

UNIVERSITE D'ALGER  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

6/75

Département de Mécanique

2<sup>ea</sup>

# THESE DE FIN D'ETUDES

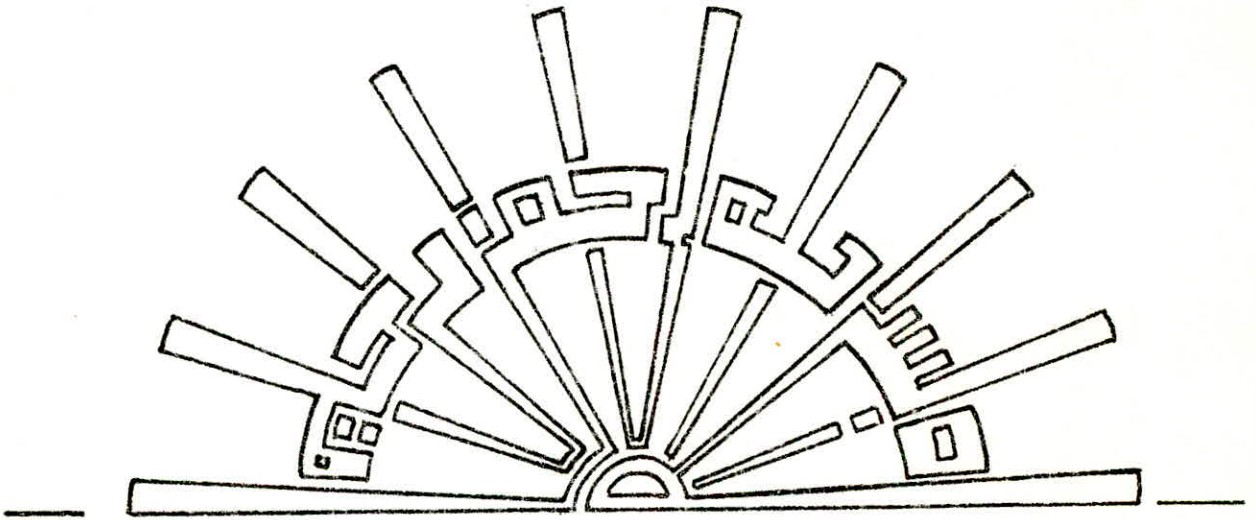
RECHERCHES SUR LES ANOMALIES  
DE DISTRIBUTION DE TEMPERATURE  
DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES  
DES METAUX - EFFET JACQ

Proposée par:  
Mr. Gérard D'ALBON  
Professeur Dr. Ingénieur

Etudiée par:  
BENHASSINE M<sup>es</sup> Tayeb  
BELHAMEL Maïouf

PROMOTION 1975







UNIVERSITE D'ALGER  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Mécanique

# THESE DE FIN D'ETUDES

RECHERCHES SUR LES ANOMALIES  
DE DISTRIBUTION DE TEMPERATURE  
DANS LES COUCHES SUPERFICIELLES  
DES METAUX - EFFET JACQ

Proposée par :

Mr. Gérard D'ALBON

Professeur Dr. Ingénieur

Etudiée par :

BENHASSINE M<sup>es</sup> Tayeb

BELHAMEL Maïouf

PROMOTION 1975



Π) Ε Π) Π (C F) (C E)

§--:o:o:o:o:--=0o0o0=--:o:o:o:o:--§

Π-) N O S P A R E N T S

Ε T A M I S .

## REMERCIEMENTS

---o---o---OoO---o---o---

- Que Mr. le professeur GERARD D'ALBON qui nous a été de très bon conseil , trouve ici l'expression de notre profonde gratitude et de nos remerciements les plus vifs .
- Nous remercions également tous les professeurs qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, notamment : Messieurs LOUALI et BOFFA qui nous ont beaucoup aidé dans l'exécution des travaux de soudure et de tournage.
- Nous remercions également tous nos amis qui ont contribué à la frappe et au tirage du texte .

INTRODUCTION

1.1 - Rappels sur la loi de Fourier en regime permanent :

La conduction est une forme de transfert de chaleur par diffusion à travers un corps conducteur. La quantité de chaleur transférée est fonction de la température et de la nature du corps.

