe $T = f(t)$ par un allongement du palier d'équilibre thermique.

- le lit de zéolithe joue un rôle analogue et complémentaire à celui de la charge.

En l'absence de charge, la conjugaison des effets radiatifs et convectifs provoque la montée de la température T2. La température T3 subit une influence plus faible dans ces conditions.

- L'analyse des courbes $\text{Log} T = f(t)$ montre que le refroidissement est plus rapide en l'absence de charge et de zéolithe que dans les autres cas. Ceci s'explique par le fait que dans ces conditions la surface d'échange thermique avec le milieu extérieur est augmentée.

L'effet régulateur de la charge et de la zéolithe est beaucoup plus perceptible à partir de ces courbes (figures 4, 5 et 6).

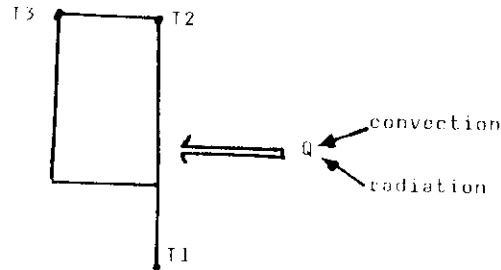
VI - DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'ECHANGE THERMIQUE

Les coefficients d'échange thermique ont été calculés sur la partie descendante de la courbe représentée par la figure 3. Nous l'avons préférée à la phase de montée à cause :

- des flammes non encore éteintes;
- de la prise non homogène du feu à l'intérieur de la couche de charbon;
- de l'humidité des parois du foyer et de la casserole;
- etc ...;

qui sont difficilement contrôlables et inévitables au cours de cette phase.

VI-1 BILAN THERMIQUE



En appelant Q la quantité de chaleur reçue au milieu du réservoir de zéolithe et en supposant que la température est uniforme en tout point le long de la paroi du foyer, nous pouvons écrire:

$$Q + \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} = (h + 1/R_{23}) (T_2 - T_3) \quad (1)$$

$$(h + 1/R_{23}) (T_2 - T_3) - \frac{T_1 - T_3}{R_{13}} = h_e (T_3 - T_0) \quad (2)$$

$$Q + \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} + \frac{T_1 - T_3}{R_{13}} = (T_3 - T_0) \quad (3)$$

avec:

h_g : coefficient global d'échange entre les points 2 et 3

h_e : coefficient global d'échange entre le foyer et le milieu ambiant

T : température ambiante

R_{ij} : résistance thermique entre les points i et j ($i=1,2 ; j=1,3$)

T_k : température au point k ($k=1,3$)

T_0 : température ambiante

$$\text{On pose } h_g = (h + 1/R_{23})$$

VI - 2 MODELE ET RESULTATS

Nous supposons que les coefficients globaux d'échange varient très faiblement avec la température. On les prendra donc constants dans le domaine de température où nous travaillons.

Dans ces conditions, les courbes d'équations respectives :

$$-(T_1 - T_2)/R_{12} = f(T_2 - T_3) \quad \text{et}$$

$$-(T_1 - T_2)/R_{12} - (T_1 - T_3)/R_{13} = f(T_3 - T_0)$$

déduites des équations de bilan (1) et (3) sont des droites de pente h_g et h_e respectivement et d'ordonnée à l'origine $-Q$ (figures 7 à 14).

Les valeurs moyennes de ces coefficients et de la quantité de chaleur Q obtenues graphiquement pour les différents essais sont rassemblées dans le tableau II.

	(-Z, -c)	(-Z, +c)	(+Z, -c)	(+Z, +c)
$h_g \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	14	20	8	9
$h_e \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$	7	8	9	8,5
$Q \text{ W/m}^2$	-46	74	190	190

Tableau II : valeurs moyennes des coefficients globaux d'échange et de la quantité de chaleur Q pour les différents types d'essais.

L'analyse des résultats montre que les valeurs de h_g , h_e et Q sont comparables deux à deux selon que l'on travaille en présence de zéolithe

ou non, avec ou sans charge. L'effet de la zéolithe est ici prépondérant par rapport à celui de la charge. Les valeurs obtenues restent cependant très inférieures à celles rencontrées dans la littérature (1).

