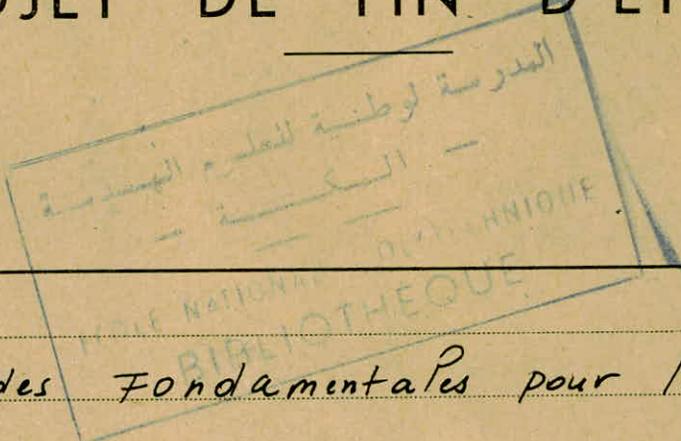


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

2<sup>ex</sup>

DEPARTEMENT GÉNIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES



Sujet :

Études Fondamentales pour la captation  
et l'accumulation de l'énergie solaire.

Proposé par : M<sup>B</sup> SANDIE

Etudié par : MALEK OUMELKHEIR

## REMERCIEMENTS

=====

- Je remercie beaucoup mon promoteur, Mr Sandle ainsi que Mlle Alia, Chef de notre département pour leur coopération et leur aide pour l'exécution de cette étude.
- Mes remerciements au président du jury, Mme NEZZAL aux membres du jury : Mlle Alia, Mr Galinski, Mme Amanovitch pour leur entreprise de jugement de mon travail.
- J'exprime ma reconnaissance à Mlle Benwagueff Sabiha du Centre de l'énergie solaire de Bouzaréah pour ses conseils salutaires.
- Mes remerciements les plus profonds à toutes mes assistantes qui ne se sont pas lassées de me soutenir moralement.
- Je remercie mes professeurs du génie-chimique et surtout Mr Bellabès qui a donné le meilleur de lui même pour m'encourager à bien faire.
- Merci à toutes les personnes, qui, de loin ou de près, ont contribué à mon étude.
- Merci à mon fiancé Aissa, à son ami Ali et sa femme Hinda, à son ami Djelloul, et à mes camarades Aicha, Fadila, Lila, Hamida, pour le courage qu'ils ont tous su fortifier en moi.

## DEDICACES

### JE DEDIE CETTE HUMBLE ETUDE

- à mon très chère père qui a su m'insuffler l'amour du travail, la volonté de parfaire, la notion du "non impossible" dès mon jeune âge et qui en surcroît a su me montrer une compréhension sans bornes durant toutes mes longues années d'études,
- à ma mère et mes grands parents pour leurs sacrifices innombrables,
- à mon très chère Fiancé Aissa pour sa tendresse, son aide efficace et son soutien moral,
- à mes frères et soeurs qui m'ont toujours secondée et encouragée,
- à toute ma famille grands et petits,
- à tous mes professeurs et assistants,
- à mes amis Ali et sa femme Hinda et Djelloul
- à toutes les amies et camarades qui m'ont entourée.

QUE DIEU FASSE QUE CE TRAVAIL SOIT POURSUIVI PAR BEAUCOUP D'AUTRES  
ET QU'IL SERA PLUS FRUCTUEUX ET PLUS RENTABLE.

- SOMMAIRE -

(A) PARTIE THEORIQUE

- I - INTRODUCTION
- II - LE CORPS NOIR
  - II - 1 - DEFINITION
  - II - 2 - LE POUVOIR EMISSIF
- III - LE RAYONNEMENT SOLAIRE
  - III - 1 - CONSTITUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE
  - III - 2 - EVALUATION DE L'ENERGIE EFFECTIVEMENT RECUE PAR UN CAPTEUR
  - III - 3 - APPAREILS DE MESURE
- IV - LES CAPTEURS SOLAIRES
  - IV - 1 - DEFINITION
  - IV - 2 - LA CONSTITUTION D'UN CAPTEUR SOLAIRE
    - IV - 2 - 1 - ROLE DE LA SURFACE ABSORBANTE
    - IV - 2 - 2 - ROLE DE L'ISOLATION THERMIQUE
    - IV - 2 - 3 - ROLE DE LA COUVERTURE TRANSPARENTE
      - IV - 2 - 3 - 1 - L'EFFET SERRE
      - IV - 2 - 3 - 2 - INFLUENCE DU NOMBRE DE VITRES UTILISEES
        - IV - 2 - 3 - 2 - 1 - NOTION DE TRANSMITTENCE
        - IV - 2 - 3 - 2 - 2 - NOTION DE REFLEXION
    - IV - 2 - 4 - ROLE DU FLUIDE CALOPORTEUR
  - IV - 3 - LE RENDEMENT D'UN CAPTEUR
- V - ACCUMULATEURS
  - V - 1 - INTRODUCTION
  - V - 2 - LA CHALEUR SENSIBLE
  - V - 3 - CHALEUR LATENTE
  - V - 4 - CARACTERISTIQUES DE L'ACCUMULATEUR
  - V - 5 - PERTE DE L'ACCUMULATEUR
- VI - LE CHAUFFE EAU SOLAIRE

(B) PARTIE EXPERIMENTALE

## I - INTRODUCTION .

Le soleil inondant la planète "terre" d'un flot de lumière chargé d'énergie nous procure luminosité et chaleur. Se concentrant dans le bois, assurant la photosynthèse aux plantes, la vie aux animaux qui en dépendent, l'énergie solaire est en fait la plus ancienne source d'énergie connue aussi bien par l'homme que par la nature.

Pourtant, ce que nous recevons de cet astre n'est autre que le dix-milliardième de l'énergie réellement émise, mais toujours est-il que cette petite portion d'énergie est dix fois plus grande que toutes les réserves connues en énergies fossiles ( charbon, pétrole, gaz) y compris l'uranium.

Autrefois, incapable de la stocker, l'homme a été contraint de rechercher d'autres sources énergétiques aptes à le satisfaire à tout moment. Ainsi il pensa au bois, au charbon puis ce fut la découverte du pétrole (dit roche noire XII siècle par les anglais) et du gaz qui avec eux, une nouvelle ère commença.

Pourvus d'exceptionnelles qualités de concentration d'énergie (1 M<sup>3</sup> de produit pétrolier équivaut à 13 000 thermies), d'un pouvoir calorifique élevé, d'une facilité de mise en oeuvre et stockage, ils jouissent d'une popularité sans pareille; même actuellement, le mode de vie d'un pays est conditionné par sa consommation en pétrole et gaz. ( d'autant plus qu'il consomme de l'énergie et d'autant plus que son mode de vie est élevé).

La consommation grandiose des combustibles fossiles par certains pays ( en particulier les USA) risquent de provoquer une pénurie dans les années à venir et ainsi pousser l'homme à recourir soit au charbon, soit aux énergies nouvelles ( énergie solaire, éolienne, hydraulique etc ...).

Le charbon, malgré sa disponibilité dans le monde entier, ne doit pas être trop utilisé vu la pollution atmosphérique qu'il crée ; des études faites en 1977 par l'US National Academy Of Sciences prévoient qu'au cours des deux siècles à venir la teneur en CO<sub>2</sub> dégagé par la combustion des combustibles fossiles, en particulier le charbon, s'accroîtrait de 4 à 8 fois ( le CO<sub>2</sub> fait que la chaleur rayonnée par la terre est ralentie, ce qui élève sa température ainsi que celle de l'atmosphère, d'où résultent alors des effets catastrophiques sur le climat, les conditions atmosphériques, la pluviosité, le niveau des océans et l'agriculture).

On pense et d'une manière assez accentuée à l'utilisation soit de l'énergie nucléaire, soit de l'énergie solaire.

Le caractère aléatoire, l'intermittance de cette dernière, donc sa non disponibilité aux moments où on en a le plus besoin (par ex. en hiver) font qu'on s'évertue à chercher des matériaux capables de la stocker et l'employer comme bon nous semble .

Des panneaux solaires dont la captation est régie par l'effet sèbre sont construits pour le chauffage des habitants et celui de l'eau sanitaire dans beaucoup de pays tels que Japon, Israël, Australie etc ..

Des pompes solaires abondent (réalisées par Mongin Sofretes installées dans les oasis, France) .

Des cellules photovoltaïques sont prévues pour l'an 2050, des chaudières électro solaires ( USA, Europe ) sont en voie de réalisation dans le but de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire captée etc ..

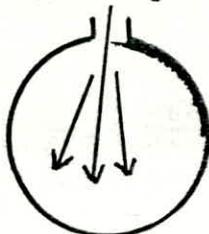
Les applications de l'énergie solaire n'étaient que du bricolage, on ne se souciait ni du rendement ni de l'esthétique, l'essentiel résidait en la récupération d'une certaine quantité d'énergie, aujourd'hui, le problème est d'optimiser les rendements des moyens utilisés pour la captation, (les investissements bien sûr seront plus considérables - surfaces de captation assez grandes, écrans réflecteurs etc .. - ) .

Le but de notre étude consiste à tester deux matériaux qu'on a choisis comme accumulateurs : l'eau et la paraffine, que nous plaçons alors dans un récipient

## II- LE CORPS NOIR

### II - 1 - DEFINITION :

Le corps noir est un concept théorique, approché pratiquement par une enceinte sphérique creuse percée d'un petit trou et qui a pour rôle d'absorber tout le rayonnement qui la pénètre :



Il est pris habituellement comme référence pour l'évaluation des quantités d'énergies émises par les corps naturels, et ceci à l'aide des facteurs d'émission déterminés par expérience.

### II - 2 - LE POUVOIR EMISSIF :

Le pouvoir émissif ou l'émittance  $E^\circ$  d'un corps noir est la quantité d'énergie qu'il rayonne par unité de temps et par unité de surface.

$$E^\circ = \frac{d\phi}{dS} \quad \text{OU} \quad \begin{cases} d\phi : \text{flux énergétique émis en watts} \\ dS : \text{aire du corps noir en } M^2 \end{cases}$$

Il est donné par la loi de Stefan Boltzmann (1879)

$$E^\circ = \sigma T^4 \quad (\text{en } W/M^2) \quad (1)$$

$\sigma$  = est de Stefan Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} W/M^2 K^4$ .  
T = température absolue du corps noir.

$E^\circ$  désigne l'émittance totale, c'est à dire celle concernant l'ensemble du spectre émis. On définit aussi une émittance énergétique monochromatique qu'on désigne  $E^\circ_\lambda$  ~~et  $E^\circ_\lambda$~~ , elle s'intéresse aux radiations comprises entre  $\lambda$  et  $\lambda + d\lambda$

elle est donnée par la relation de Planck (1900)

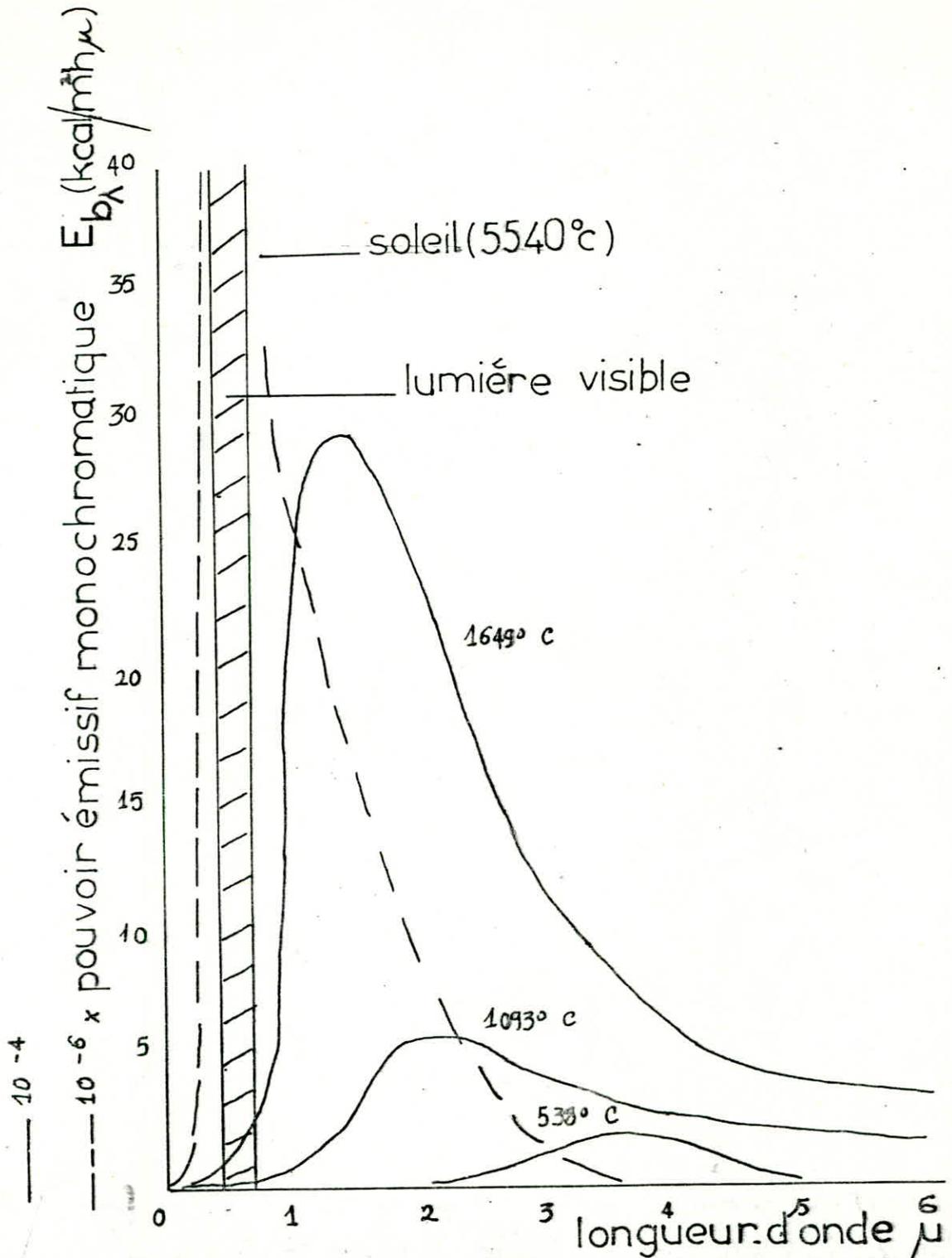
$$E^\circ_\lambda = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2 / \lambda T} - 1) \quad (\text{Watts}/M^2) \quad (1)$$

$$\text{OU} \quad \begin{cases} C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} W/M^2 \\ C_2 = 14388 \cdot 10^{-6} M K \end{cases}$$

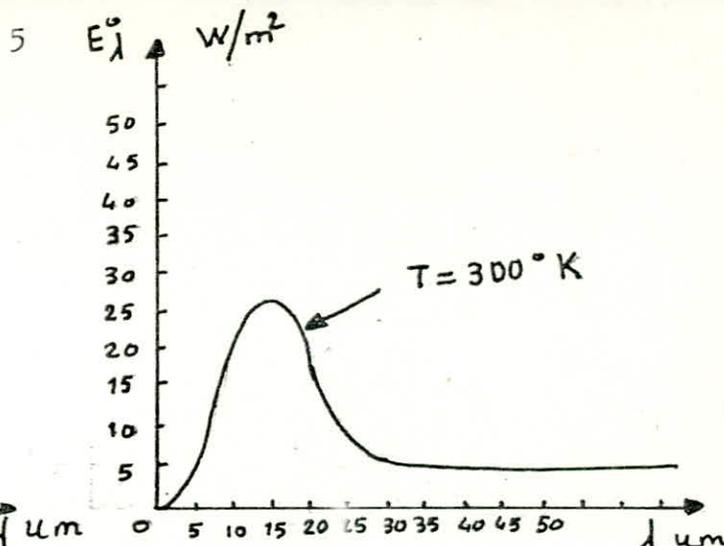
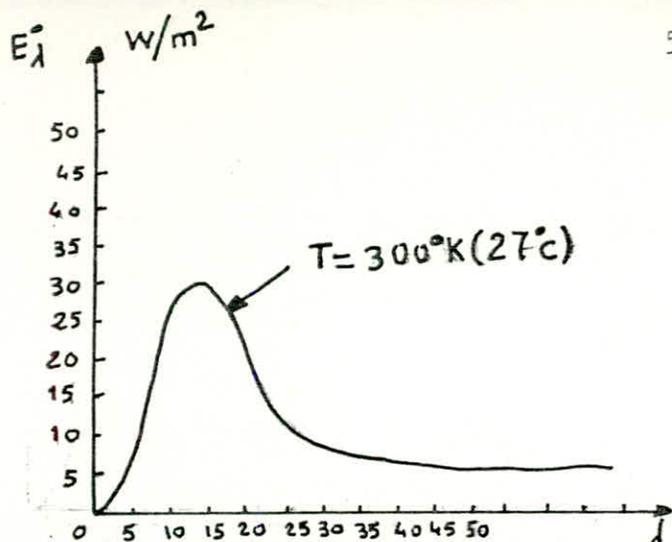
L'émittance totale peut être définie d'une autre manière, en introduisant  $E^\circ_\lambda$  :

$$E^\circ = \int_0^\infty E^\circ_\lambda d\lambda$$

a/ En traçant  $E^\circ_\lambda$  en fonction de  $\lambda$  pour une température connue. On constate une émittance maximum  $E^\circ_\lambda \text{ max}$ . Normalement en mathématiques, toute l'aire hachurée représente  $E^\circ$ , mais on peut approximativement dire que  $E^\circ$  n'est représentée que par une bande étroite autour de  $\lambda \text{ max}$  (correspondant à  $E^\circ_\lambda \text{ max}$ ).



— répartition spectrale du pouvoir monochromatique pour un radiateur idéal ou corps noir aux différentes températures —



- Répartition spectrale des émissions d'un corps noir à 300°K.

On peut dire que le rayonnement émis par une température donnée du corps noir est caractérisé par la longueur d'onde  $\lambda_{max}$ .  
 Connaissant la température du corps noir, on peut déterminer  $\lambda_{max}$  grâce à la première loi de déplacement (loi de Wien)

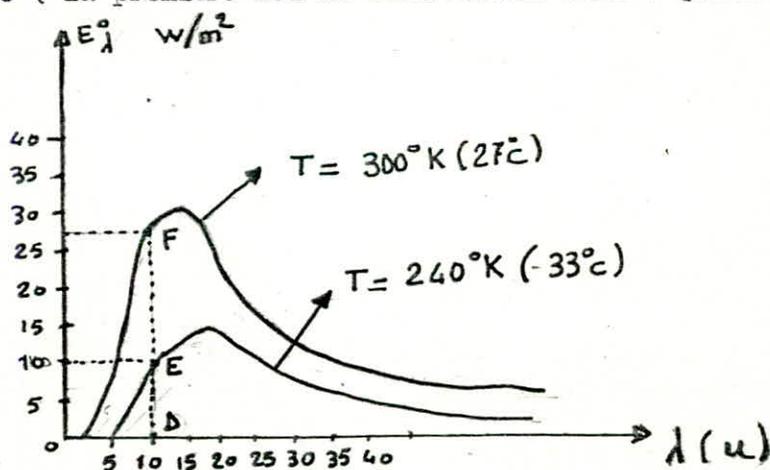
$$\lambda_{max} T = 2898 \text{ avec } \lambda_{max} \text{ en } \mu \text{ et } T \text{ en K.}$$

b - En traçant  $E_{\lambda}$  en fonction de  $\lambda$  pour diverses températures :

Les constatations se résument en :

b-1 ) Pour une longueur d'onde donnée, toute augmentation de température s'accompagne d'une augmentation du pouvoir émissif. (Voir figure plus bas).

b-2 ) Toute augmentation de température s'accompagne d'un déplacement vers les courtes longueurs d'onde ( la première loi de Wien révèle cela : quand  $T \nearrow$ ,  $\lambda_{max} \searrow$  )



Remarque :

Le facteur d'émission  $\epsilon$  d'un corps noir est égal à 1 . Ce facteur est très important à connaître dans le cas de corps naturels car il les caractérise. Pour ces derniers il varie entre 0 et 1 .

$\epsilon$  est d'autant plus proche de 1 que le corps a une surface foncée ( c'est à dire verdâtre, marron, rouge, bleu ....).

La comparaison de deux graphes représentatifs des pouvoirs émissifs en fonction de  $\lambda$  de deux corps, dont l'un seulement est un corps noir, révèle que ce dernier a la plus grande valeur de  $E_{\lambda}$ , pour une température déterminée et quelque soit la valeur de  $\lambda$  .

$\epsilon$  = le rapport entre le pouvoir émissif du corps considéré à celui du corps noir pris dans les mêmes conditions opératoires (même forme et même température).

Exemple : un corps noir à  $100^{\circ}\text{C}$  émet  $1100 \text{ Watts au } \text{M}^2$

Une surface de coefficient  $\epsilon = 0,6$  n'en émettra que les 60%

Soit :  $\epsilon \cdot 1100 = 0,6 \times 1100 = 660 \text{ Watts/M}^2$

### III - LE RAYONNEMENT SOLAIRE

#### III - 1 : Constitution du rayonnement solaire

La partie principale du rayonnement solaire est constituée d'une gamme continue de radiations s'étendant de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $24 \mu\text{m}$  provenant d'une partie du soleil nommée photosphère.