C'est Fourier qui , en 1822 , a donné une quantification à ce transfert de chaleur par la relation suivante :

$$dQ = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt$$

pour  $\lambda$  et  $S$  constantes , cette relation s'intègre en donnant :

$$Q = -\lambda S \frac{\Delta T}{e} . t$$

avec :  $\lambda$  = conductibilité thermique du corps ( $\lambda > 0$ )

$S$  = surface d'échange de chaleur

$\frac{\Delta T}{e}$  = gradient de temperature suivant la penetration  $e$  .

en pratique on introduit souvent les notions de flux thermique  $\phi = \frac{Q}{t}$  , de flux unitaire  $\psi = \frac{\phi}{S}$  , de resistance calorifique  $R = \frac{e}{\lambda S}$  , et de conductance

$$K = \frac{e}{\lambda S} = \frac{1}{R} . . .$$

Il s'en suit les relations suivantes :

$$* \quad \phi = -\lambda S \frac{\Delta T}{e} = K \cdot \Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

$$* \quad \psi = -\lambda \frac{\Delta T}{e} = \Delta T / \frac{e}{\lambda S} = \frac{\Delta T}{R} ,$$

la quantite ( $\frac{e}{\lambda S}$ ) représente une résistance unitaire (relative à l'unité de surface) .

Nous l'emploierons souvent dans la suite de notre texte lors de la phase de calcul .

$$* \quad \Delta T = - \frac{e}{\lambda} \cdot \psi , \text{ ce qui montre que la variation de la temperature en fonction de l'epaisseur est linéaire ( voir planche 1) }$$

.../...



Unités usuelles :

$[Q] = \text{kcal}$

$[T] = ^\circ\text{C}$

$[t] = \text{h}$

$[S] = \text{m}^2$

$[e] = \text{m}$

$[Q] = \text{kcal} / \text{h}$

$[Y] = \text{kcal} / \text{h.m}^2$

$[X] = \text{kcal} / \text{h.m.}^\circ\text{C}$

$[A] = ^\circ\text{C.h} / \text{kcal}$

$[R] = ^\circ\text{C.h.m}^2 / \text{kcal}$

$[K] = \text{kcal} / ^\circ\text{C.h}$

1.2- Effet Jacq :

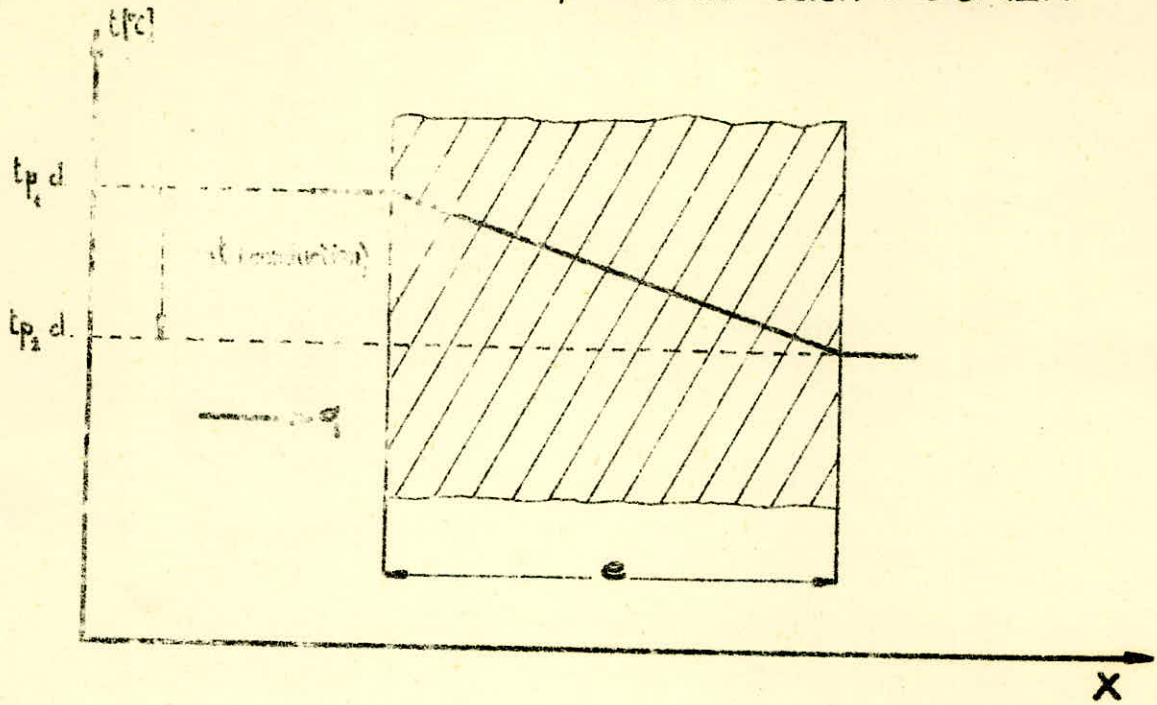
Le docteur ingénieur J. Jacq de la régie Renault ( France ), a constaté lors de travaux en fonderie et en traitements thermiques , que pour certaines parois traversées par un flux thermique , les températures mesurées s'écartent nettement de celles attendues , malgré l'élimination des causes d'erreurs systématiques dans la méthode de mesure . De même que la résistance thermique mesurée en régime stationnaire , par le contact indirect de deux blocs métalliques , est supérieure à la résistance des deux blocs séparés , calculable par la loi de Fourier .