En effet, ISMAIL (1) propose pour h_g une valeur de $35 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Cependant la non uniformité des conditions opératoires ne permet pas une comparaison systématique de nos différents résultats. Quatre raisons essentielles semblent expliquer ces résultats :

- ouverture du lit de zéolithe à l'air qui favorise la dissipation de la chaleur transmise à l'air par convection;
- absence de ponts thermiques qui auraient augmenté la surface de transfert de chaleur à travers le lit de zéolithe ;
- facteur différent d'inhomogénéité et de porosité du lit de zéolithe;
- dimension trop réduite du système foyer - réservoir de zéolithe .

Les fortes valeurs de h_g obtenues pour les essais sans zéolithe par rapport aux essais avec zéolithe sont en accord avec les résultats publiés dans les travaux ci-dessus cités.

En effet, il semble qu'en présence de zéolithe le transfert de chaleur du point 2 au point 3 se fait presque exclusivement par conduction alors qu'en l'absence de zéolithe les trois modes principaux de transfert (conduction, convection, radiation) co-existent.

Enfin la quantité de chaleur Q présente une particularité pour les essais effectués en l'absence de zéolithe et de charge.

En effet, pour ces types d'essais, Q a une valeur négative. Ce qui traduit le fait que dans ce cas, la chaleur s'écoule de la paroi du foyer vers le centre de celui-ci. La conduction à travers la paroi est prépondérante vis à vis des effets conjugués de la convection et du rayonnement.

L'influence de la zéolithe et de charge sur Q est beaucoup plus

.../...

complexe à définir et nécessite pour ce faire des expériences complémentaires.

VII - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons pu également apprécier l'influence des différentes conditions expérimentales sur l'évolution de la température aux différents points de mesure choisis pour les expériences, en particulier le rôle régulateur joué par la charge et le lit de zéolithes. Cet effet régulateur a pour conséquence immédiate l'allongement de la durée de refroidissement, paramètre très important pour la réalisation du système de réfrigération thermique que nous étudions.

En effet, la production de froid doit se faire de façon intermittente après chaque cuisson. Ceci a l'avantage d'assurer une production de froid presque continue permettant ainsi une bonne conservation des aliments.

Cette possibilité offerte par la source d'énergie thermique que constitue le foyer est un argument de poids en faveur de notre système vis à vis du système comprenant un capteur solaire dont le fonctionnement est assujéti aux aléas climatiques et à la seule intermittence jour-nuit.

De ce fait la durée de refroidissement doit être suffisamment courte de façon à permettre le déroulement complet du cycle dans l'intervalle de temps séparant deux cuissons consécutives (environ 300mn). Il serait donc intéressant de prévoir une circulation d'eau à l'intérieur du lit de zéolithes pour abaisser de manière significative ce temps. Cette eau peut être utilisée pour les besoins domestiques de la famille. C'est donc une voie de réduction de la consommation familiale en combustible.

Nous avons aussi observé que la température à l'intérieur du lit de zéolithes reste constante. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par ISMAIL (1). Cependant des points de prise de température seront prévus sur le premier prototype pour vérifier ce résultat.

L'analyse de la figure 1 décrivant le cycle thermodynamique théorique montre que de réfrigération par adsorption solide est entièrement définie par la donnée de deux paramètres:

... / ...

- la température de l'évaporateur (T_{ev}),
- et la température de fin de désorption (T_g),