L'énergie solaire provient de réactions nucléaires multiples se faisant au sein du soleil, une partie de cette énergie sert à lui maintenir sa température (qui a été estimée à  $6000^{\circ}\text{K}$  environ(3)) et le reste est envoyé à l'espace. Son comportement hors atmosphère est tel que pour les longueurs  $\lambda$  supérieures à  $1,2 \mu\text{m}$ , le spectre solaire coïncide avec celui d'un corps noir dont la température égaliserait celle du soleil; cependant il diffère de lui notablement dans le domaine du visible et de l'ultraviolet (Voir schéma).

Le rayonnement solaire est en fait composé de deux types de rayonnements : rayonnement direct et rayonnement diffus dont la somme se nomme rayonnement global.

Le rayonnement direct diffère du diffus par le fait que ce dernier subit l'influence de la couche atmosphérique " les gaz contenus dans l'atmosphère le diffusent, l'absorbent et le réfléchissent" alors que l'autre parvient entièrement au sol ; aussi le rayonnement diffus intervient seul dans le cas d'un ciel nuageux (les nuages alors constituent une sorte de rempart pour le rayonnement direct et par conséquent l'annulent).

#### Remarque :

Pour le soleil considéré comme corps noir à  $6000^{\circ}\text{K}$ ,  $\lambda_{\text{max}}$  calculé d'après le 1ère loi de Wien, est de  $0,5 \mu$ . C'est aux alentours de cette valeur, que la quantité d'énergie émise par le soleil est la plus grande ( en effet, c'est entre  $0,4 \mu$  et  $3 \mu$  que le soleil émet les 90% de son rayonnement) (voir schéma ci-après).

Les longueurs d'onde inférieures à  $0,3 \mu$  sont arrêtées par l'ozone qui joue le rôle d'écran filtrant. Ces longueurs d'onde étant nocives pour la vie terrestre, aussi l'ozone est-il considéré comme un bienfaiteur et on ne reçoit donc pas les 90% du rayonnement émis par le soleil mais bien moins.

#### III - 2 : Evaluation de l'énergie effectivement reçue par un capteur.

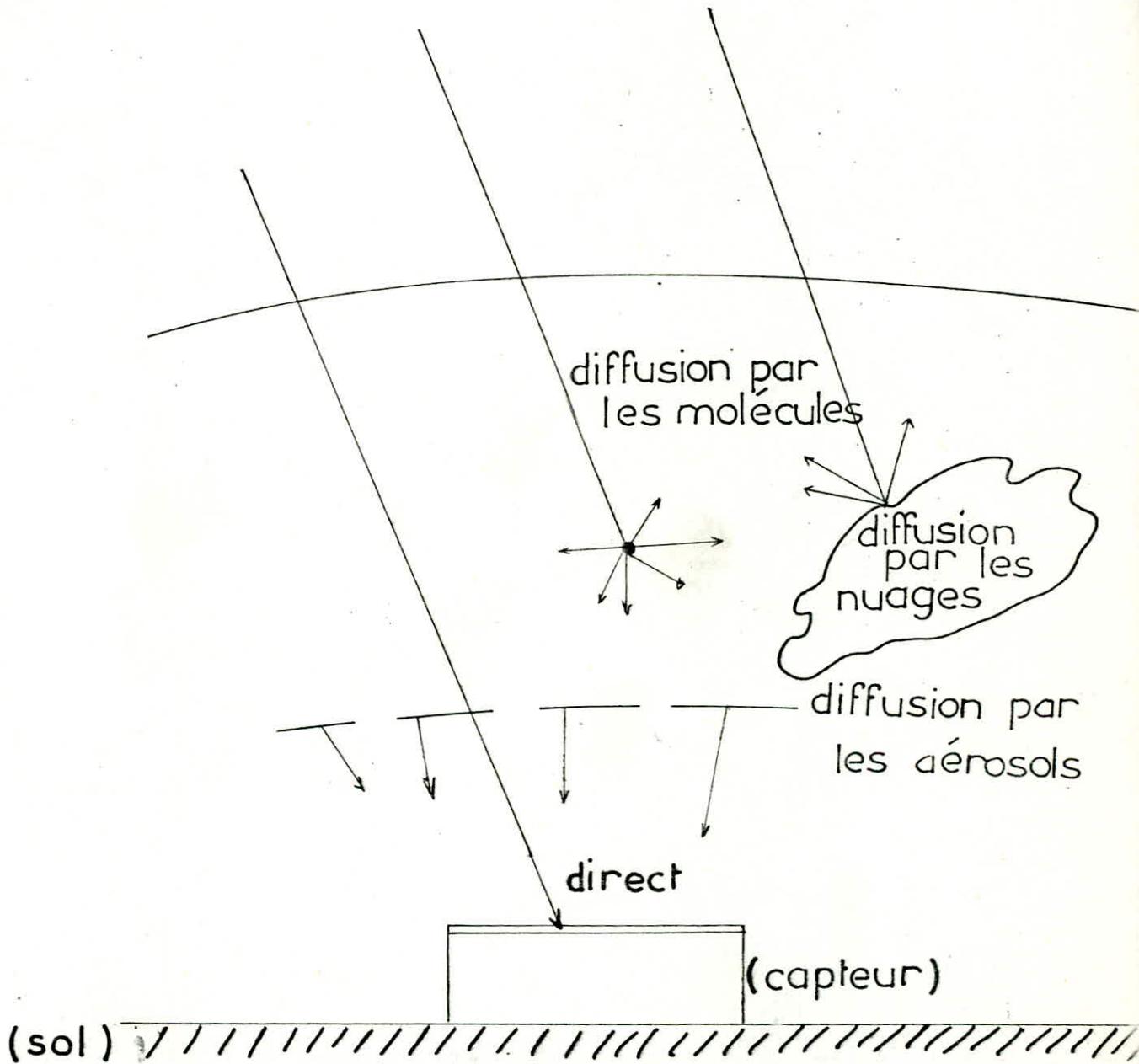
Les variations du rayonnement reçu dépendent de la durée de l'ensoleillement, de la couche atmosphérique traversée, de l'inclinaison des rayons, de la nébulosité (nuages et brouillard) et de la position du capteur ainsi que de celle de son environnement. Ainsi, il est assez complexe de déterminer avec exactitude l'énergie que peut recevoir une surface donnée pendant une certaine période à venir, généralement les raisonnements se font sur des moyennes calculées par la météorologie à partir des relevés qu'elle fait sur des années.

On peut toutefois faire un bilan énergétique global pour le calcul de l'énergie réellement acquise par la terre (ceci avant de procéder à l'évaluation de celle gagnée par un corps naturel).

Deux parties existent dans ce bilan :

#### - Une partie positive :

formée par le rayonnement global ( rayonnement direct + rayonnement diffus) et le rayonnement de l'atmosphère dûs aux gaz ( qui en s'échauffant, ce chauffage étant dû à l'absorption des infra-rouges) émettent à leur tour.



- schéma représentatif de l'effet de la couche atmosphérique sur le rayonnement solaire -

(3)

-- Une partie négative :

Composée par l'énergie réfléchiée par le sol (ALBEDO) et les nuages, ainsi que les pertes par rayonnement tellurique.

La luminance énergétique L exprimée en Watts/M<sup>2</sup> correspondant à la différence du rayonnement dirigé vers le sol et celui provenant du sol, est donnée par :

- La formule d'ANGSTROM (ceci par ciel clair et en tenant compte de la vapeur d'eau existente.

$$(2) \quad L = \sigma T^4 (a + b e^{-cf}) \quad \text{ou} \quad \begin{cases} a = 0,18 \\ b = 0,25 \\ c = 0,095 \end{cases}$$

F = Tension de vapeur de l'eau à T (en mb)

- La formule de BRUNT.

$$(2) \quad L = \sigma T^4 (a' - b' \sqrt{f}) \quad \text{ou} \quad \begin{cases} a' = 0,4 \\ b' = 0,05 \end{cases}$$

### III - 3 - APPAREILS DE MESURE.

Les différents appareils utilisés pour mesurer le rayonnement solaire sont :

- Le pyranomètre : utilisé en compagnie d'un enregistreur et d'un dispositif intégrateur. Il sert surtout pour mesurer le rayonnement global reçu par une surface plane. Il est conçu généralement de telle manière qu'il peut recevoir tout le rayonnement.
- Le pyréliomètre : il sert surtout à la mesure de l'énergie solaire reçue par une surface perpendiculaire aux rayons solaires.
- Le pyranomètre à thermopile : (même principe que le pyranomètre).

### IV - LES CAPTEURS SOLAIRES :

#### IV - 1 - DEFINITION :

Comme son nom l'indique, un capteur solaire est un appareil conçu pour la captation de l'énergie solaire et sa transformation en énergie thermique. Il est également appelé insolateur.

L'énergie est généralement utilisée pour :

- chauffage des habitations
- séchage des grains
- fourniture d'eau chaude sanitaire
- fonctionnement de moteurs thermiques produisant de l'énergie mécanique ou de l'électricité
- alimentation des machines de réfrigération destinées au conditionnement de l'air ou à la conservation des aliments

#### IV - 2 - La constitution d'un capteur solaire :

Un capteur solaire est constitué de quatre éléments principaux :

- d'une surface absorbante dans sa forme la plus simple, elle consiste en une plaque peinte en noir qu'on expose au soleil.
- d'un couvercle fait généralement en une matière transparente au rayonnement solaire tel que le verre, les films plastiques par exemple.
- d'une isolation thermique latérale et arrière limitant les pertes par conduction.
- d'un circuit de fluide destiné à l'évacuation des calories gagnées vers le lieu d'utilisation ou de stockage. ( le fluide étant alors appelé caloporteur).

#### IV - 2 - 1 - Rôle de la surface absorbante :

La surface absorbante est un élément très important de l'insolateur, puisqu'elle a pour rôle la captation de l'énergie solaire. Aussi elle doit être pourvue d'un bon pouvoir absorbant et d'un facteur émissif proche de celui du corps noir et d'un coefficient de réflexion faible, c'est pourquoi, elle est généralement faite en métal recouvert d'une peinture mate ou foncée

- mate pour éviter les réflexions.
- foncée (couleur noire, marron, rouge, vert etc ),

pour satisfaire aux deux caractéristiques fondamentales de la surface absorbante citée plus haut.

La peinture peut atteindre des températures avoisinantes de 100 à 110°C sous l'effet du soleil, aussi elle doit être résistante et mise en couches très minces car c'est une matière plutôt isolante que conductrice de chaleur.

Les métaux utilisés sont soit de l'acier soit du cuivre ( pour des raisons économiques ce dernier est peu utilisé ). L'aluminium est à éviter car il provoque des phénomènes de corrosion assez rapides. < voir (9) types de surfaces absorbantes >

#### IV - 2 - 2 - Rôle de l'isolation thermique :

L'isolation thermique de l'insolateur doit être bonne pour pouvoir récupérer le maximum de l'énergie captée par l'absorbeur. Elle est assurée comme son nom l'indique, par des corps isolants caractérisés par une faible conductibilité thermique et par une épaisseur appréciable. Les corps souvent utilisés sont :

- la laine de verre. ( elle présente un inconvénient, quand elle est humide elle devient conductrice ; aussi pour éviter les pertes de chaleur lors de son utilisation, on la renforce soit avec un isolant pas très sensible à l'humidité, soit qu'on utilise une coque d'insolateur assez étanche )
- mousses. ( légères, faciles à découper, mais ne résistant pas à des températures proches de 100°C )
- liège aggloméré .
- copeaux de bois.

Généralement, l'utilisation entre la surface absorbante et l'isolant d'une feuille d'aluminium améliore l'isolation thermique réfléchissant tous les rayonnements l'atteignant. ( la feuille d'aluminium est placée à un centimètre de la surface absorbante ).

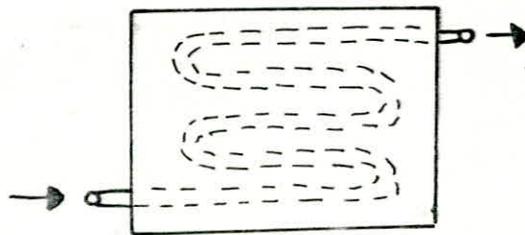
#### IV - 2 - 3 - Rôle de la couverture transparente :

La couverture transparente joue deux rôles :

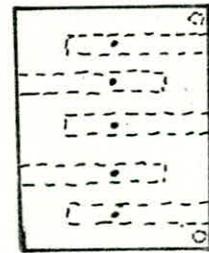
- limite les pertes par convection et par rayonnement (entre l'air ambiant et l'absorbeur) ; pratiquement, la distance optimale entre la couverture et l'absorbeur est de 25 mm.
- assure l'effet serre.

Elle est faite habituellement en verre, le verre n'étant pas complètement transparent, il réfléchit à peu près les 7 % de l'énergie incidente et absorbe les 6 % de l'énergie qu'elle réémet par ses deux faces.

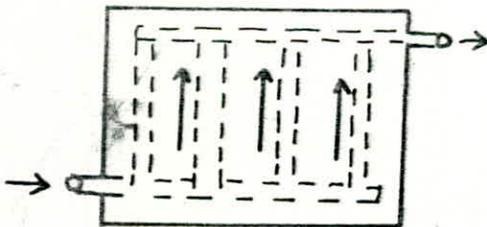
(9) types de surfaces absorbantes



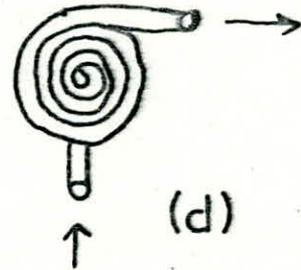
(a)



(c)



(b)



(d)

- (a) tube cintré fixé en tout point sur la tôle noire.
- (b) deux tubes // reliés à d'autres plus fins et fixés sur une tôle noire, <tubes en cuivre>.
- (c) fers plats jouant le rôle de chicanes, sont fixés à la tôle, par des points en leurs extrémités.
- (d) tuyau d'arrosage plastique enroulé en spirale bien serrée.

IV - 2 - 3 - 1 - L'effet serre :

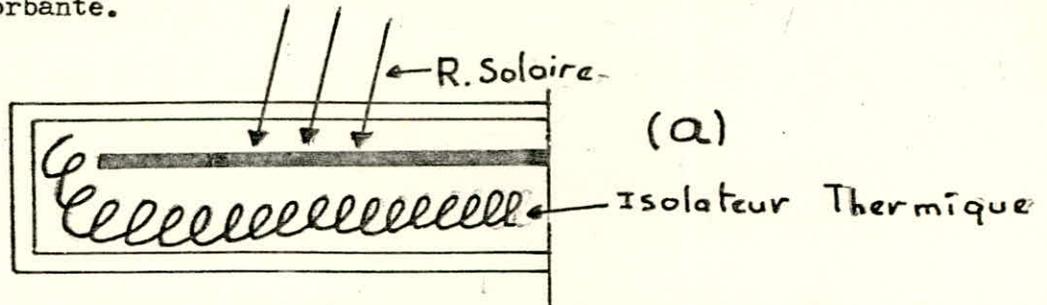
Le principe de l'effet serre est bien connu et repose sur :

- l'aptitude du verre à laisser passer le rayonnement solaire.
- la récupération du maximum du rayonnement émis par l'absorbeur.

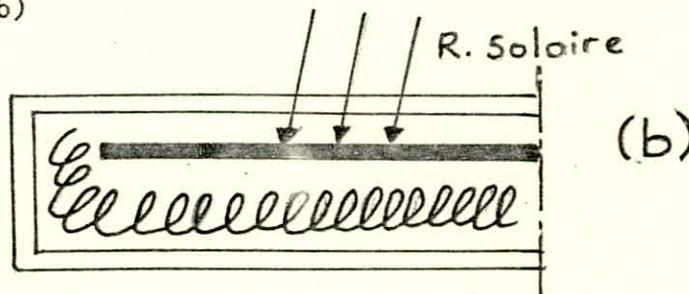
Il est assez intéressant de rappeler les différentes étapes se déroulant lors de la traversée de la vitre par le rayonnement solaire ( une à une ) ainsi qu'à l'intérieur de l'insolateur.

Dans un insolateur, il se passe plusieurs phénomènes :

Le rayonnement solaire arrive à la vitre (a) il est transmis à l'intérieur et atteint alors la surface absorbante.



L'absorbeur se chauffe alors absorption entière du rayonnement solaire ( il se comporte exactement comme un corps noir  $\alpha = 1$  mais d'ailleurs il a été peint pour cela ), sa température augmente ainsi (la variation de cette dernière dépend du débit du fluide caloporteur ). A son tour il rayonne mais dans un domaine différent de celui du rayonnement solaire. (b)



Le soleil rayonne entre 0,25 et 2,5  $\mu m$   
l'absorbeur rayonne entre 4 et 70  $\mu m$  ( c'est à dire dans l'infra rouge ).

Le rayonnement émis par l'absorbeur arrive alors sur la vitre, et comme le verre est opaque au rayonnement infra-rouge, la vitre absorbe tout le rayonnement parvenant et s'échauffe.

La température qu'elle atteint dépend essentiellement de celle de l'absorbeur. Elle lui confère la propriété d'émettre aussi un rayonnement thermique par ses deux faces. ( à peu près autant des deux faces ). (c)



En fin de compte, la surface absorbante reçoit l'énergie émise par le soleil en surcroît de la moitié du rayonnement de la vitre.

IV - 2 - 3 - 2 - Influence du nombre de vitres utilisés :IV - 2 - 3 - 2 - 1 - Notion de transmittance :

La transmittance est l'aptitude d'un corps à transmettre les rayons lui parvenant. Elle est définie par  $\tau$  :

$$\tau = \frac{Q_T}{Q_I} \quad \text{OU} \quad \left( \begin{array}{l} Q_T = \text{quantité d'énergie transmise} \\ Q_I = \text{quantité d'énergie incidente} \end{array} \right.$$

Autant  $\tau$  est élevé et autant le corps a une facilité à transmettre ; il est dit transparent dans le cas où  $\tau = 1$ .

IV - 2 - 3 - 2 - 2 - Notion de reflexion (ou reflectance) :

La reflexion est définie par  $r$ , elle caractérise la capacité d'un corps à réfléchir les rayons qui lui arrivent :

$$r = \frac{Q_R}{Q_I} \quad \text{OU} \quad \left( \begin{array}{l} Q_R = \text{quantité d'énergie réfléchie par le corps} \\ Q_I = \text{quantité d'énergie incidente.} \end{array} \right.$$

On définit parallèlement à ces deux facteurs un autre facteur  $\alpha$  dit d'absorption qui lui caractérise le pouvoir d'absorption de rayons incidents.

$$\alpha = \frac{Q_A}{Q_I} \quad \text{OU} \quad \left( \begin{array}{l} Q_A : \text{quantité d'énergie absorbée par le corps.} \end{array} \right.$$

Ces trois facteurs varient suivant la nature du corps, sa couleur, l'état de sa surface et suivant les longueurs d'onde du rayonnement incident.

Ex. Une surface polie réfléchira beaucoup plus qu'une surface mate.

Un corps sombre absorbera beaucoup plus que s'il était clair.

L'utilisation de nombreux vitrages se fait dans le but de contrecarrer les pertes dues au rayonnement de l'absorbeur. Comme on va le voir théoriquement, il existe un nombre optimum à utiliser au delà duquel, il n'est pas intéressant de travailler.