Les recherches qu'il a poursuivies dans ce domaine aboutissent à l'existence d'une anomalie de distribution de température dans les couches sous-superficielles du métal . Dans cette zone , dont l'épaisseur est de l'ordre du dixième de millimètre , il apparaît un gradient de température beaucoup plus important que celui qui existe dans les couches sous-jacentes .

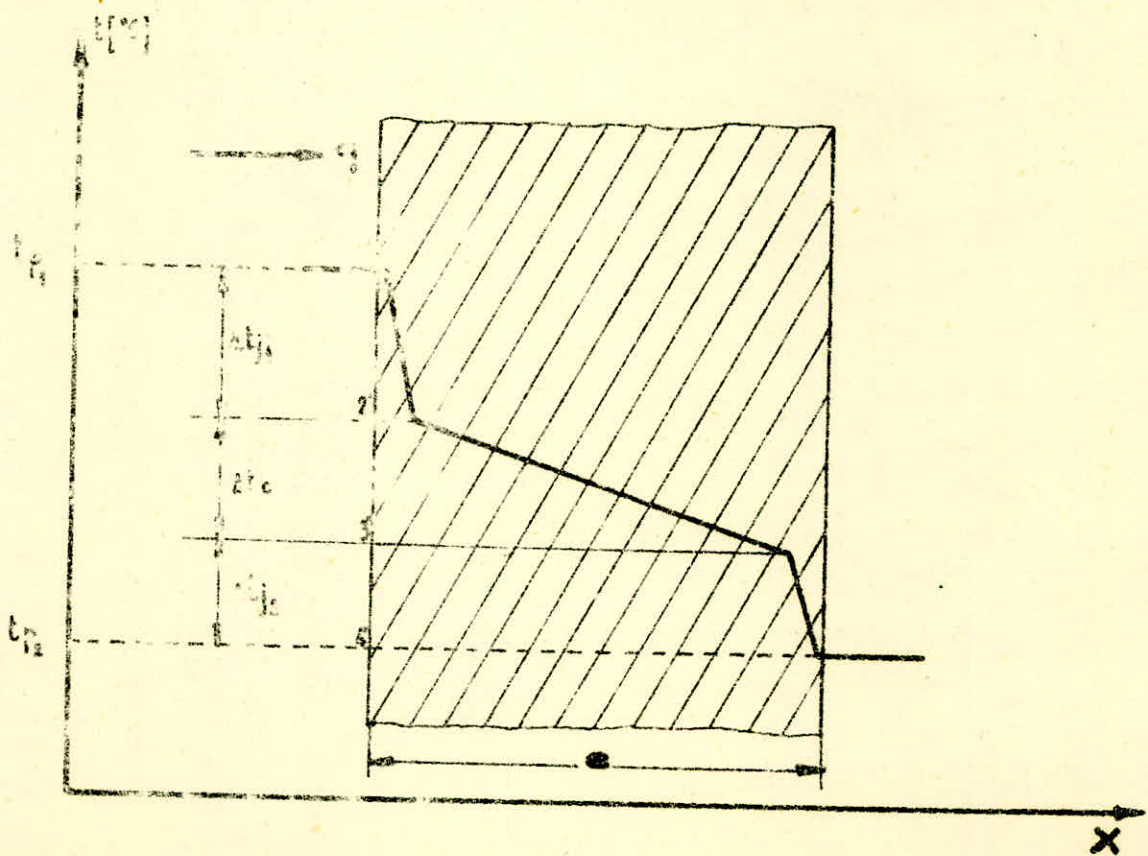
De ce fait , la distribution de température prend une autre configuration que celle donnée par la loi classique de Fourier en régime permanent (planche 1.) :