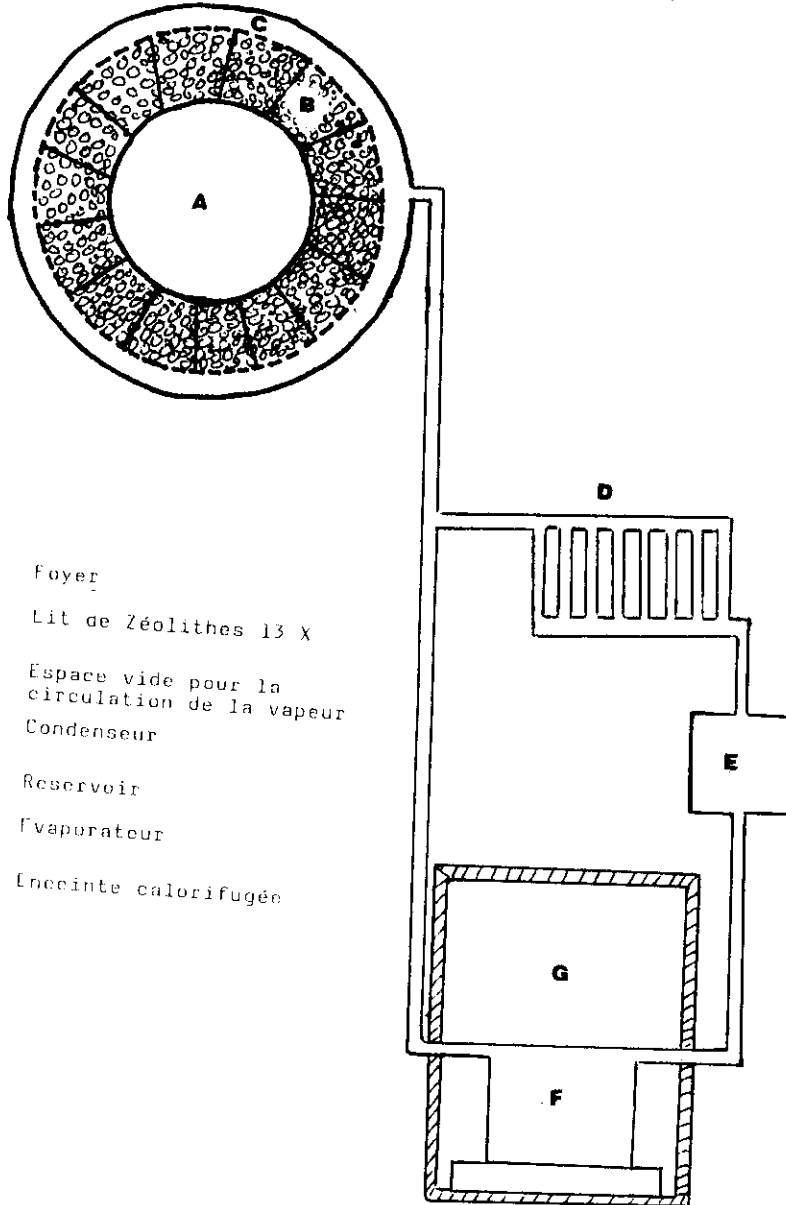
dès lors que l'on connaît un réseau d'isostères du couple adsorbant-adsorbat (2,3,4). En effet, le cycle étant défini, nous pouvons déterminer graphiquement la quantité d'eau cyclée ce qui permet de dimensionner l'ensemble des éléments du système.

La détermination des coefficients globaux d'échange, quoiqu'approximative, nous donne une idée de l'ordre de grandeur de ceux-ci.

A N N E X E

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - ISMAH, I. " Contribution à l'étude d'une pompe à chaleur utilisant le couple zéolithe - eau ".Thèse de Doc. présenté à l'Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris,(1983).
- 2 - DUBININ,M. M. : "Adsorption in micropores".Journal of Colloid and Interface Science,(1967).23,487-499.
- 3 - POLANYI,M. : " Vverhandt Deut.Phys.Ges. (1914),16, 1012
- 4 - ISMAH, I.,KARAGIURGAS,M.,MCUNIER,F.,RIOS,J. : " Test results of a Zeolite -Water pump".
A paraître Int. Rev. of Amb. En.