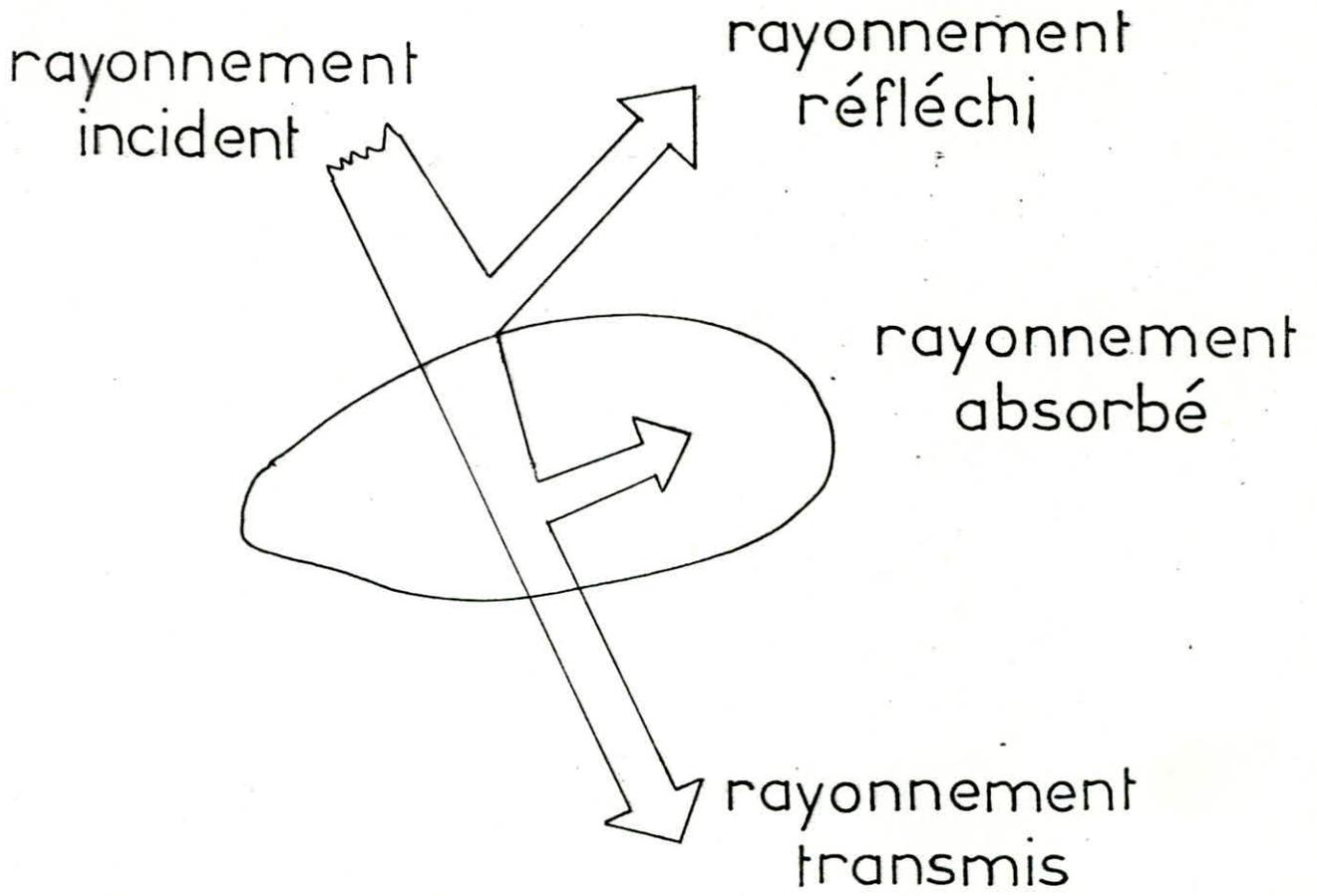
Soit un système de  $N$  vitres auquel on ajoute une vitre supplémentaire, si l'ensemble des  $N$  vitres a une reflectance  $r_N$  et une transmittance totale  $\tau_N$  ; soit un flux unité solaire incident sur l'ensemble des vitres, alors le flux émergeant  $q^-$  à la sortie est :

$$q^- = \tau_N + q^+ r_N \quad \text{où } q^+ = \text{flux réfléchi} = r q^-$$

$$\text{D'où } q^- = \tau_N + q^+ r_N = \tau_N + r q^- r_N$$

$$\Rightarrow q^- (1 - r r_N) = \tau_N$$

$$\text{alors } \left\{ \begin{array}{l} q^- = \frac{\tau_N}{1 - r r_N} \\ q^+ = r q^- = \frac{r \tau_N}{1 - r r_N} \end{array} \right.$$



— COMPORTEMENT D UN CORPS  
VIS à VIS d'une radiation —  
(3)

La nouvelle transmittance  $\tau_{N+1}$  à travers les  $(N+1)$  vitres est égale à :

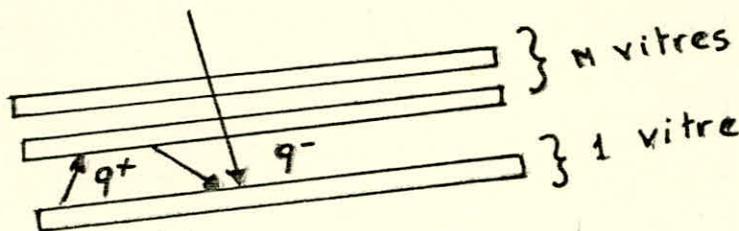
$$\tau_{N+1} = \tau - \tau^2 \quad \text{OU} \quad \tau = \text{transmittance à travers la vitre ajoutée.}$$

$$\tau_{N+1} = \frac{\tau \tau_N}{1 - \tau \tau_N}$$

La nouvelle reflectance du système  $\rho_{N+1}$  est :  $\rho_{N+1} = \rho + \frac{\tau \tau_N^2}{1 - \tau \tau_N}$

Si  $N \rightarrow \infty$  et  $\tau_N \rightarrow 0$   $\rho_{N+1} = \rho$

On remarque que l'addition d'une vitre à  $N$  vitres où  $N > 1$  laisse indifférente les pertes par reflexion mais la transmission a tendance à diminuer. :



Cette diminution de transmittance peut être compensée par une augmentation du rayonnement thermique émis par l'absorbeur dans un cas de fonctionnement bien précis du capteur :

Si l'on travaille à débit faible, la température de l'absorbeur est élevée et l'énergie qui en est émise, l'est aussi ; donc la compensation des calories perdues par transmission peut se faire et il y a intérêt d'utilisation d'une vitre supplémentaire.

Dans le cas contraire, c'est à dire à débit assez fort, la température de la surface absorbante n'étant pas haute, le rayonnement qui en émane n'est donc pas élevé et la récupération des calories perdues ne peut se faire ; il n'y a donc pas avantage à user de nombreux vitrages.

L'exemple de l'eau est assez significatif : beaucoup d'essais ont été faits et on prouvé l'inutilité d'utilisation de plus de deux vitres.

#### IV - 2 - 4 - Rôle du fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est un corps destiné à récupérer les calories gagnées et à les évacuer au lieu de leur destination.

Il est généralement caractérisé par :

- Une bonne conductibilité thermique : la conductibilité thermique caractérise la facilité de transfert de chaleur à travers un matériau donné. Elle est exprimée généralement en  $K \text{ cal/hm}^{\circ}\text{c}$  et intervient surtout dans les phénomènes de transfert de chaleur par conduction :  
 - une faible viscosité  
 - de bonnes qualités de pompage

A température ordinaire, il est préférable qu'il soit à l'état liquide ( ou fondu à basse température au moment du démarrage, surtout dans le cas de fluides organiques ).

Les fluides organiques sont considérés comme bons caloporteurs. On peut citer par exemple, qu'au sein de l'industrie actuelle, on utilise les fluides de la famille de l'oxyde de diphényle - diphényle ; ( Tels que Dowtherm , Gilotherm ) ainsi que les coupes pétrolières saturées ( orobiltherm ect .. ) et les fluides à base de phénoxyphénylpropane. Ces corps organiques sont envisagés par des stockages courts. (stockages journaliers ou nébulaires).

L'eau et l'air sont aussi de bons fluides caloporteurs : le pleimia est utilisé couramment dans les chauffe-eau solaires, ses caractéristiques font qu'il stocke plus d'énergie que les fluides organiques à température et volume donnés.

Les métaux (tels que le sodium et l'étain) sont employés pour la récupération des calories gagnées dans de nombreuses applications.

IV - 3 - Le rendement d'un capteur .

Le rendement d'un capteur solaire se définit comme le rapport de l'énergie réellement récupérée par le corps absorbant "dit généralement accumulateur" sur la quantité d'énergie incidente.

On peut l'évaluer aisément, sachant les pertes et la quantité de chaleur solaire parvenant au capteur. Comme l'a souligné auparavant, les pertes sont la conséquence d'échanges de chaleur de type "radiation, convection, conduction" qui se font entre les éléments du capteur entre eux, soit entre ces derniers et l'air ambiant.

a) Les pertes optiques  $\Phi_o$ 

Elles sont dues surtout au facteur de réflexion ainsi qu'au facteur d'absorption qui ont pour effet de diminuer le facteur de transmission dans le cas où ils sont assez importants.

Connaissant le flux incident  $\Phi_I$  sur un double vitrage dont  $\tau_2$  ( $N = 2$ ) est connu, on peut accéder à la valeur de  $\Phi_o$ .

$$\Phi_o = \Phi_I (1 - \tau_2)$$

Ex. pour un double vitrage dont les deux vitres ont même épaisseur et même nature (vitre de nature commerciale)

$$\tau_2 = 0,777$$

Dans le cas d'un flux incident de  $1 \text{ KW/M}^2$ , les pertes évaluées sont de :

$$\Phi_o = 1 (1 - 0,777) = 0,223 \text{ KW/M}^2$$

b) Les pertes par convection et rayonnement entre le verre et l'air ambiant

On les note par  $\Phi_{av}$  (av veut dire l'avant du capteur).

$$\Phi_{av} = \Phi_{avr} + \Phi_{avc}$$

(  $\Phi_{avr}$  désigne les pertes par rayonnement

OU (  $\Phi_{avc}$  désigne les pertes par convection

$$\Phi_{av} = \epsilon_c \cdot \sigma (T_c^4 - T_s^4) + h_f (T_c - T_a)$$

(  $\sigma$  = cte de STEFAN - BOLTZMANN

(  $T_a$  = température de l'air ambiant

(  $T_c$  = température de la lame de verre en contact avec l'air. ( )

(  $T_s$  = température du ciel =  $T_a - 7$

(  $h_f$  = coefficient d'échange par convection forcée

(  $\epsilon_c$  = facteur d'émissivité du verre

Ce  $h_f$  peut être évalué en fonction de la vitesse du vent  $V$  :

$$h_f = 5,7 + 1,06 V \quad \text{OU} \quad \left( \begin{array}{l} V \text{ en KM/H} \\ h_f \text{ en Watts/M}^2\text{°C} \end{array} \right)$$

L'air ambiant influe sur le comportement du capteur soit par sa température, soit par ses mouvements (vent), soit par son humidité relative (cette dernière intervient d'une façon assez complexe dans les échanges radiatifs entre le verre et la voûte céleste)

c) Les pertes  $\Phi_{cd}$  par conduction à travers les parois du capteur.

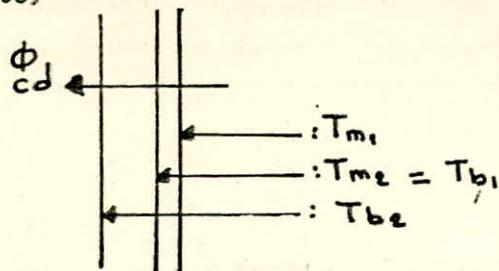
Connaissant la nature des matériaux utilisés par la plaque absorbante et pour l'isolation thermique, donc leurs conductibilités thermiques et sachant leurs épaisseurs on peut déduire  $\Phi_{cd}$  :

$$\Phi_{cd} = \lambda_m / e_m (T_{m_1} - T_{m_2})$$

$$\Phi_{cd} = \lambda_b / e_b (T_{b_1} - T_{b_2})$$

$$\text{avec } T_{b_1} = T_{m_2}$$

$T_m$  = température du métal ( plaque absorbante)  
 $T_b$  = température de l'isolant.



La résistance globale est de  $(e_m/\lambda_m + e_b/\lambda_b) = R_g$   
 et  $\phi_{cd} = 1/R_g \Delta T$  OU  $\Delta T = T_{m_1} - T_{b_2}$

En introduisant le coefficient de transfert de chaleur par convection  $h_b$  entre l'air ambiant et le bois, on détermine une nouvelle résistance  $R_g'$

$R_g' = e_m/\lambda_m + e_b/\lambda_b + 1/h_b$   
 et  $\phi_{cd} = 1/R_g' (\Delta T')$  OU  $\Delta T' = T_{m_1} - T_{\text{ambiant}}$ .

D) Le flux net échangé entre la plaque absorbante et le verre  $\phi_{a'}$  :

$$\phi_{a'} = \frac{1}{1/\epsilon_{a'} + 1/\epsilon_c - 1} \sigma (T^4 - T_c^4)$$

OU  $\epsilon_{a'}$  = facteur d'émissivité et température respectives de la plaque absorbante.

La quantité de chaleur absorbée par la plaque étant  $\phi_p =$

$$\phi_p = (\phi_I \cdot \tau_2 \cdot \alpha) \text{ OU } \alpha = \text{facteur d'absorption de la plaque.}$$

$\phi_p$  diminuée des pertes ci-dessus donne l'énergie effectivement accumulée.

Relation entre la température de fonctionnement d'un capteur et son rendement.

La caractéristique générale des capteurs plans réside dans le fait que plus leur température de fonctionnement est élevée et plus leur rendement baisse : cela veut dire qu'on compte toujours plus de calories à température basse qu'à température élevée.

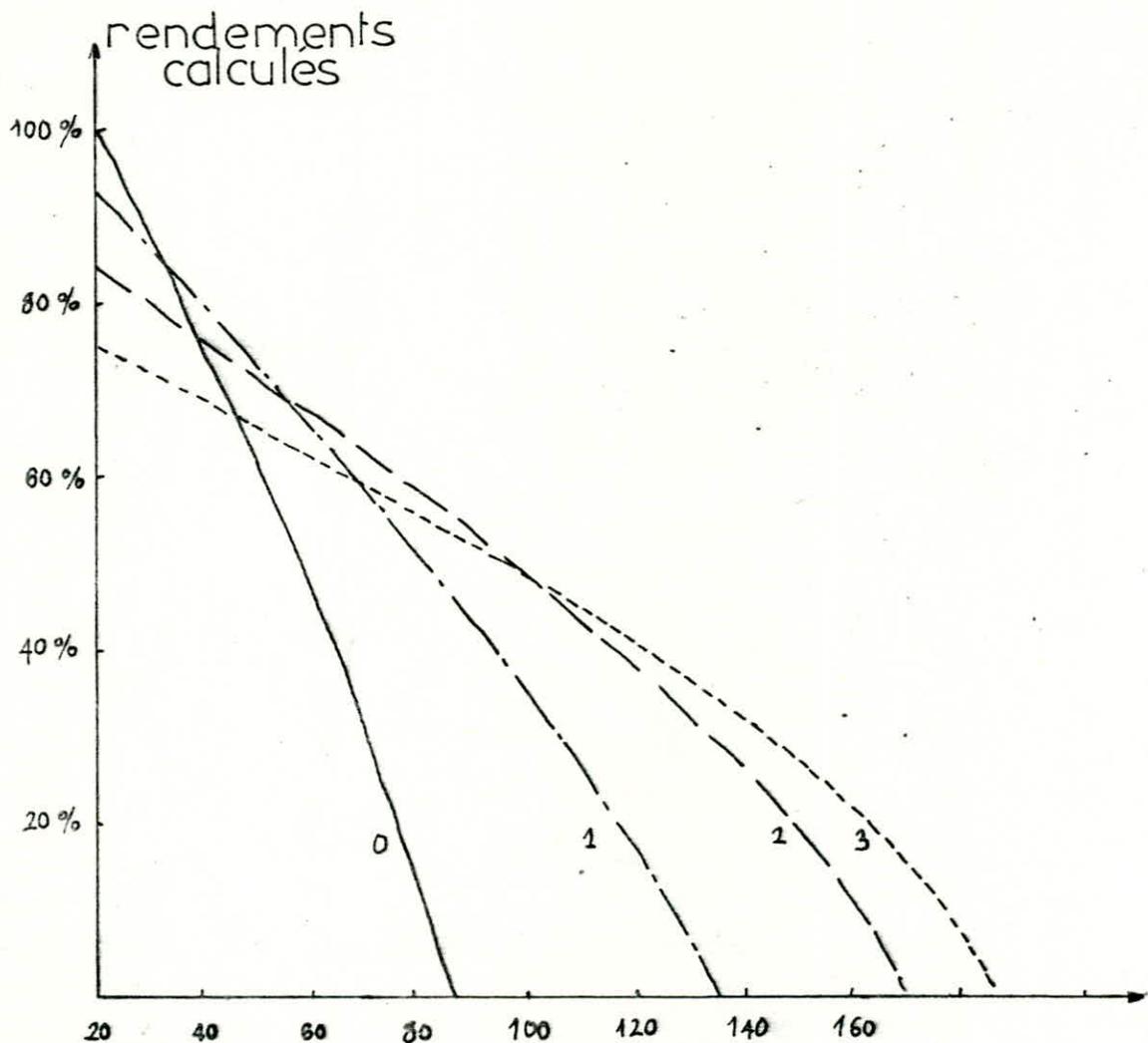
Ex. pour un capteur recevant  $1 \text{ kW/M}^2$ , par température ambiante de  $21^\circ\text{C}$ , il fonctionnera avec un rendement de 80% s'il fournit de l'eau à  $40^\circ\text{C}$  ; son rendement ne sera que de 60% si l'en veut parvenir à de l'eau à  $75^\circ\text{C}$ .

Le schéma ci-après nous montre la relation existant entre la température de sortie et le rendement du capteur, ceci dans quatre cas différents.

Dans chaque cas, le rendement diminue quand la  $T_s$  augmente.

Dans certains domaines des températures de sortie, il vaut mieux utiliser les cas où le rendement est le plus important. Citons en quelques exemples :

- entre  $20^\circ\text{C}$  et  $30^\circ\text{C}$  : choisir le cas où l'on n'utilise pas de vitre
- entre  $30^\circ\text{C}$  et  $55^\circ\text{C}$  : il est préférable d'utiliser une vitre
- entre  $55^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$  : il sera meilleur d'utiliser deux vitres.



températures de sortie

rendement d'un insulateur à absorbeur peint en noir, sous un rayonnement de  $1000 \text{ W/m}^2$

la température extérieure est de  $21^\circ\text{C}$

l'eau est supposée entrer à  $21^\circ\text{C}$  aussi

- courbe \_\_\_\_\_ sans vitre (0)
- courbe - - - - - avec 1 vitre (1)
- courbe \_\_\_\_\_ avec 2 vitres (2)
- courbe - - - - - avec 3 vitres (3)

(3)

V - ACCUMULATEURSV - 1 - INTRODUCTION :

Vu que le soleil est intermittent, son énergie n'étant donc pas disponible à tout moment, les chercheurs ont pensé à la stocker dans des matériaux judicieusement choisis, pour pouvoir la récupérer au moment opportun.

Les matériaux pourvus de cette facilité de stockage de grandes quantités d'énergie et de destockage de ces mêmes quantités sont dits accumulateurs.

Ces derniers stockent l'énergie sous une forme thermique présentée elle-même sous deux sortes :

- soit de chaleur sensible
- soit de chaleur latente

Et le plus souvent, sous une forme combinée des deux.

Le stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur sensible a été largement exploité. (soit dans la climatisation par air chaud, soit dans les chauffe-eau solaires, dans de nombreuses autres applications telles que le stockage dans le béton armé et les matériaux réfractaires dans le domaine de l'habitat etc ....).

A l'encontre du stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur sensible, le stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente n'est pas du tout découvert à fond et de multiples recherches sont en train pour le faire.

V - 2 - La chaleur sensible ( ou chaleur spécifique )

La chaleur spécifique  $c_p$  d'une substance donnée est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d' $1^\circ\text{C}$  la température de l'unité de masse de cette substance :

Ex. : pour l'eau,  $c_p = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} = 4,185 \text{ J/g}^\circ\text{C}$

La quantité d'énergie accumulée sous forme de chaleur sensible dans un accumulateur thermique est donné par :

$$q = m c_p \cdot \Delta T \quad \text{OU}$$

( q = chaleur accumulée (ou absorbée)  
 ( m = masse du milieu d'accumulation  
 (  $c_p$  = chaleur spécifique du milieu  
 (  $\Delta T$  = intervalle de température de fonctionnement

V - 3 - Chaleur latente :

On définit ici la chaleur latente de fusion d'un corps .

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer 1g du corps de l'état solide à l'état liquide.

L'utilisation du stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente présente des avantages sûrs, représentés dans :

- l'accès et le retrait de la chaleur s'effectuant à la même température font que le rendement thermodynamique et la capacité de production restent invariants .

- la capacité de stockage peut être nettement élevée (surtout dans le cas où la chaleur latente est très importante ).

V - 4 - Caractéristiques de l'accumulateur :

Le choix des accumulateurs est basé sur des paramètres très importants :

a) Le niveau thermique :

C'est le paramètre le plus important, il dépend de la température de la source d'énergie ainsi que des cycles de conversion, des formes d'énergie ultérieures et des niveaux thermiques qu'on veut obtenir. On distingue quatre catégories de niveaux thermiques selon les différents types d'utilisation de l'énergie solaire (voir tableau 7) .

b) La capacité de stockage :

Elle dépend surtout des caractéristiques thermiques des corps envisagés et du volume de stockage.

Les deux caractéristiques thermiques qui conditionnent le plus le choix de matériau "accumulateur" sont la chaleur spécifique à l'état liquide, à température modérée ou à l'état solide à toute température et la chaleur latente.

Pratiquement, il y a toujours des pertes à travers les parois qui dépendent de la conductibilité thermique et des variations de volume lors des changements de phase, aussi, on augmente toujours de 30 % au moins les poids et les volumes théoriquement nécessaires du stockage de l'énergie .

c) La conductibilité thermique :

Les accumulateurs de chaleur doivent se munir de bons coefficients thermiques afin que les échanges soient rapides, que les surfaces d'échangeur soient limitées et que les volumes de stockage soient bien utilisés.

Le transfert d'assez grandes quantités d'énergie est assez difficile vu que les changements d'état, provoquant des variations de volume, causent de mauvais contacts thermiques.

d) Les échanges thermiques :

La restitution des calories accumulées doit se faire dans des conditions et à vitesse bien déterminée, aussi on prévoit pour cela des surfaces d'échanges adéquantes, souvent importantes pour éviter les trop grands écarts de température entre l'introduction et la restitution. L'étude de la géométrie du stockage est essentielle et permet de fixer les différentes dimensions des divers éléments de stockage. Ces dernières dépendent de la conductibilité thermique et du flux de chaleur, ainsi que de la résistance des matériaux et de la dilatation des accumulateurs.

e) La stabilité thermique :

Elle est nécessaire pour qu'il n'ait pas décomposition chimique de l'accumulateur, ce qui lui fait perdre ses caractéristiques propres, aussi l'accumulateur doit avoir une faible tension de vapeur et sa transformation (solide - liquide) ne doit être catalysée par le contenant et les échangeurs.

f) L'isolation thermique du stockage :

Dans le cas d'utilisation des stockages à haute température l'isolation thermique doit être efficace afin que les avantages tirés d'un emploi réduit de volumes et de poids du matériau de stockage ne soient pas perdus. Actuellement, des études dans le but de trouver des isolants performants : (technologie des parois poreuses et fibreuses avec mise sous vide et écrans réflecteurs) ; L'isolation thermique assurée par des fibres réfractaires ( tel que le quartz par ex. et par des tissus, a donné d'excellents résultats dans le cas où les stockages sont sans chocs, sans vibrations et sans tassements à craindre.

Au dessous de 600°C : calorifuges classiques épais suffiront, ce qui n'est pas le cas au dessus de 600°C où on devrait employer des calorifuges de type métallique.

g - La corrosion :

Elle se manifeste surtout dans le cas de l'utilisation de l'énergie solaire à des températures de 300 à 1000°C pour des accumulateurs dits alors accumulateurs à haute température. Pour les autres plages de température, soit qu'il n'y a pas de corrosion, soit qu'il y a des problèmes autres, tels que l'érosion et les pertes de charge qui se manifestent pour les accumulateurs à très haute température .

h - La viscosité :

Le corps stocké est généralement liquide, il doit être muni d'une viscosité raisonnable juste au dessus de la température de fusion.

i - Le coefficient de transfert de chaleur :

Ce coefficient permet de comparer les qualités de fluides destinées aux échanges thermiques et aux stockages d'énergie, il intervient dans les formules d'échanges .

On le note par h :

$$h = \frac{c^{0,46} \lambda^{0,91}}{(VVo)^{0,37} \mu^{0,65}} \quad (7)$$

- OU ( c ( k cal / kg°C : chaleur spécifique à la température moyenne du cycle d'utilisation.  
 ( ' λ ( k cal / m s°C : conductibilité thermique à la température moyenne du cycle d'utilisation.  
 ( V ( m<sup>3</sup> / kg ) : volume spécifique à la température moyenne du cycle d'utilisation.  
 ( Vo ( m<sup>3</sup> / kg ) : volume spécifique à la température minimum du cycle d'utilisation.

V - 5 - Pertes de l'accumulateur :

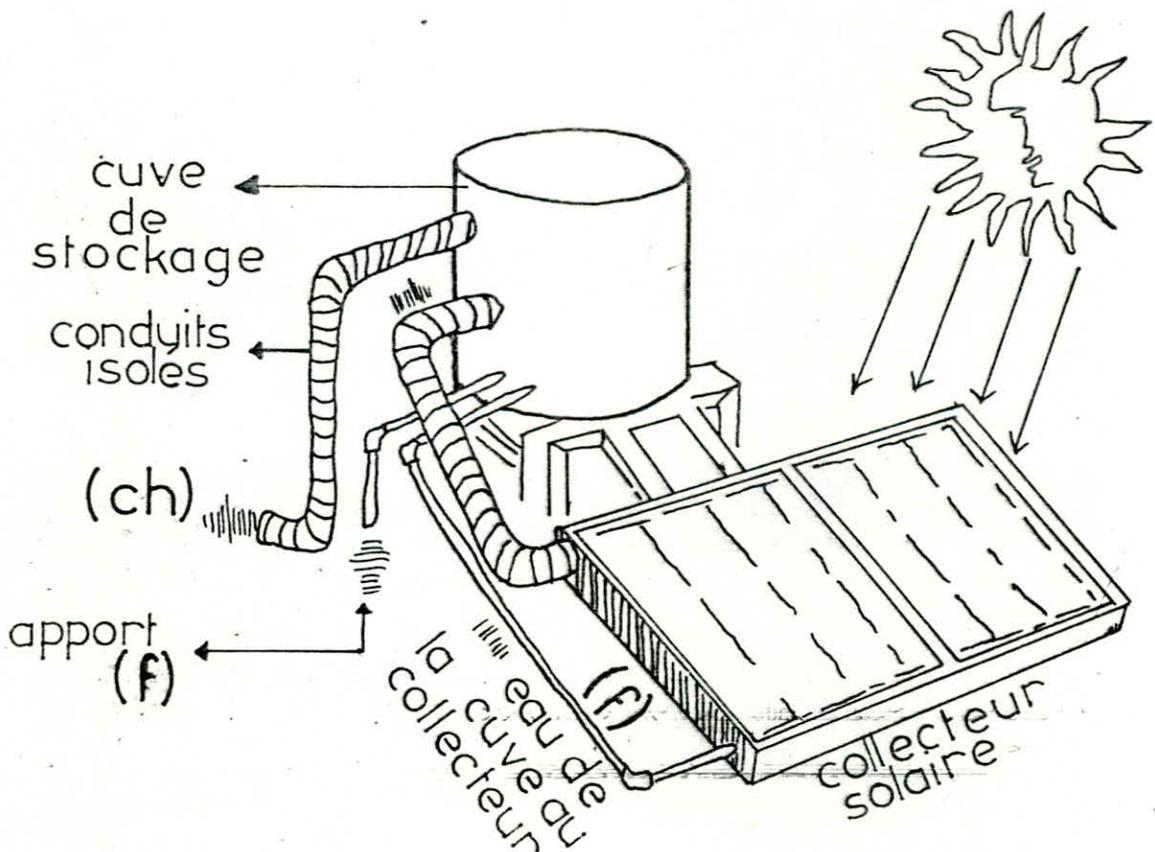
L'évaluation des pertes de l'accumulateur est donnée par :

$$Wp = h A ( T2 - T1 )$$

- OU ( Wp = puissance perdue ( watts, cal /h )  
 ( h = coefficient global de transfert thermique ( en watt/m<sup>2</sup>°c ou cal /h m<sup>2</sup>°c )  
 ( A = surface des parois du contenant (m<sup>2</sup>)  
 ( T2 = température de l'accumulateur  
 ( T1 = température de l'environnement

Pour une masse donnée d'accumulation, un ΔT et un H connus , les pertes de chaleur sont minimales quand les contenants sont de forme sphérique, toutefois, cette forme n'est pas utilisée vu les problèmes de fabrication et d'isolation que peuvent rencontrer ses partisans.

— SCHÉMA D UN CHAUFFE EAU  
SOLAIRE ORDINAIRE —  
(avec circulation en thermosiphon)



(f) eau froide  
(ch) eau chaude  
(9)

VI - Le chauffe - eau solaire.

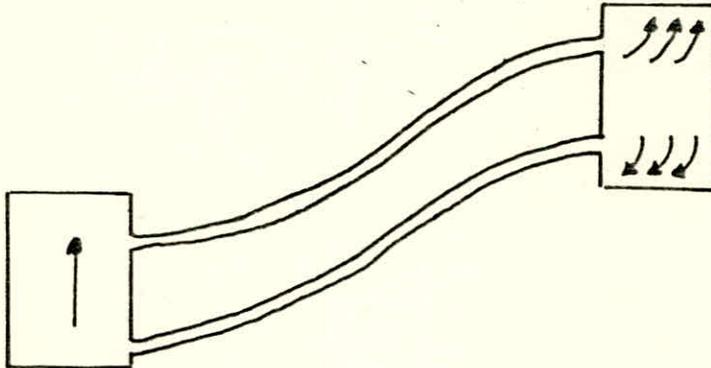
Le chauffe-eau solaire se base sur trois éléments :

- un système de captation de l'énergie solaire
- un circuit de tuyauteries
- un système d'accumulation où l'accumulateur est l'eau

Les systèmes de captation et d'accumulation peuvent être soit regroupés soit séparés. On distingue deux sortes de chauffe-eau solaires :

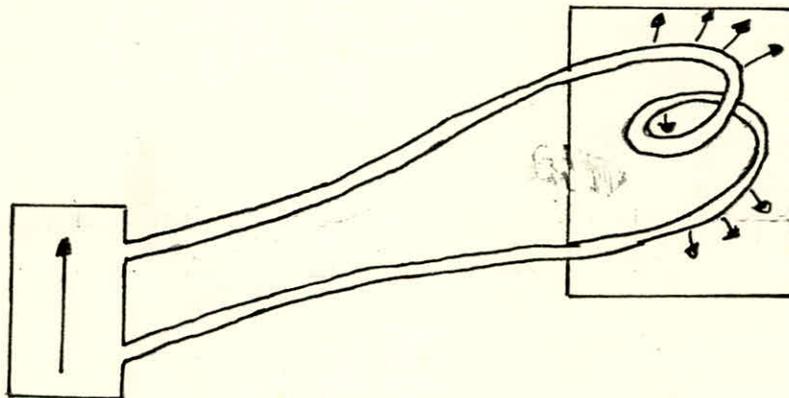
- les uns sans échangeurs dans lesquels l'eau joue le double rôle, elle est en même temps accumulateur et fluide caloporteur.

Ces chauffe-eau sont très sensibles au tartre ; sous l'effet de la chaleur, les eaux naturelles délaissent derrière elles des dépôts insolubles qui ont un rôle nocif, provoquant la corrosion obstruant des canalisations.

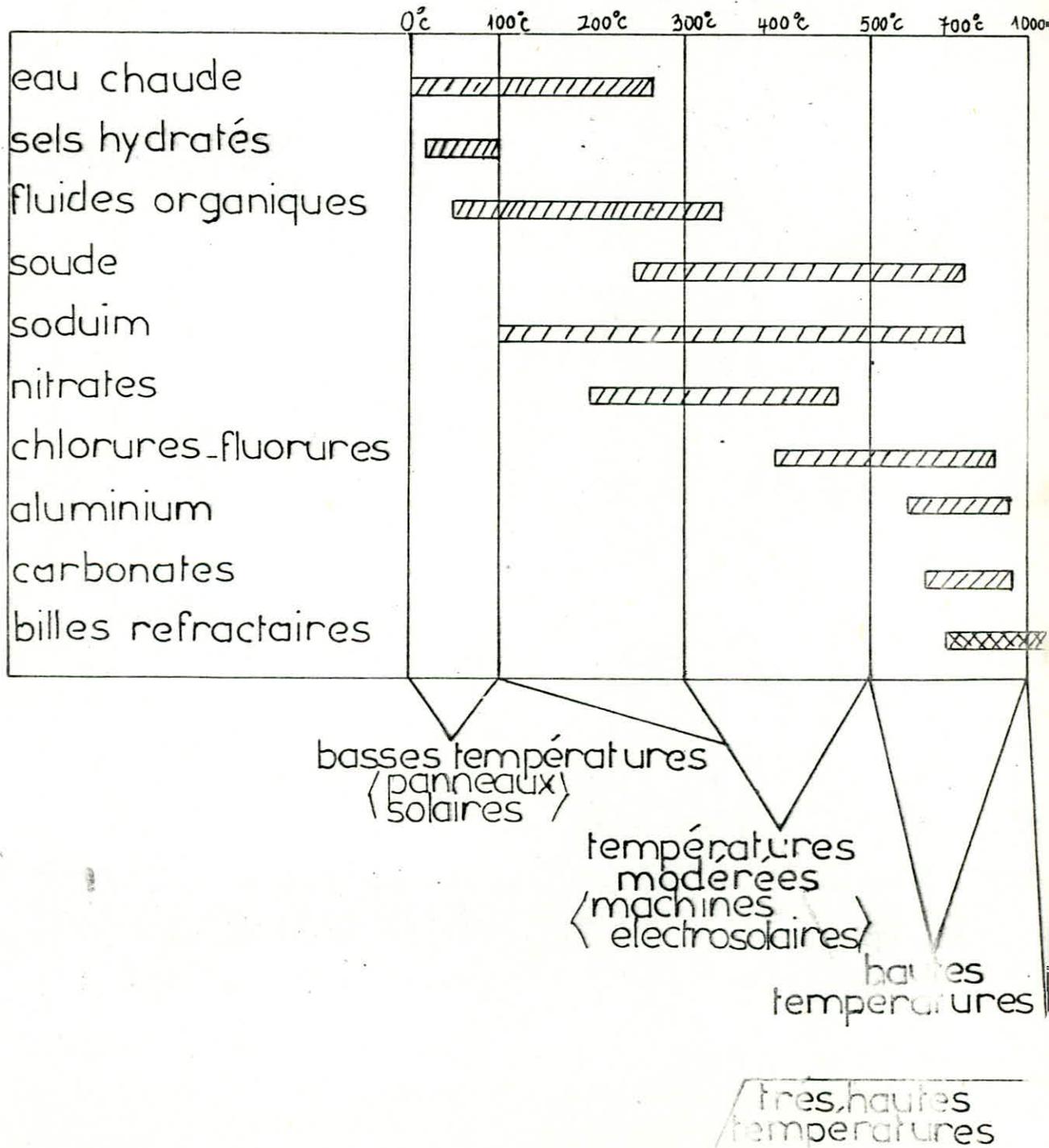


Ils sont surtout caractérisés par l'emplacement du réservoir qui doit être généralement au dessus du capteur.

- Les autres munis d'échangeurs peuvent utiliser n'importe quel corps adéquat et non toxique comme fluide caloporteur. Ils sont généralement moins exposés aux effets du tartre et du gél mais la corrosion y fait son travail car habituellement les échangeurs, vu qu'ils sont faits en cuivre, attaquent les matériaux dont est constitué le réservoir (surtout de l'acier galvanisé) .



# (7) DOMAINE D'UTILISATION DES matériaux pour stockage thermique



- Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau.

L'eau s'échauffant par l'effet de la captation a une densité faible et a tendance à monter. Arrivant au réservoir de stockage, elle cède sa chaleur à l'eau froide et devient elle même froide, par conséquent.

- Soit qu'elle retourne dans le capteur dans le cas d'utilisation d'un échangeur (circuit fermé dit circuit primaire).

- Soit qu'elle redescend dans la partie inférieure du réservoir de stockage.

Le système de tuyauterie est placé souvent au plus haut point du récipient de l'accumulateur.

On prévoit aussi, des vases d'expansion ainsi que des clapets de non retour pour éviter que les installations n'éclatent et que l'eau du réservoir ne se refroidisse.

Le chauffe-eau solaire a deux modes de fonctionnement.

- L'eau peut circuler spontanément sans avoir affaire à une intervention extérieure et on a le fonctionnement en thermosiphon.

- L'eau est entraînée par une petite pompe et on a un fonctionnement en circulation forcée.

Ces deux modes de fonctionnement présentent chacun ses avantages et inconvénients.

Dans le premier mode de fonctionnement cité, la circulation naturelle est provoquée par une différence de densité, elle même, causée par un gradient de température.

Dans ce cas, le réservoir d'accumulation doit être toujours tenu plus haut que le capteur ; l'utilisation d'échangeurs est nécessaire ainsi que le choix d'une tuyauterie pas très longue, ni très étroite afin d'éviter les pertes de charge.

Dans le cas d'un fonctionnement en circulation forcée, le circulateur confère au circuit une charge plus importante qu'en thermosiphon, on peut alors utiliser une tuyauterie de plus petit diamètre (d'où l'économie qui en résulte surtout qu'on doit utiliser de la tuyauterie en cuivre qui est très chère), en plus dans ce cas aussi, l'emplacement du réservoir de stockage n'a plus une grande importance, le contrôle de la température de fonctionnement est facile et la consommation électrique n'est pas très élevée. Les seuls désavantages qu'il présente se résument à :

- le réglage de l'installation est un peu compliqué
- la sensibilité est plus forte à l'entartrage (d'où utilisation d'échangeurs)
- du point de vue économique, il est chère.

PARTIE - EXPERIMENTALE

---

Notre partie expérimentale englobe les points suivants :

- Une conception d'un capteur solaire.
- Une étude expérimentale basée sur ce dernier dont on essaie initialement d'évaluer les déperditions de chaleur puis sur lequel on fait de l'expérimentation en le prenant comme récipient de matériaux accumulateurs de l'énergie solaire. Les accumulateurs employés sont l'eau et la paraffine (paraffine ordinaire). L'eau comme on le sait que trop bien, est un matériau bon marché, non corrosif, ininflammable et possédant tous les qualités réclamées d'un bon accumulateur, aussi il a été utilisé depuis plusieurs années (ex. : chauffe-eau solaires) pour la récupération de cette énergie gratuite. L'utilisation de la paraffine comme matériau de stockage de l'énergie solaire est forte récente, "des études ont été faites sur ce matériau par trois éminents chercheurs pour le chauffage de l'air ambiant (D. GOBIN, D. LEVESQUE, et C. BERNARD) en 1978". (voir plus loin).

## 1 - DESCRIPTION D'UN CAPTEUR SOLAIRE (voir schéma ci contre).

notre capteur solaire rappelle ceux utilisés communément.

Il consiste en une boîte rectangulaire fait en zinc dont le fond est noirci à la peinture noire mate et dont les dimension sont les suivantes :

L : Longueur de la boîte	: 100 cm	)	S : $3000 \text{ CM}^2 = 0,3 \text{ M}^2$
l : largeur de la boîte	: 30 cm	)	
h : hauteur de la boîte	: 10 cm	)	
e : épaisseur de la lame de zinc	: 0,1 cm		

Ses parites latérales et arrière sont calorifugées par du bois de sapin ( dont la conductibilité des bouquins vaut :  $0,15 \text{ W/m}^\circ\text{c}$  ) qu'on a perforé en différentes positions ainsi la lame de zinc pour l'introduction des soudures de thermocouples.

L'utilisation d'un tel isolant thermique n'est pas la conséquence d'un choix entre plusieurs isolants disponibles mais tout simplement dû à l'emploi d'un matériel existant à la menuiserie de l'école.

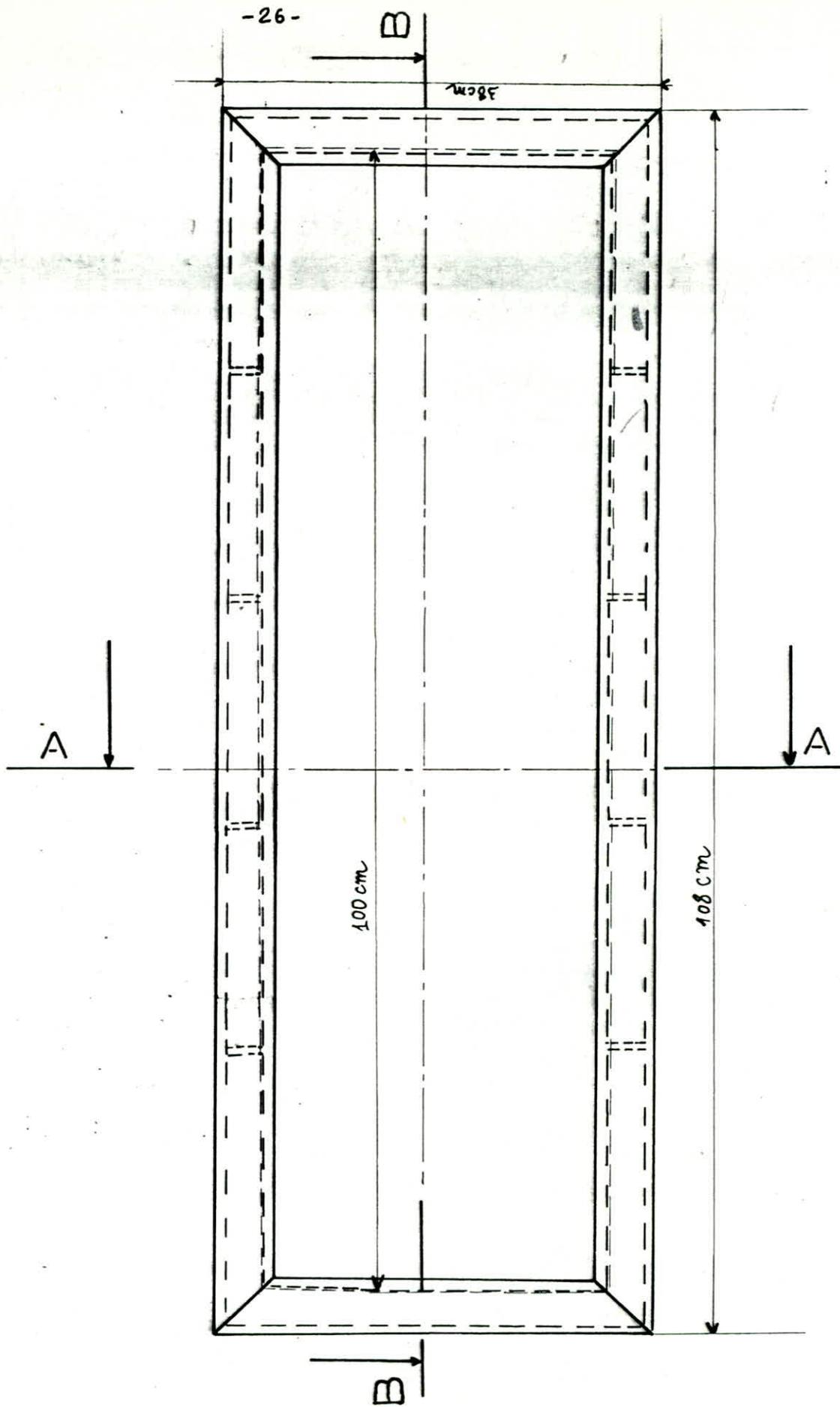
Une bordure en bois comportant deux rainures latérales espacées de 18 mm, a été improvisée dans le but de permettre l'accès et le retrait des deux vitres utilisées.