- A :** Foyer
B : Lit de Zéolithes 13 X
C : Espace vide pour la circulation de la vapeur
D : Condenseur
E : Réservoir
F : Évaporateur
G : Enceinte calorifugée

DONNEES EXPERIMENTALES

Dimension du foyer : $D = 210 \text{ mm}$; $H = 250 \text{ mm}$

Réservoir de Zéolithe : $D_i = 212 \text{ mm}$; $D_e = 305 \text{ mm}$; $H = 70 \text{ mm}$

Quantité de Zéolithe : 1962,3 g

Poids du foyer et de ses accessoires : 2885,6 g

$R_{12} = 4,442 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$

$R_{13} = 7,432 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$

$R_{23} = 9,432 \text{ W/ } ^\circ\text{C}$

Surface extérieur du système foyer-réservoir de zéolithe : $0,112 \text{ m}^2$

Surface intérieure du foyer : $0,0092 \text{ m}^2$

Quantité de charbon par expérience : 100 g

Conductivité thermique de la tôle d'acier : $46 \text{ W/ m } ^\circ\text{C}$

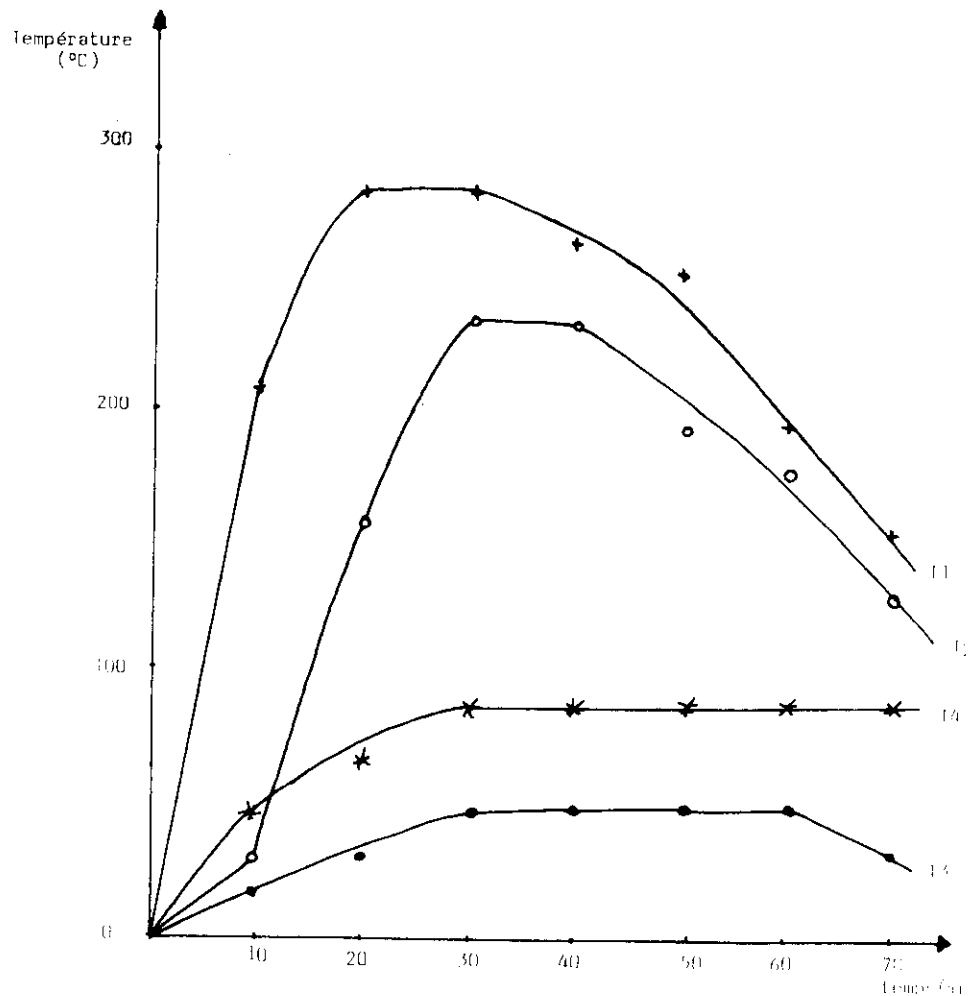
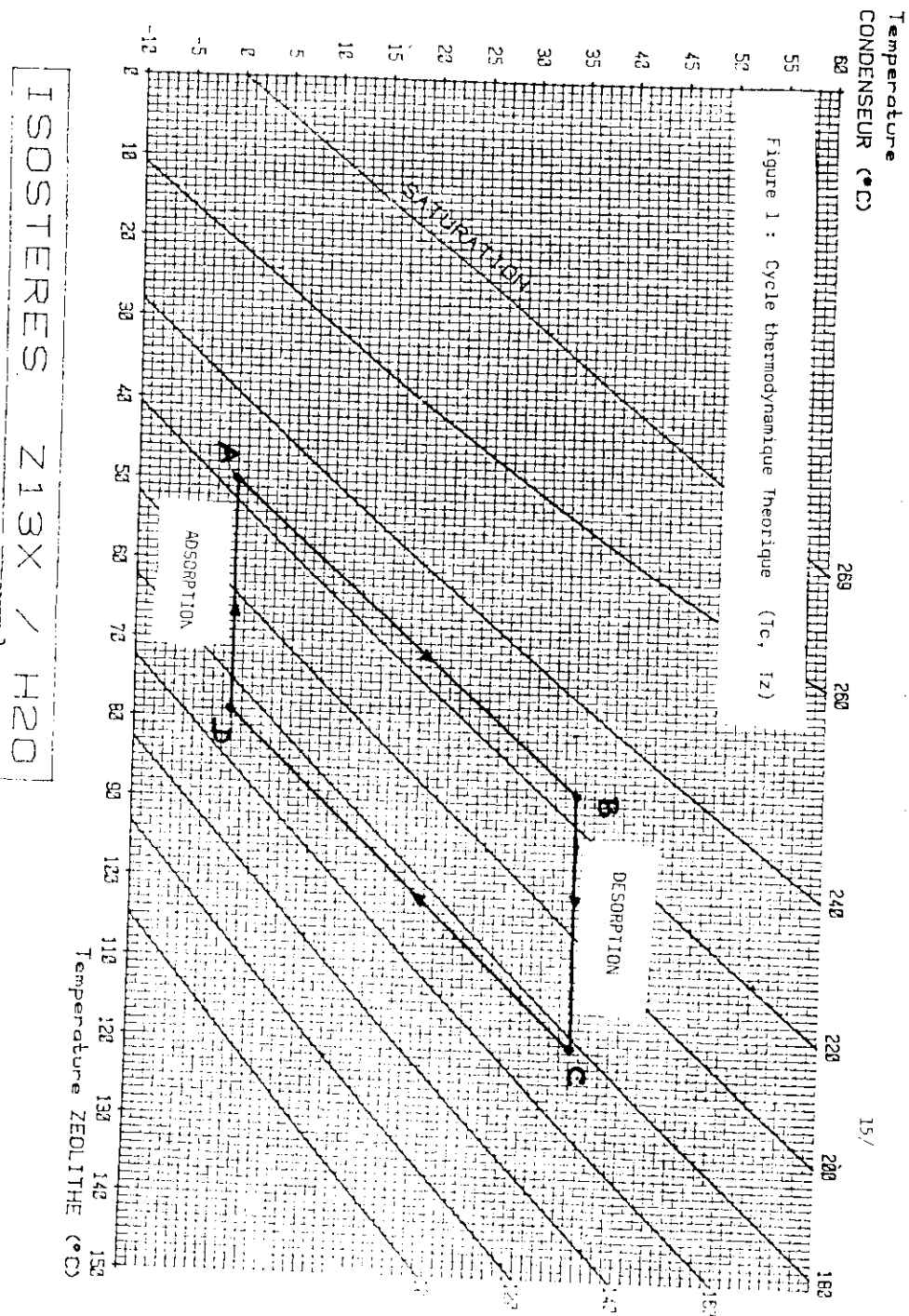


Figure 5 : Evolution des températures T1, T2, T3, T4 en fonction du temps.