## 2 - FABRICATION ET ETALONNAGE DE THERMOCOUPLES :

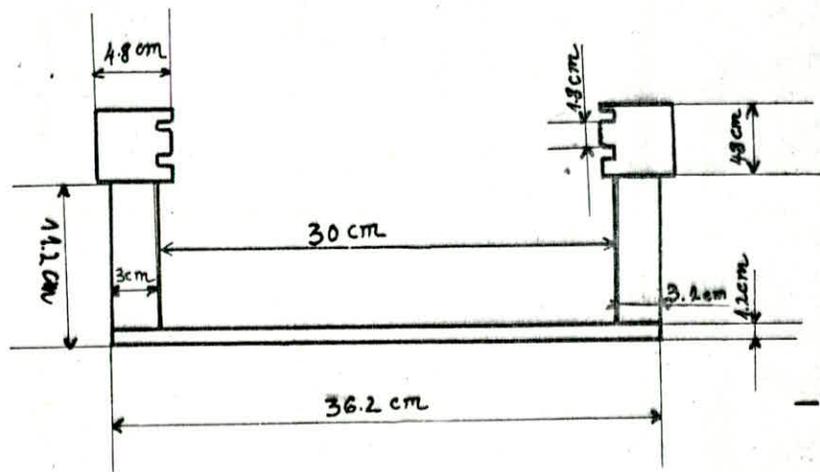
Comme on devait prendre des mesures de températures en fonction du temps, on était sûrs que des thermomètres ne feraient pas l'affaire et qu'il serait plutôt préférable d'user de thermocouples, aussi leur manque dans notre laboratoire nous a incité à en fabriquer, ce qui nous a permis de suivre de près et pour le première fois les différentes étapes pour l'obtention d'un tel appareil .

D'une manière générale, la fabrication et l'étalonnage d'un thermocouple consiste à procéder comme suit :

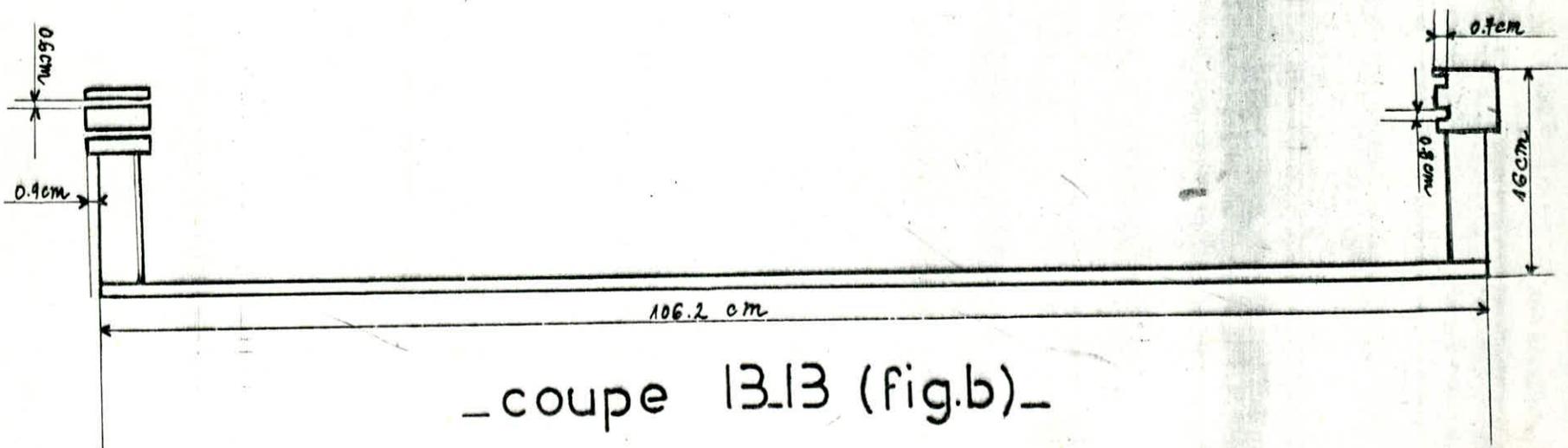
- a) à disposer de l'appareillage nécessaire soit :
  - 2 fils métalliques de natures différentes
  - un chalumeau à acétylène pour les soudures
  - un vase dewar
  - un thermomètre



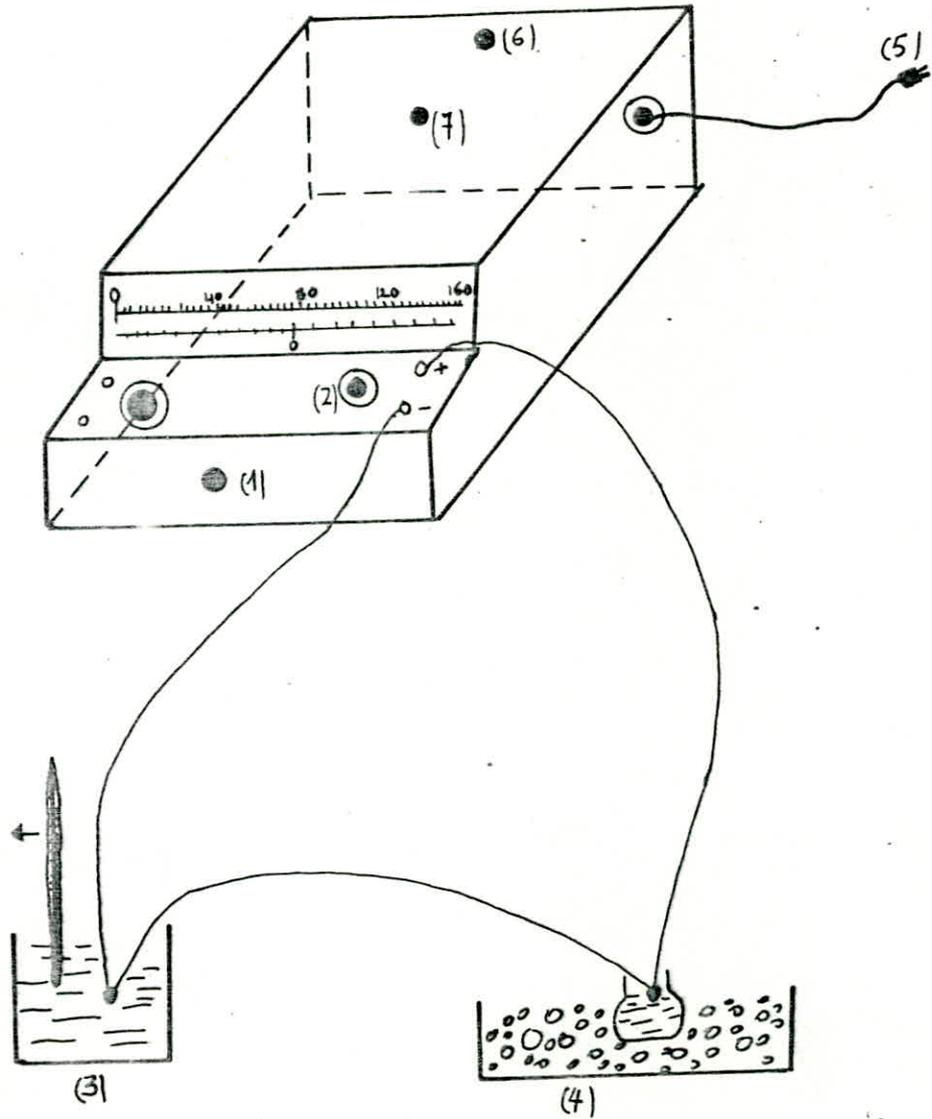
# SCHÉMA - DU - CAPTEUR



\_coupe A.A (fig.a)\_



\_coupe B.B (fig.b)\_



- (1) bouton pour spot
- (2) bouton à calibres
- (3) source chaude
- (4) source froide
- (5) prise

- (6) bouton pour la marche ou l'arrêt
- (7) réglage du zéro

- un bec - bunsen
- un millivolt mètre.

b) Mode - opératoire:

On soude les deux fils métalliques à l'aide d'un chalumeau en deux endroits arbitrairement choisis. Ces deux soudures seront d'autant plus réussies que le contact à leurs niveaux entre les deux fils métalliques a été bon et que ces derniers ont été choisis fins. Les fils de diamètre faible dorment généralement des thermocouples sensibles.

Les deux points de soudure sont alors prêts à être utilisés.

- L'un est introduit dans un vase dewar contenant de la glace fondante (soit 0°C de telle sorte que la différence de potentiel lue sur le millivoltmètre correspondra directement à la température du corps chaud) ; il est dit source froide de thermocouple .

- L'autre baigne dans un bêcher contenant de l'eau chaude où on introduit un thermomètre, il est dit source chaude.

La connexion des fils du thermocouple aux pôles du millivoltmètre se fait ainsi :

Dès qu'on remarque une déviation dans le sens de la lecture : on peut affirmer que notre circuit est bien établi, sinon on interchange les connexions .

Source froide au pôle (+)  
Source chaude au pôle (-)

A chaque température T de l'eau chauffée correspond une différence de potentiel  $\Delta V$  (mV). Cette dernière correspond au nombre de graduations observé, connaissant alors le calibre utilisé ainsi que le nombre de graduations total, on peut en déduire la valeur en (millivolts) de la différence de potentiel correspondant à T (°C).

ex. : ( pour un nombre total de graduations = 160  
( pour un calibre choisi = 1,5 mv

on a alors : 
$$= \frac{(1,5 \times n)}{160}$$
 en mv pour n graduations.

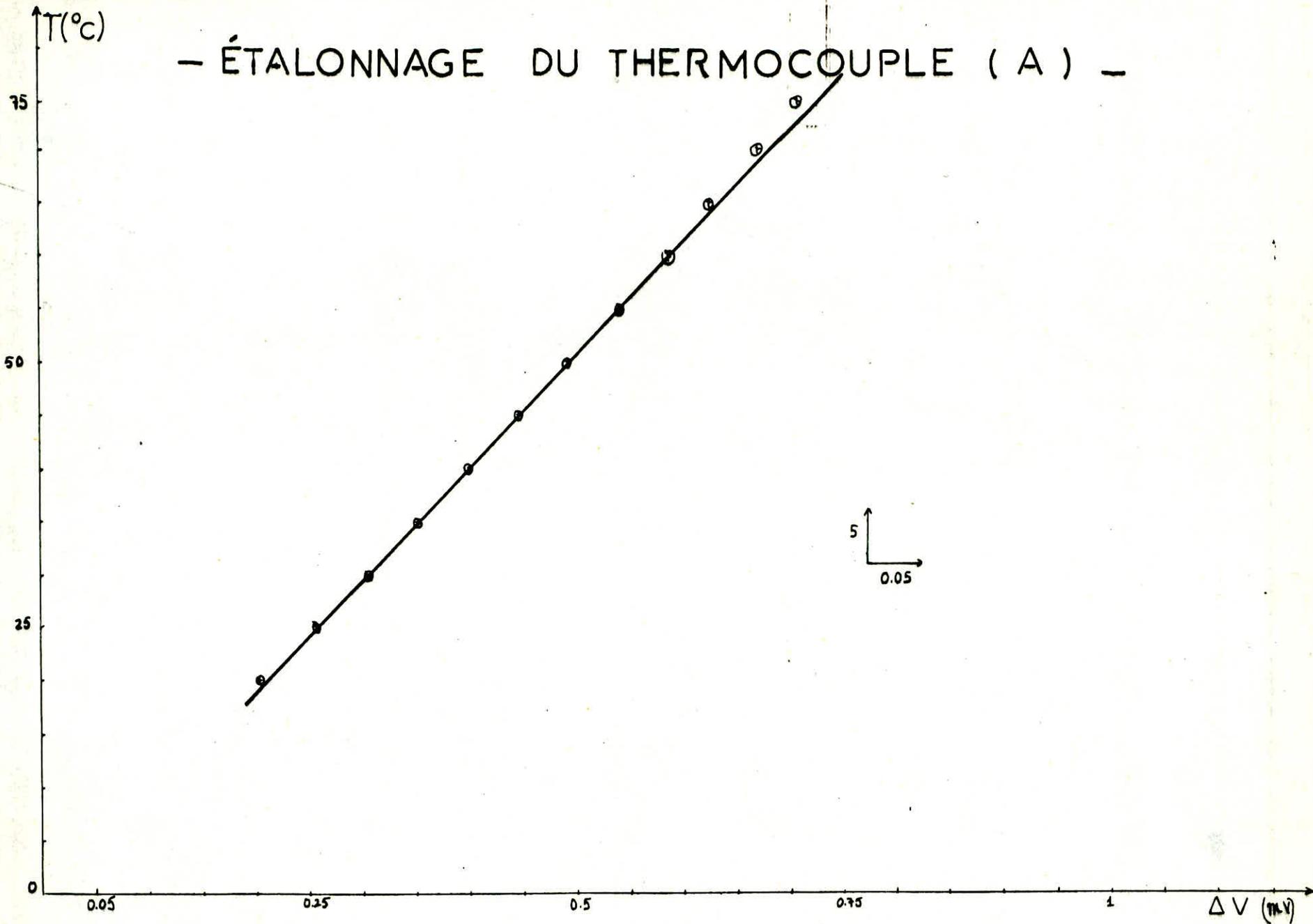
si n = 80 ; 
$$= \frac{1,5 \times 80}{160} = 0,75 \text{ mv}$$

On a étalonné de cette façon deux thermocouples qu'on a nommés (A) et (B) risque de confusion. Les courbes d'étalonnage ont été tracées et nous ont permis d'avoir les températures désirées.

## TABLEAU DE VALEURS pour étalonnage du thermocouple(A)

T (°c)	$\Delta V$ (lue)	$\Delta V$ (mv)
85	85	0.797
80	81	0.759
75	76	0.7125
70	72	0.675
65	67	0.628
60	63	0.590
55	58	0.543
50	53	0.4968
45	48	0.45
40	43	0.403
35	38	0.356
30	33	0.309
25	27.8	0.260
20	22	0.206

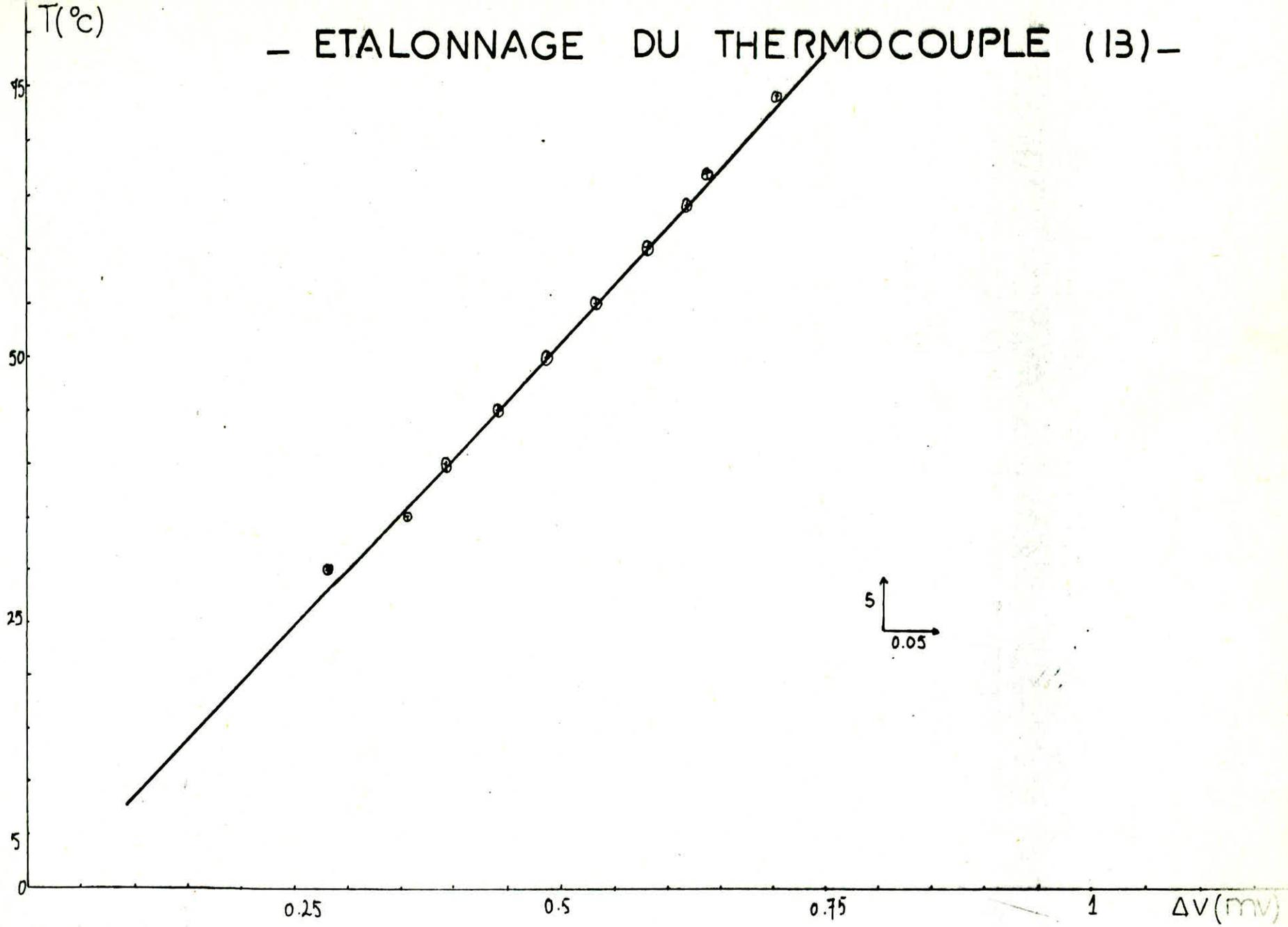
- ÉTALONNAGE DU THERMOCOUPLE ( A ) -



## TABLEAU DE VALEURS pour étalonnage du thermocouple (13)

T(°C)	$\Delta V(\text{lue})$	$\Delta V(\text{mv})$
85	85	0.7968
80	80	0.7593
74	75	0.7031
67	68	0.6375
64	66	0.618
60	62	0.581
55	57	0.534
50	52	0.487
45	47	0.440
40	42	0.393
35	38	0.356
30	30	0.281
25	26	0.243
20	20	0.187

- ETALONNAGE DU THERMOCOUPLE (13) -



### 3 - Accumulation de l'énergie solaire dans l'eau.

Avant d'entreprendre les expériences concernant le stockage de l'énergie solaire proprement dit dans l'eau, on a essayé dans un premier temps, d'effectuer une série d'expériences qui nous a permis de caractériser notre capteur. Pour cela, on a procédé ainsi :

#### 3 - 1 - Influence du nombre de vitres (tableaux de valeurs N°1 et 2 )

Nous avons travaillé avec un volume d'eau distillée de 15 litres pendant une durée de 4 heures (allant jusqu'à 6 heures ) dans une salle dont on notait la température en même temps qu'on relevait la température de l'eau toutes les dix à vingt minutes. Cette dernière étant supposée uniforme au sein du capteur.

L'eau ayant été chauffée initialement à une température de  $T_0 = 60^\circ\text{C}$ , fut introduite immédiatement dans le récipient vu que sa température diminuait très vite (pertes sous forme vapeurs) on a utilisé lors de ces expériences une vitre puis deux.

Les courbes déduites de ces dernières montrent que le double vitrage a pour effet : la diminution de la vitesse de la température de l'eau, ce qui vérifie fort bien la théorie énoncée déjà : " le double vitrage contrecarre les pertes par rayonnement et convection".

Par exemple, on remarque qu'il a fallu un temps  $t = 240$  mn soit 4 heures pour descendre de  $T_0 = 60^\circ\text{C}$  à  $T(240 \text{ mn}) = 40^\circ\text{C}$  avec un double vitrage ; alors qu'il a suffi d'un temps beaucoup plus court  $t = 165$  mn ( soit 2 h 45 mn ) pour avoir le même écart avec un simple vitrage.

Il est donc intéressant d'utiliser un double vitrage lors du stockage de la chaleur solaire. Il peut nous permettre d'aboutir à des stockages journaliers allant jusqu'à 6 heures ou plus.

#### 3- 2 - Influence du niveau thermique du stock :

( Tableaux de valeurs N° 1 et 3 )

Pour une température initiale  $T_1(0) = 60^\circ\text{C}$  ( respectivement  $T_2(0) = 72^\circ\text{C}$  ) à laquelle on a chauffé un volume de 15 litres d'eau distillée qui fut introduit dans le capteur muni dans ce cas d'un simple vitrage, on a noté respectivement la température de l'eau ainsi que celle de l'air ambiant régnant dans la salle pour une durée de 4 heures.