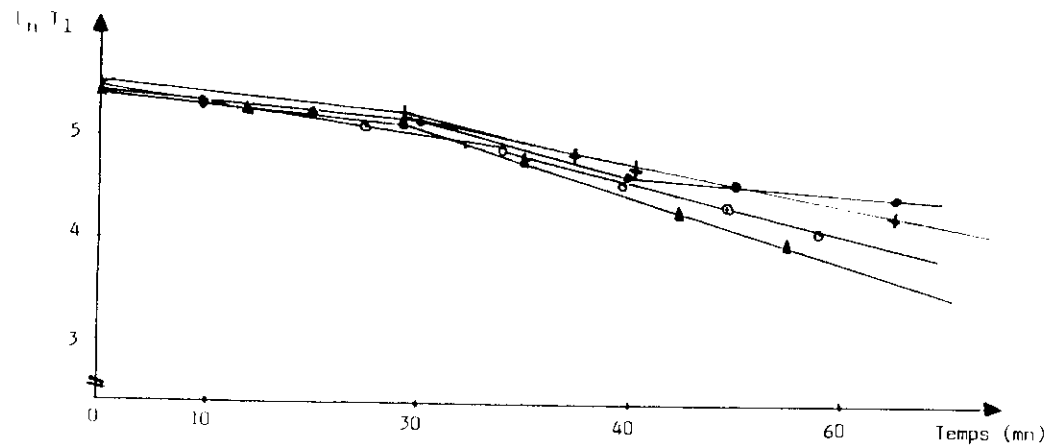


Figure 4 : Variation logarithmique de I_1 en fonction du temps.

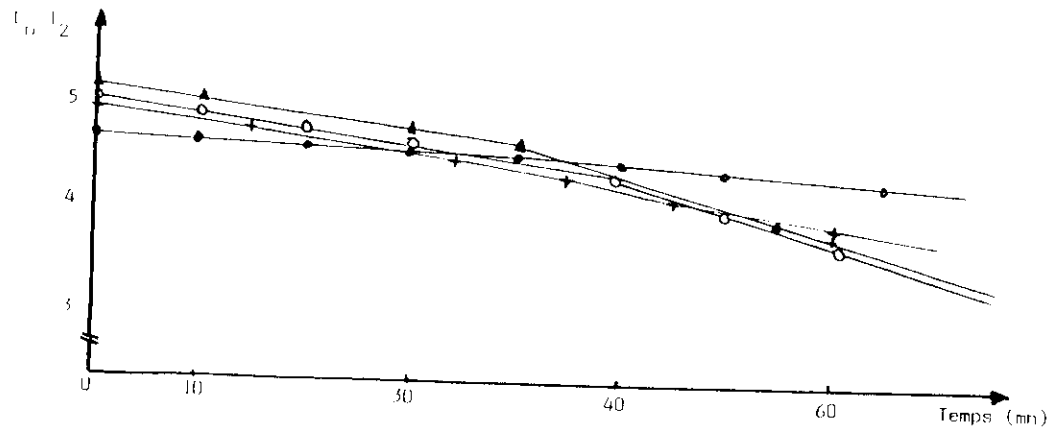


Figure 5 : Variation logarithmique de I_2 en fonction du temps.