Les courbes résultantes de cette expérience montrent que :

- autant que pour  $T_1(0) = 60^\circ\text{C}$  que  $T_2(0) = 72^\circ\text{C}$  , la température de l'eau  $T_1(t)$  respectivement  $T_2(t)$  diminue dans le temps : preuve que le capteur perd de la quantité de chaleur accumulée initialement.

Ces pertes sont dues au calorifugeage : échange de chaleur à travers les parois entre l'air de la salle et la température de l'eau chaude . ( existence d'un gradient de température favorisant ce transfert :  $T_{\text{eau chaude}} = 60^\circ\text{C}$  alors que  $T_{\text{ambiant}}$  n'était que de  $21^\circ\text{C}$  ).

\_\_ TABLEAU DE VALEURS N°(1) \_\_

$t(\text{mn})$	$\Delta v(\text{lue})$	$\Delta v(\text{mv})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$T_d(^{\circ}\text{C})$
0	63	0.59	60	21
20	58	0.543	55	21
30	56.5	0.53	53.5	21
40	55	0.515	52	21
50	54	0.506	51	21
60	53	0.495	50	21
70	51.5	0.483	48.5	21
80	50.5	0.473	47.5	21
100	48.5	0.454	45.5	21
120	46	0.431	43	21.5
140	44	0.412	41.75	21.5
165	43	0.403	40	21.5
180	42	0.393	39.5	21.5
200	40.8	0.382	38	21.5
220	39	0.365	36	21.5
240	36.9	0.346	34.5	21.5
260	34	0.318	32.5	21.5

$\Delta v(\text{lue}) = \text{nombre de graduations.}$

— TABLEAU DE VALEURS N°(2) —

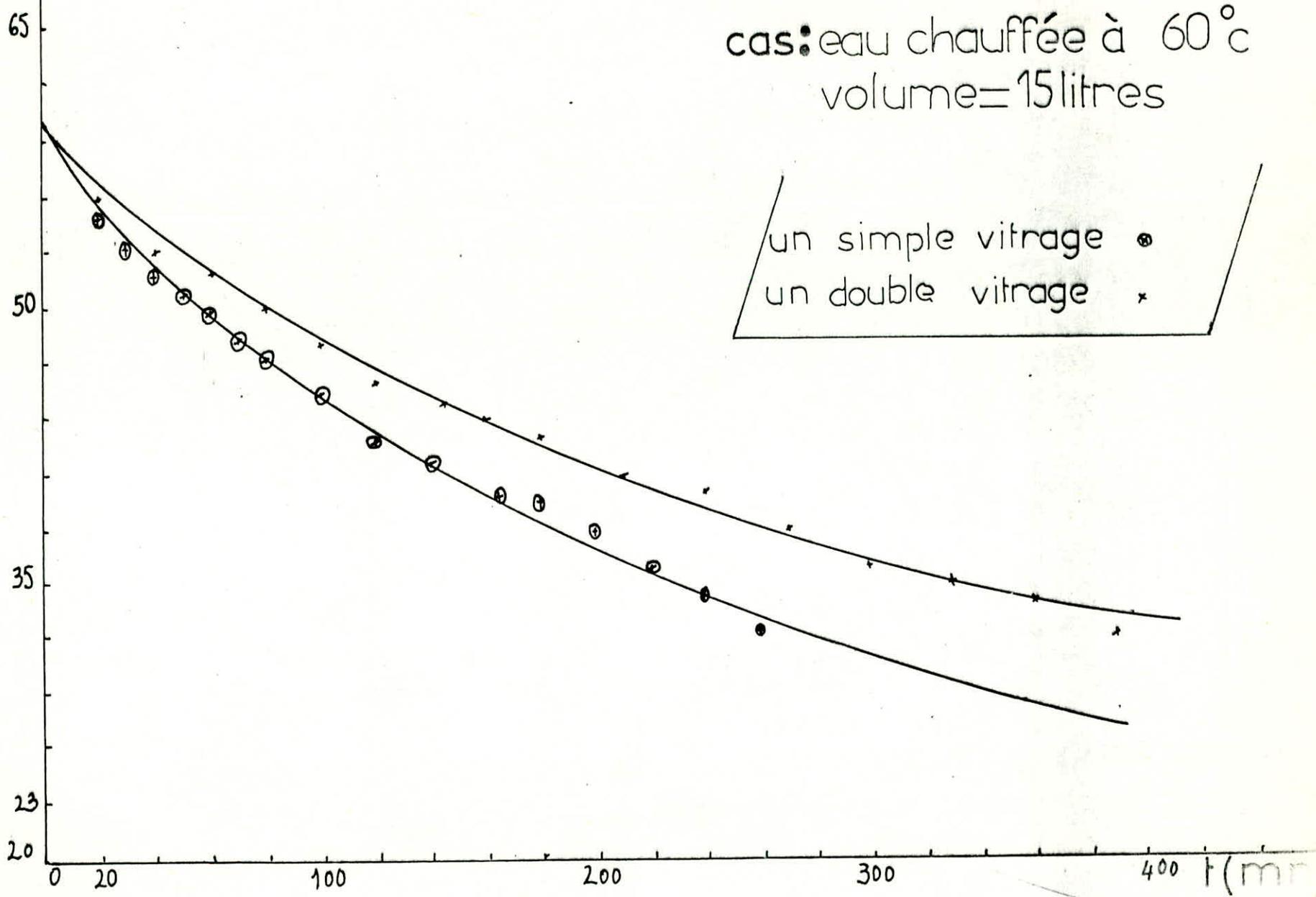
t (mn)	$\Delta v$ (lue)	$\Delta v$ (mv)	T(°c)	T <sub>d</sub> (°c)
0	63	0.59	60	21.5
20	59	0.5531	56	21.5
40	56	0.525	53	21
60	55	0.5156	52	21
80	53.5	0.5015	50	21
100	51	0.4781	48	21
120	49	0.4593	46	21.8
145	47.7	0.4471	44.75	21.3
160	46.9	0.4396	44	21.3
180	45.7	0.4284	43	21.3
210	44	0.4125	41	21.3
240	43	0.4031	40	21.3
270	41	0.3843	38	21.3
300	39	0.3656	36	21.3
330	38	0.3562	35	22
360	37	0.3468	34	22

$T(^{\circ}C)$

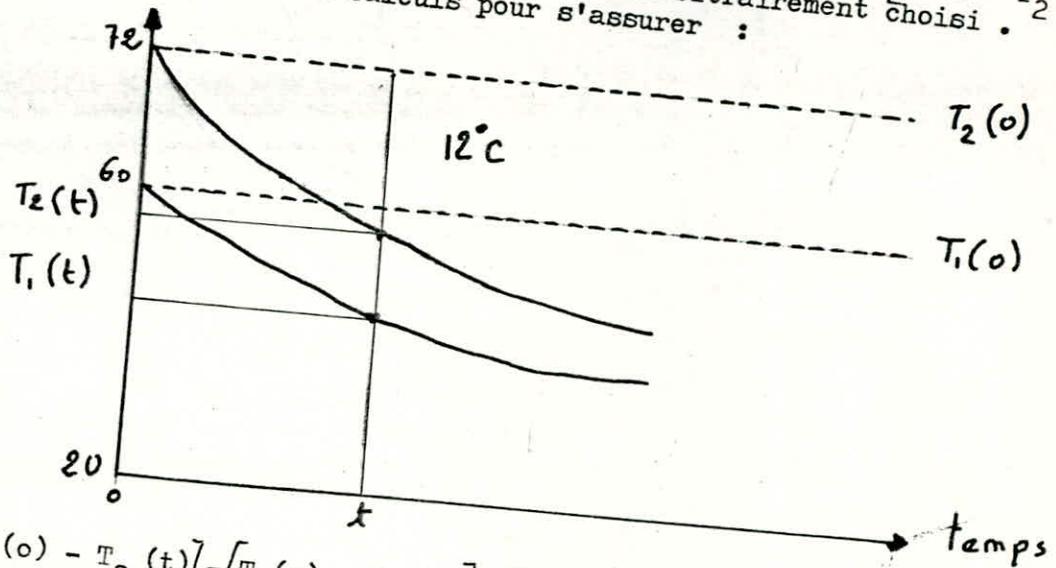
— Influence au vitrage —

cas: eau chauffée à  $60^{\circ}C$   
volume = 15 litres

un simple vitrage  $\otimes$   
un double vitrage  $\times$



- Pour une même durée, la diminution de la température  $T_2(t)$  est bien plus que pour  $T_1(t)$ .  
 On peut d'ailleurs le constater directement sur graphe en traçant une parallèle à l'axe des températures puis en comparant les distances  $[T_2(o) - T_2(t)]$  à  $[T_1(o) - T_1(t)]$  à n'importe quel instant  $t$  arbitrairement choisi.  
 On peut toutefois faire des calculs pour s'assurer :



$$[T_2(o) - T_2(t)] - [T_1(o) - T_1(t)] = [T_2(o) - T_1(o)] - [T_2(t) - T_1(t)] = (72 - 60) - [T_2(t) - T_1(t)] = 12 - [T_2(t) - T_1(t)]$$

Si  $12^\circ\text{C} > T_2(t) - T_1(t) =$  la cinématique de diminution de  $T_2(t)$  est supérieure à celle de  $T_1(t)$ .

Aux écarts de températures correspondent logiquement des quantités de chaleur perdues  $Q_{p2}(t)$  et  $Q_{p1}(t)$

$$\begin{cases} Q_{p2}(t) = mc_p [T_2(t) - T_2(o)] \\ Q_{p1}(t) = mc_p [T_1(t) - T_1(o)] \end{cases}$$

Les quantités de chaleur sont munies alors d'un signe  $\leftarrow$  car dégagées, elles sont négatives,

$$\begin{cases} Q_{p2}(t) < 0 \\ Q_{p1}(t) < 0 \end{cases}$$

comme le volume d'eau est invariant dans les deux cas  $mc_p = \rho v c_p$  est donc une cste et la comparaison de  $Q_{p2}(t)$  à  $Q_{p1}(t)$  revient par conséquent à la comparaison de  $[T_2(o) - T_2(t)]$  à  $[T_1(o) - T_1(t)]$  :

$$Q_{P_2}(t) - Q_{P_1}(t) = mc_p [T_2(t) - T_2(o) - T_1(t) + T_1(o)] =$$

$$mc_p [(T_2(t) - T_1(t)) - (T_2(o) - T_1(o))] = mc_p [(T_2(t) - T_1(t)) - 12]$$

Ce qui revient à dire que si  $[T_2(t) - T_1(t)] > 12^\circ\text{C}$ ,  $Q_{P_2}(t)$  est  $>$  à  $Q_{P_1}(t)$ ,  
 en module  $/Q_{P_2}(t) / < /Q_{P_1}(t) /$

on arrive alors à la conclusion déjà tirée ci-dessus :

$$\text{si } [T_2(t) - T_1(t)] < 12^\circ\text{C} ; /Q_{P_2}(t) / > /Q_{P_1}(t) /$$

les pertes de chaleur  $Q_{P_2}(t)$  sont bien supérieures à  $Q_{P_1}(t)$ , ( voir tableau de valeurs ci-contre)  $P_2$

On est alors à réaffirmer ce qui a été déjà avancé en théorie sur le rendement d'un capteur et son amélioration à l'aide d'une diminution du niveau thermique du stock d'où :

le stockage à basse température est **bien** plus efficace que celui à haute température .

Exemple de calcul :

$$\text{pour } t = 100 \text{ mn} ; \quad \begin{cases} ( T_1(100 \text{ mn}) = 45,5^\circ\text{C} \\ ( T_2(100 \text{ mn}) = 54,2^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$T_2(100\text{mn}) - T_1(100\text{mn}) = 54,2 - 45,5 = 8,7^\circ\text{C}$$

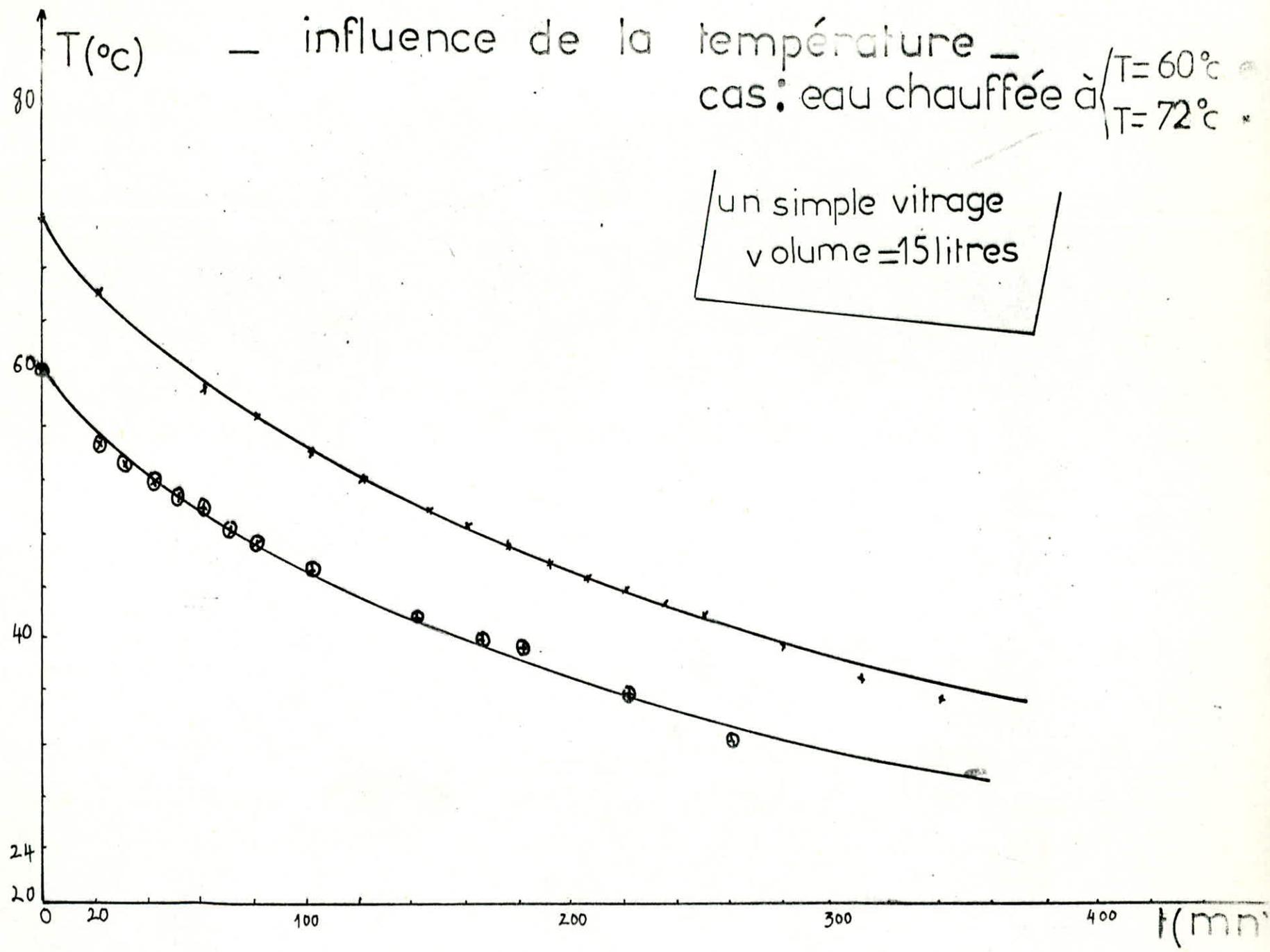
$$8,7^\circ\text{C} \text{ est inférieure à } 12^\circ\text{C} \implies /Q_2(100) / > /Q_1(100) /$$

$$m = \rho v \quad \text{avec } v = 15 \text{ litres} ; \rho = 1 \text{ kg/dm}^3 ; c_p = 1 \text{ k cal/kg }^\circ\text{C}$$

$$Q_{P_2}(100) - Q_{P_1}(100) = 15 \times 1 (12 - 8,7) = - 49,5 \text{ k cal.}$$

## TABLEAU DE VALEURS N°(3)

t (mn)	$\Delta v(\text{lue})$	$\Delta v(\text{mv})$	T(°c)	T <sub>D</sub> (°c)
0	77.5	0.726	71.5	23.2
20	69.6	0.6525	66.5	23.2
40	65.1	0.6103	62	23.2
60	62	0.58125	59	22.6
80	59.2	0.555	56.5	22.9
100	57.2	0.53625	54.2	22.9
120	55.2	0.5175	52.2	23
145	53	0.4968	50	23
175	50.4	0.4725	47.4	23
205	48	0.45	45	23
235	46	0.43125	43	23
280	42.2	0.3956	39.5	23
310	40	0.375	37	23
340	38.5	0.3609	35.5	23



\_ effet du niveau thermique \_

$t(\text{mn})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$(T_2 - T_1)$	$Q_{P_2} - Q_{P_1}(\text{kcal})$
20	55	66.5	11.5	7.5
40	52	62	10	30
60	50	59	9	45
80	47.5	56.5	9	45
100	45.5	54.2	8.7	49.5
120	43	52.2	9.2	42
140	41.75	51	9.25	41.25
180	39.5	47.8	8.3	55.5
200	38	46	8	60
240	34.5	43.5	9	45
260	33.5	42	8.5	52.5

3 - 3 - Influence du volume au stock : (tableaux de valeurs N°1 et N° 4

Pour un volume d'eau  $V_1 / V_1 = 15$  litres ( respectivement  $V_2 = 27$  litres ) chauffé à une température  $T_0 = 60^\circ\text{C}$  et qui fut introduit dans le capteur muni seulement d'une vitre, on a noté la température de l'eau ainsi que celle de l'air ambiant de la salle pendant une durée de 4 heures.

Les résultats obtenus révèlent que toute augmentation du volume du stock a pour effet de retarder la diminution de température.

Autrement dit  $T_{v_2}(t) > T_{v_1}(t) \quad \forall t$ , où  $T_{v_2}(t)$  [respectivement  $T_{v_1}(t)$ ] représente la température de l'eau à chaque instant  $t$  pour le volume  $V_2$  (respectivement  $V_1$ ).

$Q_{v_2}(t)$  = quantité de chaleur perdue par le volume  $V_2$  au bout d'un temps  $t$ .  
(même définition pour  $Q_{v_1}(t)$  ).

$$\begin{cases} Q_{v_2}(t) = M_2 \text{ cp } [T_{v_2}(t) - T_0] \\ Q_{v_1}(t) = M_1 \text{ cp } [T_{v_1}(t) - T_0] \end{cases} \text{ avec } T_{v_1}(t) < T_{v_2}(t) < T_0 = 60^\circ\text{C}$$

$Q_{v_2}(t)$  et  $Q_{v_1}(t)$  étant négatives d'après ci-dessus.

$$\begin{cases} T_{v_2}(t) - T_0 < 0 \\ T_{v_1}(t) - T_0 < 0 \end{cases} \Rightarrow \left| T_{v_2}(t) - T_0 \right| < \left| T_{v_1}(t) - T_0 \right|$$

$$T_{v_1}(t) < T_{v_2}(t)$$

$$\left| T_{v_2}(t) - T_0 \right| = T_0 - T_{v_2}(t) ; \left| T_{v_1}(t) - T_0 \right| = T_0 - T_{v_1}(t)$$

pour comparer  $Q_{v_2}(t)$  à  $Q_{v_1}(t)$ , il faut prendre en considération la masse d'eau mise en jeu ainsi que le gradient de température.

$$\begin{cases} Q_{v_2}(t) = -m_2 \text{ cp } (T_0 - T_{v_2}(t)) \\ Q_{v_1}(t) = -m_1 \text{ cp } (T_0 - T_{v_1}(t)) \end{cases} \text{ avec } \left. \begin{array}{l} m_2 > m_1 \\ \text{et} \\ T_0 - T_{v_2}(t) < T_0 - T_{v_1}(t) \end{array} \right\} \textcircled{c}$$

Ces conditions (c) ne nous permettent pas de trancher . IL faut donc calculer .

Exemple de calcul :  $V_1 = 15$  litres ;  $V_2 = 27$  litres ;  $\rho = 1\text{kg/dm}^3$

$$\begin{cases} m_2 = 27 \text{ kg} \\ m_1 = 15 \text{ kg} \end{cases} ; \text{ cp } = 1 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C} \text{ (eau)}$$

au bout de  $t = 4$  heures  $\left( T_0 - T_{v_1}(t = 4 \text{ h}) \right) = 25,5^\circ\text{C}$   
 $\left( T_0 - T_{v_2}(t = 4 \text{ h}) \right) = 18,7^\circ\text{C}$

$$\begin{cases} Q_{v_1}(t = 4 \text{ h}) = 25,5 \times 15 = 382,5 \text{ K cal.} \\ Q_{v_2}(t = 4 \text{ h}) = 18,7 \times 27 = 504,9 \text{ K cal.} \end{cases}$$

(Voir tableau).