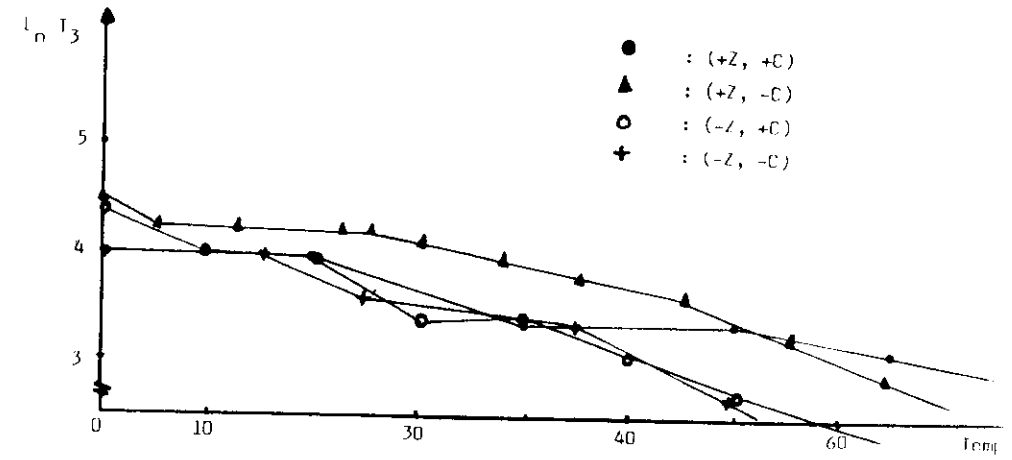
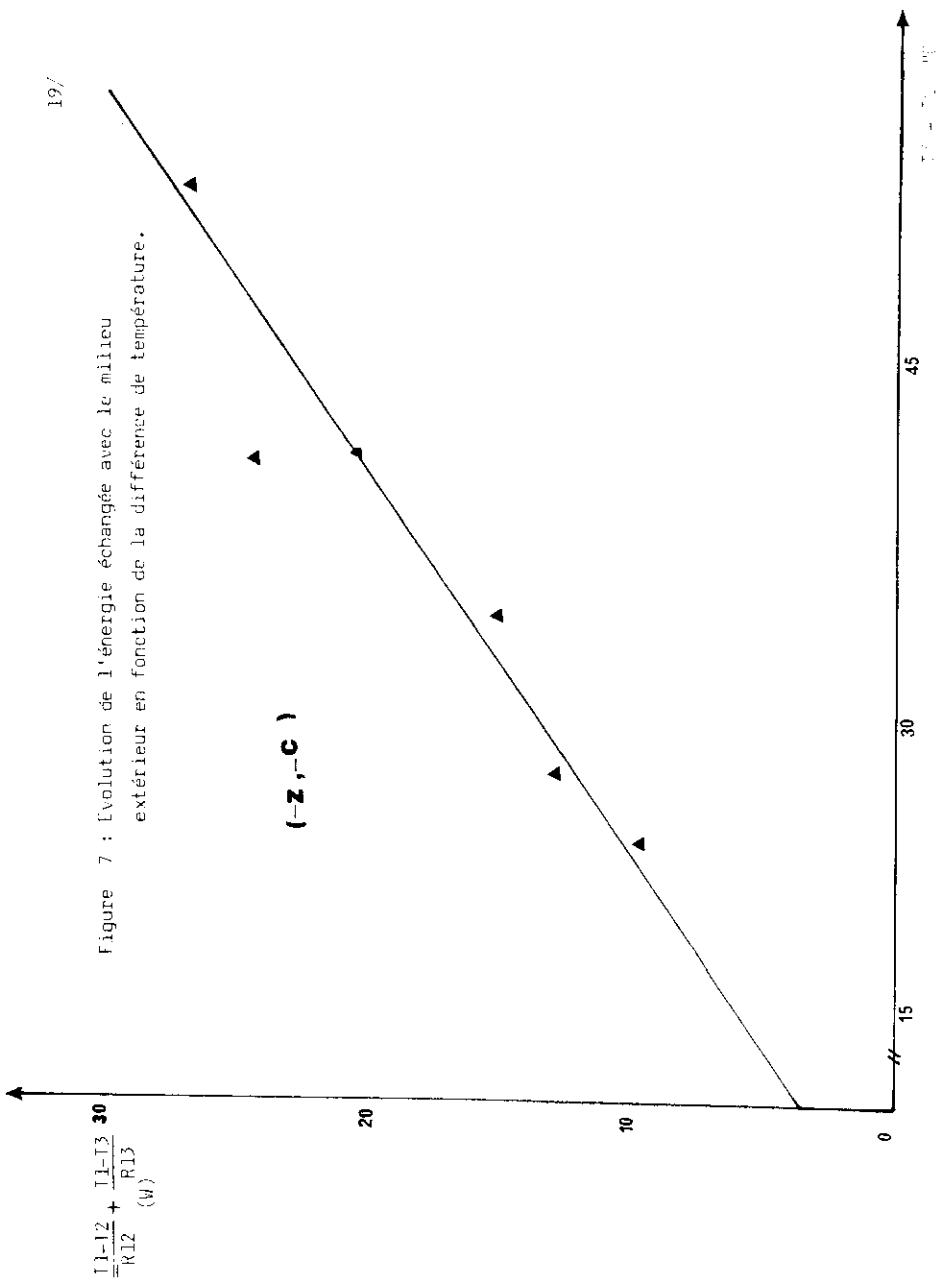