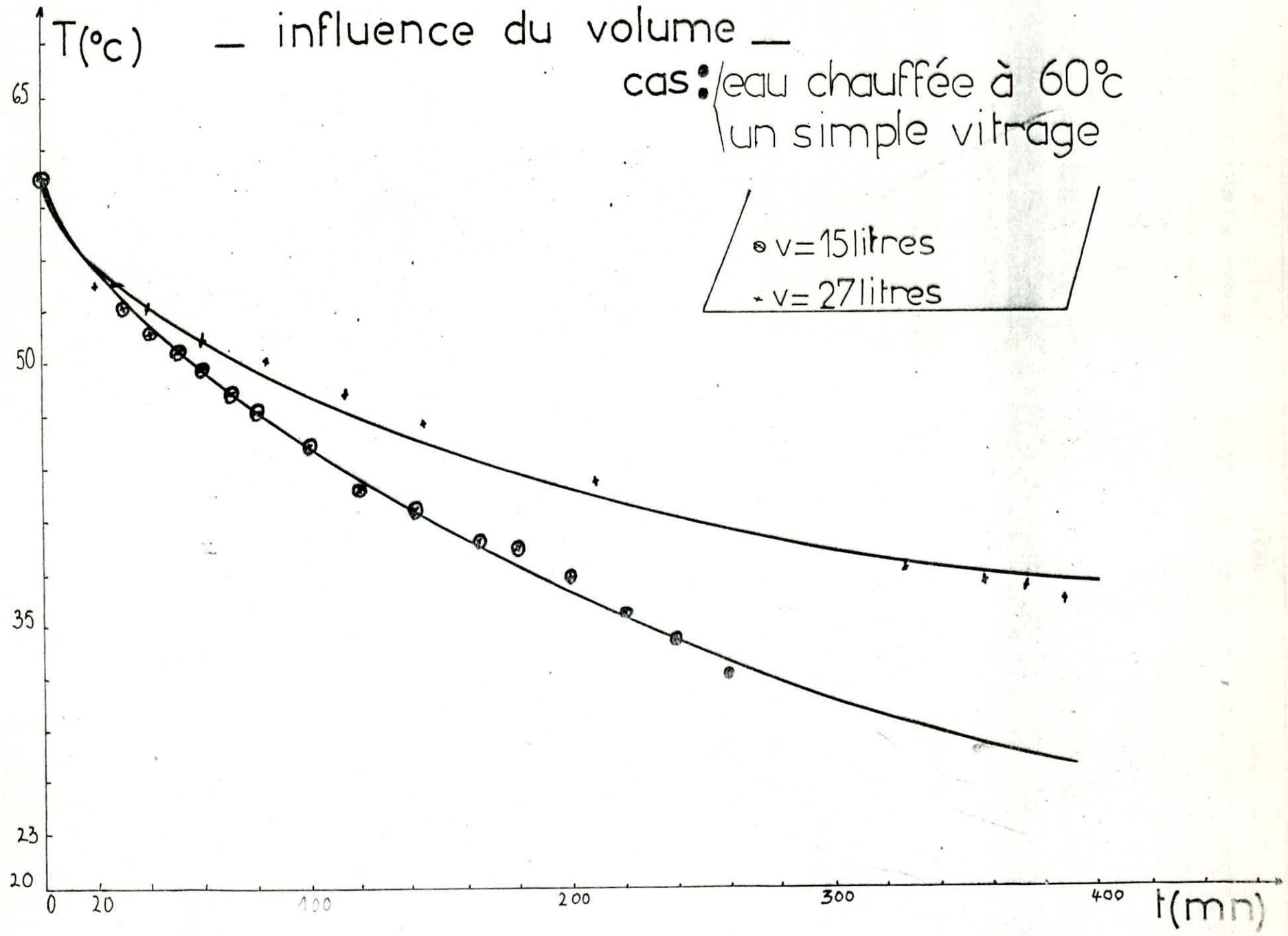
### TABLEAU DE VALEURS N°(4)

t (mn)	$\Delta v$ (lue)	$\Delta v$ (mv)	T(°c)	T <sub>d</sub> (°c)
0	63	0.59	60	23.5
20	57.7	0.54093	54.7	23.5
40	56	0.525	53	22.9
60	54.5	0.5109	51.5	22.9
85	53.2	0.49875	50.2	22.7
115	51.2	0.48	48.2	22.2
145	49.5	0.464	46.5	22
210	46.2	0.4331	43.2	22
330	41.2	0.38625	38.2	22.2
360	40.25	0.377	37.5	22.2
375	40	0.375	37.2	22.2
390	39.5	0.3703	36.5	22.2

— influence du volume —

cas : / eau chauffée à 60°C  
/ un simple vitrage

○ v = 15 litres  
\* v = 27 litres



- 45 -

— effet du volume —

$t(\text{mn})$	$T_v(^\circ\text{C})$	$T_{v_2}(^\circ\text{C})$	$(T_0 - T_v)$	$(T_0 - T_{v_2})$	$Q_{v_1}(\text{kcal})$	$Q_{v_2}(\text{kcal})$
20	55	54.7	5	5.3	-75	-143,1
40	52	53	8	7	-120	-189
60	50	51.5	10	8.5	-150	-229,5
80	47.5	49.5	12,5	10.5	-187,5	-283,5
100	45.5	48.4	14,5	11.6	-217,5	-313,2
120	43	47	17	13	-255	-351
140	41.75	45.5	18,25	14.5	-273,75	-371,5
160	40	44.5	20	15.5	-300	-418,5
180	39.5	44	20,5	16	-307,5	-432
200	38	43	22	17	-330	-459

Les pertes de chaleur croissent lorsqu'on augmente le volume. Les trois paramètres : le niveau thermique, le volume du stock et le nombre de vitres influent d'une manière accentuée sur le comportement du capteur.

De ces observations, on peut déduire que le stockage de l'eau dans notre capteur sera d'autant plus meilleur que la température de l'eau n'est pas trop élevée, que son volume est choisi convenable et qu'un double vitrage est mis en jeu.

Nous remarquons que dans la partie expérimentale ci-dessus, on n'a fait que simuler le comportement qu'aurait eu le capteur s'il avait accumulé de l'énergie solaire et ce dans différentes conditions opératoires.

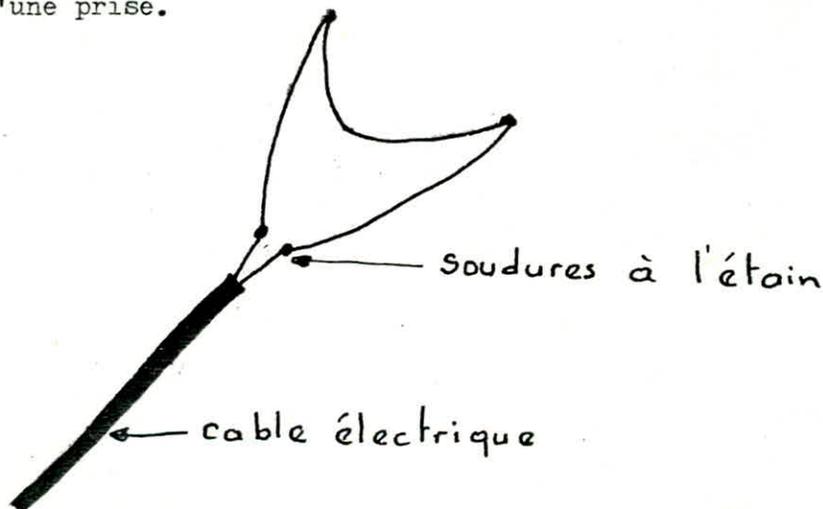
### 3 - 4 - Stockage de l'énergie solaire dans l'eau

Nous avons placé notre capteur plan horizontalement en un lieu où on pourrait capter l'optimum de l'énergie solaire entre 11 h 30 mn à 4 h 30 mn , c'est à dire aux moments où les rayons solaires sont sensés être au moins pour une partie du temps, perpendiculaires au plan du capteur .

Nous avons préalablement vérifié son horizontalité à l'aide d'un niveau à bulles, ce qui nous a contraint à le relever de quelques centimètres de chaque côté ( polystyrène, carton, briques etc ...), ceci vu que le sol n'était pas lui même horizontal.

Pendant 2 journées successives, nous l'avons rempli de 22 litres d'eau distillée prise à la température ambiante et nous l'avons exposé au soleil depuis 8 h 30 du matin jusqu'à 6 h 30 mn du soir , ceci en ayant pris le soin d'utiliser une vitre la première journée, puis 2 la seconde.

On a alors employé le millivoltmètre "galvanomètre sensible" déjà utilisé lors de l'étalonnage des thermocouples pour relever la température de l'eau toutes les quinze minutes à trente minutes , ainsi qu'un thermocouple qu'on a fait allonger par un fil électrique ordinaire afin qu'il puisse atteindre le capteur plan placé bien loin d'une prise.



La soudure chaude du thermocouple fut intégrée par un des trous faits déjà dans les parties latérales du capteur, alors que la source froide baignait dans un vase dewar contenant de la glace fondante :

Les deux fils du câble électrique furent connectés aux pôles du millivoltmètre. Les résultats obtenus, traduits par les 2 courbes tracées (tableaux 5 et 6) révèlent que :

- durant les 2 expériences, il y a eu augmentations de la température jusqu'à un maximum puis une diminution, prouvant ainsi l'accumulation sous forme de chaleur sensible de l'énergie solaire dans l'eau pendant au moins les 6 à 7 premières heures du jour 10 h à 16 h , puis comme le soleil a tendance à disparaître, l'énergie incidente étant plus faible, la température de l'eau en ressent l'influence en subissant une diminution ; en plus , on sait bien que le rendement du capteur diminue avec la température , donc c'est fort possible que les pertes s'étant accentuées avec l'élévation de température de l'eau, elles l'ont alors diminué.

- La température maximum dans le cas du double vitrage  $T_{(d \text{ max})} = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$  expliquant le rôle anti-perte du double vitrage.

- On remarque que durant les premières heures de chauffe, le double vitrage ne joue pas tellement son rôle escompté, vu que les températures de l'eau sont plus élevées alors dans le cas du simple ; ce qui peut être expliqué par une inertie thermique de sa part.

Les maximums de la température de l'eau sont décalés l'un par rapport à l'autre le maximum pour le double vitrage est obtenu après une durée de temps peu longue. (durée de chauffe longue).

Calcul du maximum de l'énergie accumulée :

$$\left\{ \begin{array}{l} - \text{ simple vitrage : } Q_s = 22 \times 1 \times 1 \times (49 - 22,8) = 576,4 \text{ k cal} \\ - \text{ double vitrage : } Q = 22 \times 1 \times 1 \times (55,8 - 22) = 743,6 \text{ k cal} \end{array} \right.$$

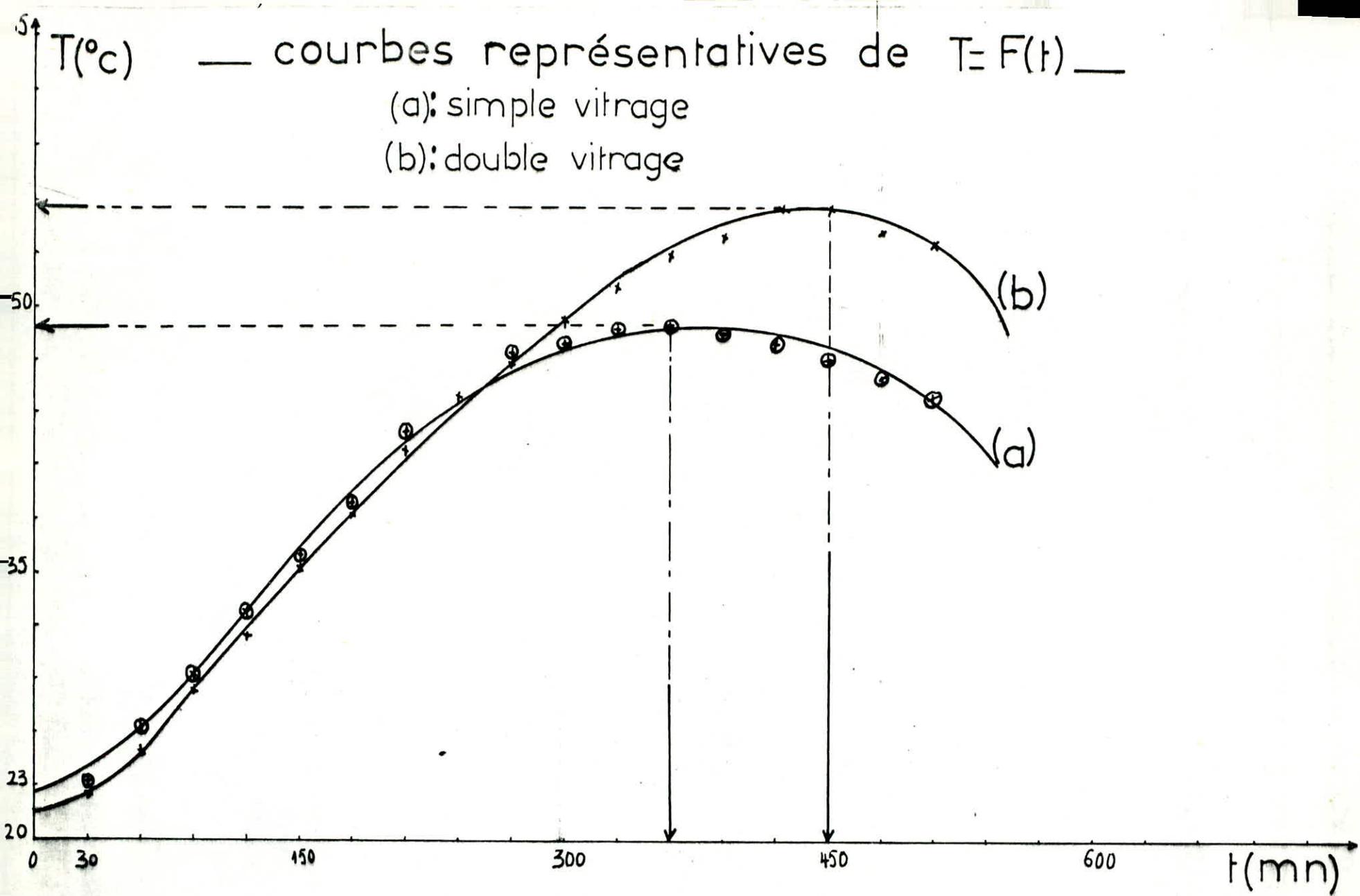
$C_{P_1} \int_1^C$  sont considérés alors *us* dans le domaine de température de fonctionnement.

-TABLEAU DE VALEURS N°(5)-  
 - un simple vitrage -

$t(\text{mn})$	$\Delta v(\text{lue})$	$\Delta v(\text{mv})$	$T(^{\circ}\text{c})$	$T_{\text{O}}(^{\circ}\text{c})$
0	25	0.2343	22.8	23
30	25.4	0.2381	23.4	24.5
60	28.5	0.2671	26.5	25
90	31.4	0.2943	29.4	25
120	35	0.3281	33	26
150	38	0.3562	36	26
180	41	0.3843	39	27
210	45	0.4218	43	27
240	47	0.4406	45	26
270	49.5	0.4640	47.5	26
300	50	0.4687	47.9	26
330	50.8	0.4762	48.8	25.5
360	51	0.4781	49	25
390	50.5	0.4734	48.5	25
420	50	0.4687	47.9	25
450	49	0.4593	47	25
480	48	0.45	46	24
510	47	0.4406	45	23.5

- TABLEAU DE VALEURS N°(6) -  
- double vitrage -

t (mn)	$\Delta v$ (lue)	$\Delta v$ (mv)	T (°c)	T <sub>0</sub> (°c)
0	24	0.225	22	21.7
30	24.6	0.2315	22.6	22
60	27	0.2531	25	23.5
90	30.5	0.2859	28.5	22.2
120	33.5	0.314	31.5	22.5
150	37.5	0.3515	35.5	23.2
180	40.4	0.3787	38.4	23.2
210	44	0.4125	42	23.2
240	47	0.4406	45	23.2
270	49	0.4593	47	23.2
300	51.2	0.48	49.2	23.2
330	53.5	0.5015	51.2	23.2
360	55	0.5156	53	23.2
390	56.1	0.526	54.1	23.9
420	57.8	0.5418	55.8	24
450	57.5	0.539	55.5	24
480	56.5	0.5296	54.2	24
510	55.5	0.5203	53.5	24



#### 4 - L'accumulation de l'énergie solaire dans la paraffine.

Avant d'entamer la 2ème partie d'expérimentation, il a fallu déterminer les caractéristiques du corps que nous voulions utiliser comme accumulateur. Pour cela, on a mesuré sa masse volumique à l'état solide, à l'état liquide à 60 °c et sa température de fusion.

En s'étant référé aux travaux déjà cités des trois chercheurs français, on a pu avoir les valeurs des autres propriétés de la paraffine, vu que les volumes de la masse volumique à l'état solide ainsi qu'à l'état liquide trouvés par nous se rapprochaient beaucoup des siennes.

##### 4 - a - Détermination du point de fusion.

On prend un petit morceau de paraffine, qu'on réduit en petites particules en raclant dessus. Pour un premier essai, on injecte une particule dans un tube capillaire qu'on introduit directement dans l'orifice de l'appareil à points de fusion.

Par une sortie d'écran transparent, on observe l'évolution de l'état du bout de paraffine. Au moment où la première goutte de liquide apparaît, on lit la température sur le thermomètre déjà placé. On refait cet essai 2 à 3 fois pour s'assurer du résultat obtenu.

Résultat expérimental : La température de fusion de la paraffine  $T_f$  est de :

$$\begin{array}{l} 1) T_f = 52^\circ\text{c} \\ 2) T_f = 52^\circ\text{c} \\ 3) T_f = 52^\circ\text{c} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} 1) \\ 2) \\ 3) \end{array}} \right\} \implies \text{une moyenne de } 52^\circ\text{c}$$

##### 4 - b - Détermination de la masse volumique à l'état liquide (60°C)

On met 10 g à 15 g de paraffine dans une éprouvette qu'on introduit dans un bain thermostaté réglé à  $T = 60^\circ\text{c}$ .

Cette température étant supérieure à  $T_f$ , maintiendra la paraffine à l'état liquide. On attend que l'équilibre entre l'eau chaude du bain et la paraffine se fasse, on plonge ensuite un aéromètre dans l'éprouvette, par une lecture directe sur la colonne en verre émergente, on obtient la masse volumique.

Résultat expérimental obtenu  $\approx 0,774 \text{ g/cm}^3$

##### 4 - c - Détermination de la masse volumique à l'état solide.

On prend un petit cristalliseur dont on mesure le volume  $V_c$  - (soit en le remplissant d'eau et en évaluant le volume d'eau utilisé ; soit en prenant ses dimensions et par un simple calcul on le déduira) - et qu'on pèse.

On obtient alors :  $P_1$  ; on y introduit de la paraffine sous forme liquide jusqu'à le remplir et on le laisse à l'air ambiant dans le but d'une solidification de la paraffine. " Il faut tenir compte de la diminution du volume de la paraffine lors de la solidification ; aussi, il faut bien s'assurer que le volume du cristalliseur soit bien plein avant de peser de nouveau ".

On repèse ensuite le tout, on obtient un poids  $P_2$

$$P_2 - P_1 = \text{poids de la paraffine} = P_f$$

$$(T \text{ ambiant}) = \frac{P_f}{V_c}$$

On refait l'expérience une à deux fois.

Résultats expérimentaux obtenus :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 67,3395 \text{ g} \\ P_2 = 129 \text{ g} \end{array} \right. \implies P_f = 61,66 \text{ g}$$

$$s \times h = V_c \quad \text{OU} \quad s = \frac{d^2}{4} \quad \text{OU} \quad \begin{cases} (s = \text{surface de base du cristalliseur}) \\ (d = \text{diamètre du cristalliseur utilisé}) \\ (h = \text{auteur du cristalliseur.}) \end{cases}$$

$$V_c = \frac{(10,2)^2}{4} \cdot (3,14) \cdot (0,9) = 73,50 \text{ cm}^3$$

$$(24^\circ\text{c}) = 0,838 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{d'après théorie : } (20^\circ\text{c}) = 0,860 \text{ g/cm}^3$$

4 - d - Les conductivités thermiques  $\lambda_l$  et  $\lambda_s$  :

$$\lambda_l = \lambda_s = 0,21 \text{ watts/m}^\circ\text{c} \text{ dans le domaine des températures de fonctionnement } (20 \text{ à } 70 \text{ }^\circ\text{c})$$

4 - e - Les chaleurs spécifiques  $C_{p_l}$  et  $C_{p_s}$  :

$$C_{p_l} = C_{p_s} = 1,7 \text{ J/g}^\circ\text{c} , (0,406 \text{ cal/g}^\circ\text{c})$$

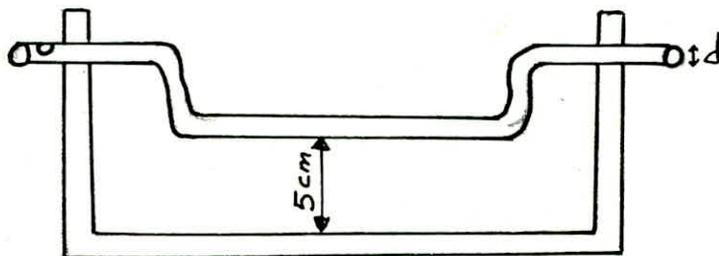
4 - f -  $L_f =$  Chaleur latente de la paraffine 190 j/g

4 - g - Le facteur total de réflexion normale à l'(interface air paraffine liquide  $r_1 = 0,034$

4 - h - Le coefficient d'extinction  $K = 0,138 \text{ cm}^{-1}$

5 - EXPERIMENTATION :

On a fait fondre 22 kg de paraffine qu'on a déversé dans le capteur plan placé horizontalement, ceci après avoir fait subir à ce dernier certaines modifications : l'ajout d'un échangeur de chaleur en cuivre qui, pour une première étude, a été choisi comme un simple tube auquel on a essayé de donner la forme suivante :



Il est placé à 5 centimètres du fond et a les dimensions :

$$\begin{cases} d = 1,2 \text{ cm} \\ l = 1,30 \text{ cm} \end{cases}$$

Il fut introduit dans la boîte par 2 trous qu'on a fait directement sous la bordure en bois du capteur. Aux 2 bouts du tuyau de cuivre on a accroché 2 tuyaux en caoutchouc dont l'un est connecté directement à l'(orifice du robinet et l'autre va vers les égouts. On a laissé alors la paraffine se solidifier à l'air ambiant pendant toute une nuit.

A 8 h 30 mn de la journée suivante ayant mis en jeu un double vitrage, on l'a exposé au soleil.

Les premières gouttelettes liquides sont arrivées à 10 h 15 mn et on a observé un ramolissement de la paraffine. (surtout sur les parties directement en contact avec le métal).

On pensait stocker de la chaleur jusqu'à 3 h de l'après midi, c'est à dire jusqu'à l'obtention d'une phase liquide assez épaisse qui nous permettra de transférer la chaleur récupérée dans l'eau circulant dans le tube de cuivre, cette eau étant alors actionnée par sa seule pression.

Malheureusement, les résultats auxquels on a abouti après 6 h de chauffe n'étaient pas à nous satisfaire .

Certes, on a constaté un ramolissement plus poussé de la paraffine mais n'empêche que le changement d'état attendu ne s'était pas manifesté.

On peut néanmoins expliquer l'absence de la fusion de la paraffine par :

- sa couleur blanchâtre qui confère un facteur de reflexion assez important, donc l'énergie absorbée à la surface est faible.
- l'utilisation d'une épaisseur appréciable ( $m_p = 22$  kg correspondant à une épaisseur de 8,5 cm) qui fait que, comme les phénomènes de transfert de chaleur n'est que la conduction et que l'énergie absorbée à la surface est faible, le transfert de chaleur jusqu'à l'eau se fera alors difficilement.

Le phénomène de rayonnement et sa propagation dans la phase solide étant négligés car le facteur d'extinction est important :

$$\phi(x,t) = (1 - c_1) \phi_0(t) e^{-Kx}$$

$\phi(x,t)$  : flux transmis à une profondeur x de la surface supérieure de la paraffine liquide .

$\phi_0(t)$  : flux incident sur la paraffine comme il est très important dans le cas du solide :

$$e^{-Kx} \text{ -----} \rightarrow 0 ; \text{ D'où } \phi(x,t) \text{ -----} \rightarrow 0$$

La diminution de l'épaisseur de la paraffine ne nous intéressant pas aussi on a pensé à la colorer par l'huile de vidange noirâtre (automobile) dans le but d'augmenter son facteur d'absorption .

$\alpha_s$  où s désigne la phase solide

$$\alpha_s = \frac{\phi(t)}{\phi_0(t)} \text{ -----} \text{ où } \phi(t) : \text{ quantité d'énergie absorbée en surface.}$$

- Détermination de la masse volumique  $\rho_h$ :

$$\text{à } 24 \text{ }^\circ\text{C} \text{ ( utilisation de l'acromètre ) } \rho_h = 0,89 \text{ g/cm}^3$$

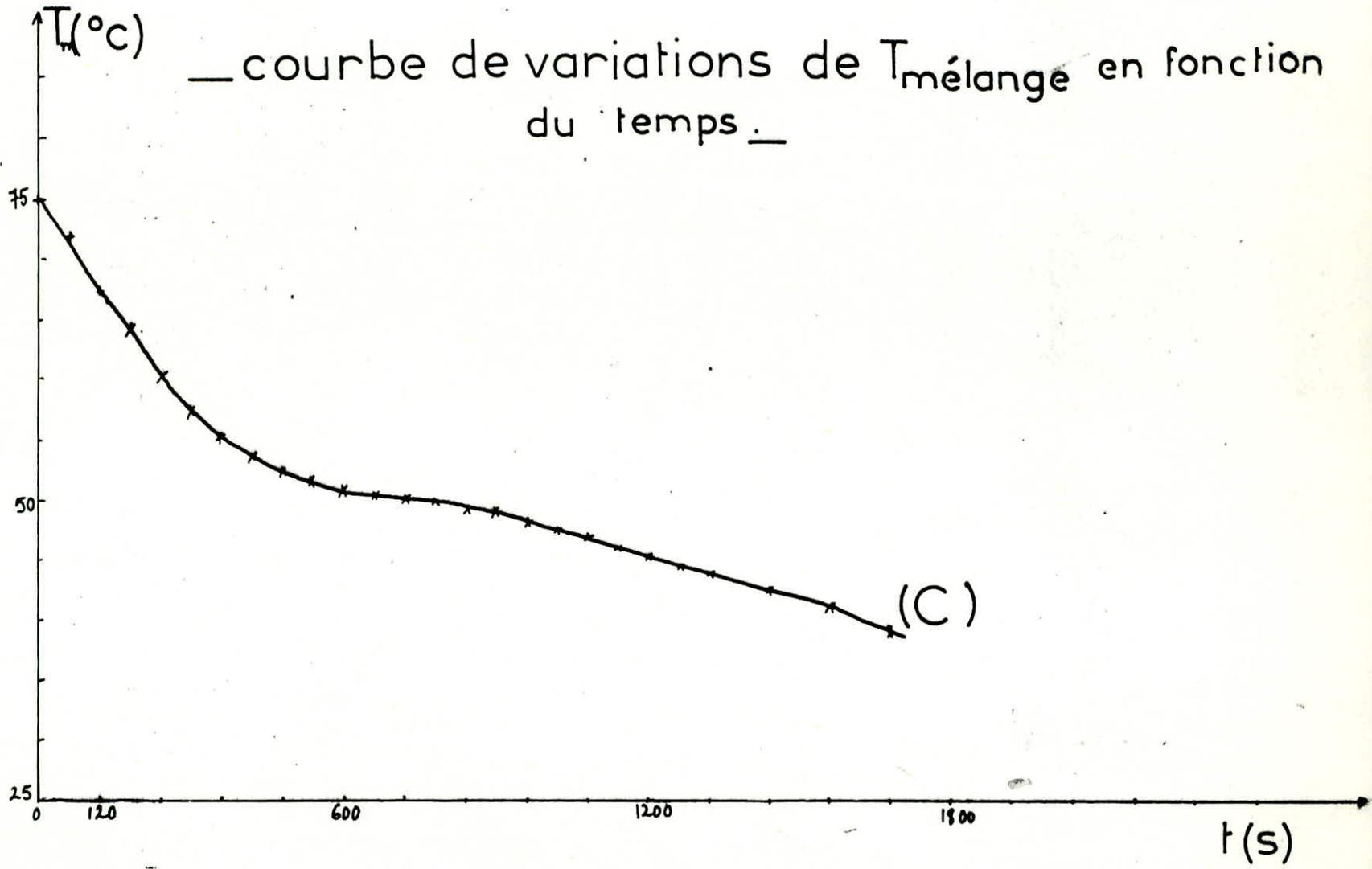
-  $C_{P_{huile}}$  trouvé dans la littérature = 0,57 K cal/kg $^\circ$ C

Pour examiner si le mélange pouvait être bien homogénéisé, ne présente pas de points de surfusion et dans quel pourcentage d'huile il devait alors être mélangé, on a procédé à une série d'expériences au laboratoire.

— tableau de valeurs pour courbe  
(C) —

$t(s)$	$T_m (°C)$	$T_a$
0	75	23
60	72	23
120	67.5	23
180	64	23
240	60	23
300	57	23
360	55	23
420	53.2	23
480	52	23
540	51.2	23
600	50.5	23
660	50.5	23
720	50	23
780	50	23
840	49.1	23
900	49	23
960	48	23
1020	47.5	23
1080	47	23
1140	45.9	23
1200	45.1	23
1260	44.5	23
1320	44	23
138	42.5	23
1560	41	23
1680	39	23
1800	38	23

— courbe de variations de  $T_{\text{mélange}}$  en fonction du temps —



- La non existence d'un point de surfusion .

Mode opératoire

On a pris 4 g de paraffine auxquels on ajoute 1 g d'huile, on introduit le tout dans un tube qu'on plonge dans un bain-marie. Après fusion totale du mélange, on le retire du bain, on homogénéise bien le tout puis on y introduit un thermomètre ; on note alors la température du mélange toutes les 1 à 2 minutes .

Les résultats obtenus sont donnés par la courbe (C) révélant que notre mélange n'a pas de points de surfusion ce qui nous éclaire sur sa capacité d'accumulation .

\* La non hétérogénéité du mélange apparait pour les hautes températures, ce qui n'est pas le cas pour les basses températures.

\* Le choix des 20 % d'huile qu'on introduit dans le mélange ( huile + paraffine ) est basé sur le fait que pour ce pourcentage, la chaleur accumulée est plus grande .

Mode opératoire ( mélange paraffine + huile )

On a fait fondre 18 kg de paraffine auxquels on a ajouté 4,5 Kg d'huile de vidange afin d'avoir une bonne homogénéisation. On a procédé alors aux mêmes étapes que pour la paraffine blanche, en ce qui concerne tout ce qui a été fait avant son exposition au soleil à 8 h 30 mn.

Des essais précédemment faits nous ayant prouvé que la phase liquide obtenue dans le cas du mélange ( paraffine + huile ) n'atteignait pas le tube en cuivre, nous ont poussé à relever ce dernier afin qu'il emmerge dans la phase liquide.

A 3 h de l'après midi c'est à dire après récupération d'une certaine quantité de chaleur, et l'observation de la fusion, on a ouvert le robinet d'eau courante, on a noté la température de cette dernière avant son introduction dans le tube en cuivre, ainsi qu'on a réglé le débit de circulation d'eau, on a choisi un débit faible de 7 ml/s et on relevé la température de sortie de l'eau toutes les 5 minutes pendant une heure.

Résultats expérimentaux :

La température de rentrée de l'eau est de 25 ° c .

La température maximum obtenue au sein du mélange ( paraffine + huile ) est 72 ° c

L'épaisseur maximum liquide est de 3,5 cm

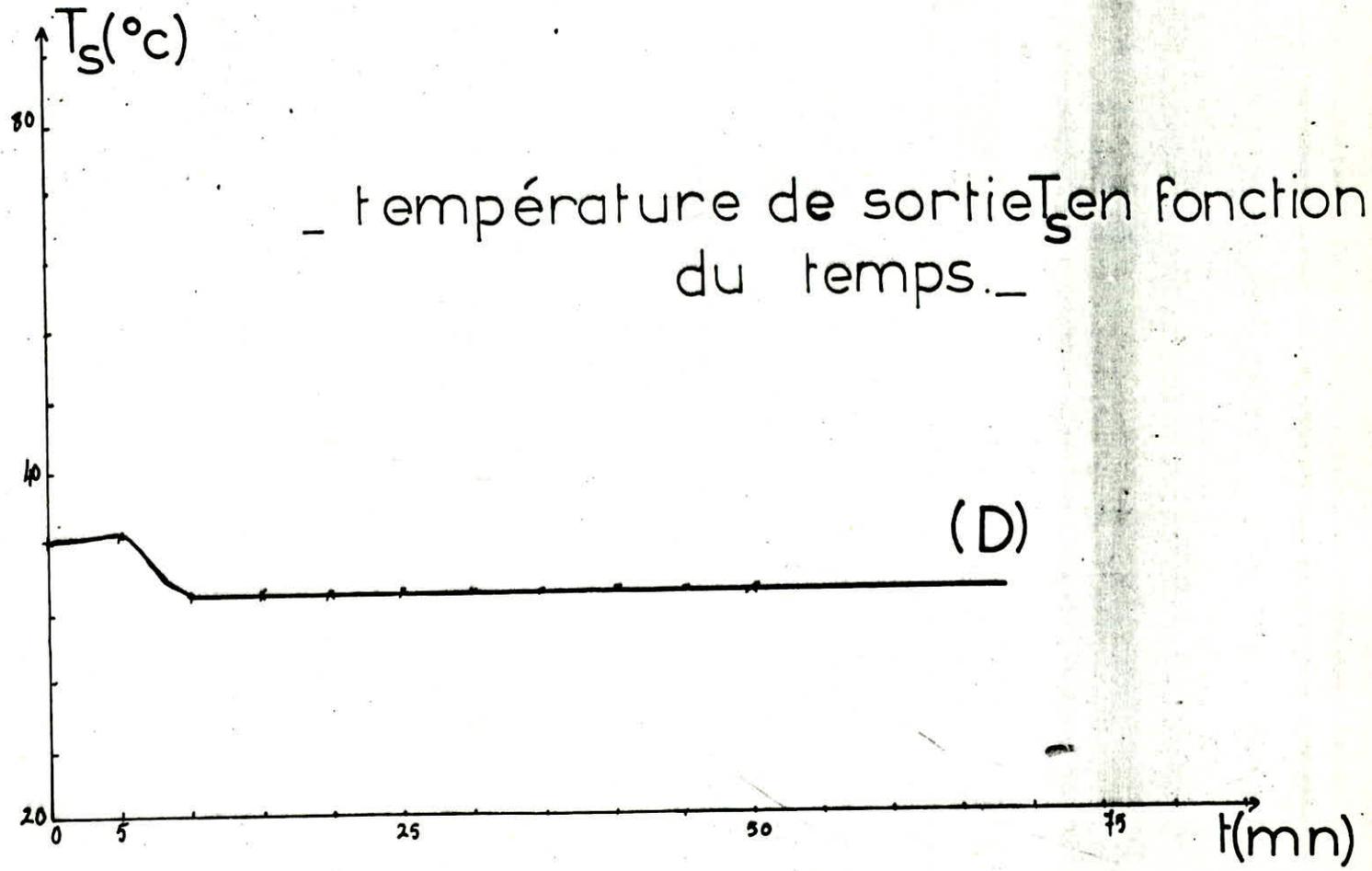
La température de sortie de l'eau est de 36 ° c après 5 mn de transfert, monte d'une unité puis descend à 33 ° c et y reste stationnaire.

Le palier obtenu peut être expliqué par le fait que le tube en cuivre s'entoure d'une phase solide du mélange ( paraffine + huile). On a pu constater cette phase solide dont on n'a pas pu apprécier l'épaisseur vu le manque de matériel.

— température de sortie de l'eau  
en fonction du temps. —

t(mn)	$T_S$ (lue)	$T_S$ (mv)	$T_S$ (°c)	débit l/s
5	37.8	0.3543	36	7.14
10	38	0.3562	36.1	7.14
15	35	0.328	33	7.14
20	35	0.328	33	6.25
25	35	0.328	33	6.25
30	35	0.328	33	5.88
35	35	0.328	33	5.55
40	35	0.328	33	5.55
45	35	0.328	33	6.66
50	35	0.328	33	4.15
55	35	0.328	33	4.54
60	35	0.328	33	4.54

- 61 -



Calcul de la capacité calorifique du mélange :

$$(m_h + m_p) C_{p_m} = m_h \cdot C_{p_h} + m_p \cdot C_{p_s}$$

OU

$$\begin{cases} C_{p_m} = \text{chaleur spécifique du mélange} \\ C_{p_h} = \text{chaleur spécifique de l'huile} = 0,57 \text{ cal / g}^\circ\text{c} \\ C_{p_s} = \text{chaleur spécifique de la paraffine .} \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_h = 4,5 \text{ kg} \\ m_p = 18 \text{ kg} \end{cases} \quad \begin{cases} C_{p_h} = 0,57 \text{ cal / g}^\circ\text{c} \\ C_{p_s} = 0,406 \text{ cal / g}^\circ\text{c} \end{cases}$$

donc  $(m_h + m_p) C_{p_m} = (4,5 \times 0,57) + (18 \times 0,406) = 9,87 \text{ cal / }^\circ\text{c}.$

Comme la température n'est pas uniforme au sein de mélange, l'évaluation de la quantité de chaleur absorbée est difficile.

## CONCLUSION

Lors de ce projet, on a construit un capteur plan avec les moyens sommaires dont on a disposé, celui-ci a été réalisé dans le but de jouer le rôle d'une isolation thermique pour 2 accumulateurs choisis : l'eau et la paraffine.

Avant l'expérimentation proprement dite, vu le manque de thermocouples, on en a fabriqué nous-mêmes à partir de fils métalliques disponibles ( fer, cuivre ), ainsi nous avons appris la manière dont on les fait et constaté les problèmes qui pourraient se poser si les soudures ne sont pas bien faites.

On a entrepris après cela des essais de simulation du comportement du capteur réalisé, vis à vis de la chaleur déjà accumulée dans son contenu ; on a constaté que le double vitrage, la basse température ainsi que des volumes convenablement choisis pour le stock, ont une influence directe sur les pertes de chaleur ce qui vérifie la théorie.

En deuxième lieu, on a fait des expériences au soleil en utilisant l'accumulateur eau . Les résultats auxquels on a aboutit étaient satisfaisants, toutefois on pourrait les améliorer dans le cas de l'utilisation d'un isolant thermique plus efficace que le bois, par ex. du liège (celui ci résiste bien à l'humidité et a une conductivité thermique faible de l'ordre de 0,043 watts/m°C comparativement à celle du bois qui vaut 0,15 watts/m°C ). Durant cette partie d'expériences, on a encore approuvé la théorie concernant l'effet anti-perte du double vitrage.

Dans une troisième partie d'expérimentation, on a utilisé l'accumulateur : paraffine. Cette dernière utilisée en grande épaisseur n'aboutit pas à un résultat positif, vu que même sa surface ne se liquifia pas. ( seules des gouttelettes liquides éparses ont été observées ) ; ce qui nous a permis de mettre en marche la circulation d'eau dans le tube de cuivre utilisé pour l'échangeage de chaleur entre l'eau et la paraffine chauffée. Cette troisième série d'expériences nous a montré l'effet de l'épaisseur sur l'accumulation de l'énergie solaire, néanmoins, dans la partie expérimentale qui a suivi, nous n'avons pas joué sur ce paramètre, mais sur le paramètre facteur d'absorption  $\alpha_s$  .

Pour cela, on a employé l'huile de vidange pour la coloration de la paraffine en noir dans le but d'augmenter son pouvoir absorbant. On a utilisé alors un mélange ( paraffine huile ) à 20 % d'huile , dont on a testé premièrement l'homogénéité ainsi que la possibilité d'existence d'un point de surfusion. Les résultats obtenus nous ont révélé que le mélange fait a des capacités d'absorption vu qu'on a abouti à une phase liquide de 3,5 centimètres d'épaisseur, et que le transfert de chaleur se faisant, on est parvenu à une différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée  $\Delta t = 11^\circ\text{C}$  . Ce résultat pourrait être augmenté dans le cas de l'utilisation d'une grande surface d'échange ( tube de cuivre de forme serpentin ... ).

Durant cette étude, nous avons rencontré pas mal de problèmes à cause du manque de matériel ( pas de pyranomètre pour l'évaluation du flux solaire, par conséquent les rendements du capteur dans le cas de l'eau n'ont pas été calculés - manque de galvanomètre pour prendre les températures en plusieurs lieux de l'accumulateur etc.

Nous espérons que ce travail sera continué en commençant par de petites épaisseurs de paraffine .

- B I B L I O G R A P H I E -

=====

- (1) F. KHREITH, transmission de la chaleur electrothermodynamique MASSON et C<sup>ie</sup>  
Editeurs 120 Boulevard Saint Germain Paris VI " 1967 "
- (2) R. BERNAM, G. MENGUN, MSCHWARTE "les caractéristiques du rayonnement solaire,  
conversion thermique et applications "
- (3) DR. T. CABIROL, A. PELISSON, D. ROUX, " Le chauffe-eau solaire" edi sud,  
la Calade - RN 7 - 13 IOO AIX EN PROVENCE ( 1976)
- (4) P. AUDIBERT- " énergies du soleil " .
- (5) par M.M FAROUK OUAIL ) " Etude et réalisation d'un chauffe-eau solaire "  
RABAH ZEKADI ) projet de fin d'études - Bouzaréah .
- (6) DR. EDWARDS - " Capteurs solaires " SCM Paris 1979- traduction L. MARLOT.
- (7) R. DUMON - " Energie solaire et stockage d'énergie " MASSON, Paris 1977 , 1979  
ISBN : 2 - 225 - 63503 - x  
ISBN 0399 - 1881.
- (8) F. SOUABI - " Contribution à l'étude expérimentale du chauffage par énergie  
solaire " projet de fin d'études ( 1975)
- (9) Revue énergie solaire pratique ( Année 1977 ) .