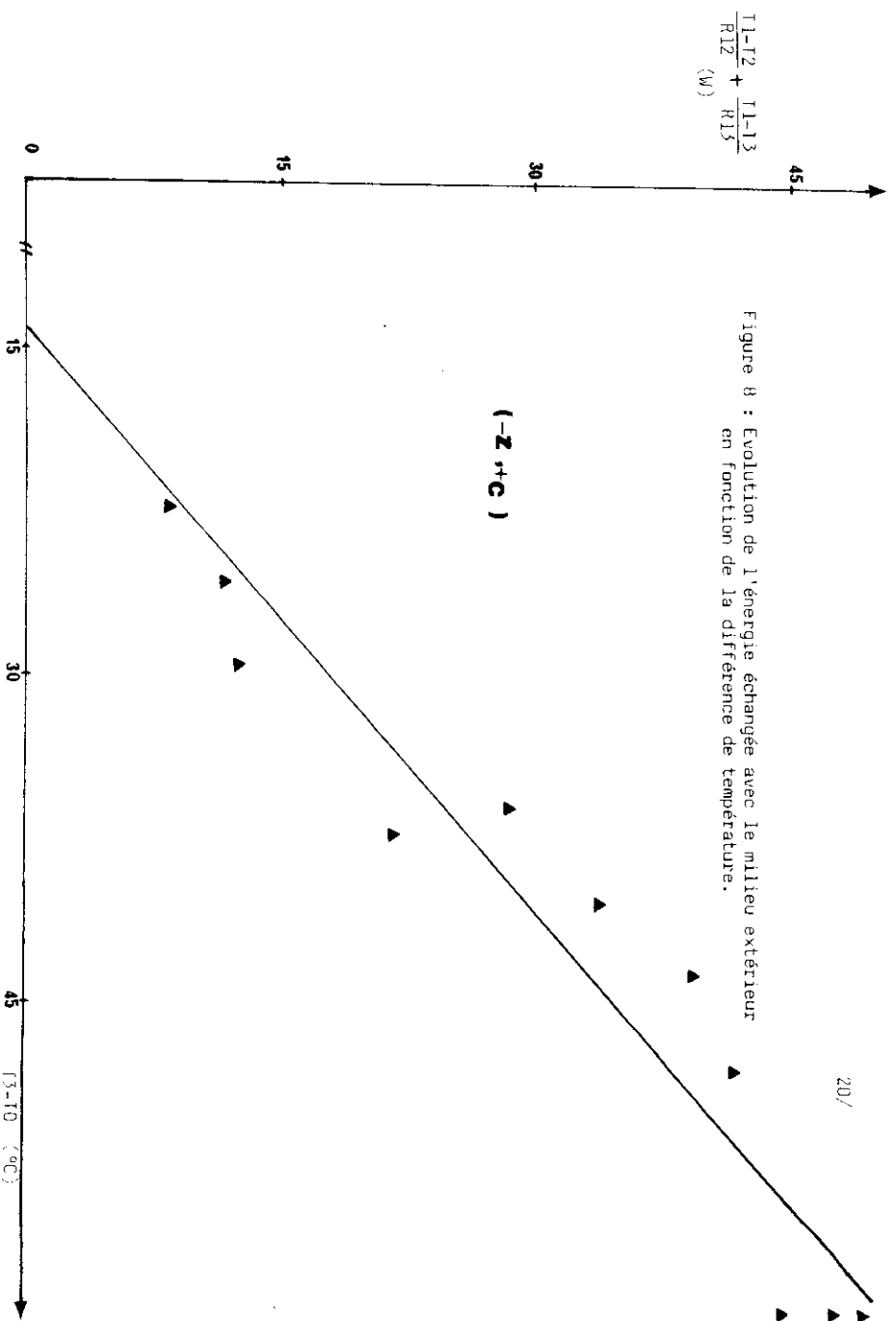


Figure 6 : Variation logarithmique de I_3 en fonction du temps.



/61



20/