- juste à l'entrée , dans le sens du flux , il y a d'abord une chute normale qui obéit à la loi de Fourier jusqu'à une pénétration de 50  $\mu$  environ , mais elle est négligeable . Ensuite , il y a une très forte chute  $\Delta T_{j1}$  due à la couche Jacq à l'entrée, puis une chute normale de conduction  $\Delta T_c$  , puis une autre chute brusque  $\Delta T_{j2}$  due à la couche Jacq à la sortie et enfin une autre chute normale négligeable , juste à la sortie .

### Distribution des températures selon FOURIER



### Distribution des températures selon JACQ





- Les chutes Jacq  $\Delta T_{j1}$  et  $\Delta T_{j2}$  sont proportionnelles au flux unitaire  $\varphi$  :

$$\Delta T_{j1} = R_{j1} \cdot \varphi \quad \text{et} \quad \Delta T_{j2} = R_{j2} \cdot \varphi$$

Les indices 1 et 2 se rapportent respectivement aux faces d'entrée et de sortie du flux .

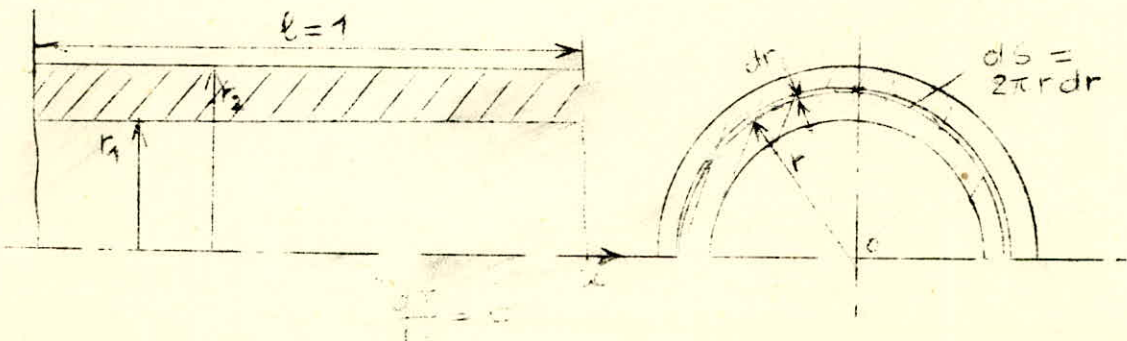
- Les deux constantes  $R_{j1}$  et  $R_{j2}$  qui traduisent les résistances thermiques unitaires des couches Jacq ont des valeurs différentes en première approche (  $R_{j1} > R_{j2}$  ) .

- Les chutes Jacq prennent leur amplitude maximale quand les deux faces 1 et 2 ne sont pas en contact direct avec le corps chauffant s'il est conducteur ( solide ou liquide ) . Ce phénomène s'aperçoit donc pleinement si le flux thermique est d'origine convective ou radiante . Si le flux thermique est un flux de conduction , il est recommandé de l'amener aux deux faces par entreposition d'une pellicule de matériau mauvais conducteur ( papier ) .

L'ensemble de ces constatations faites par Mr. Jacq ont attiré l'intérêt d'autres spécialistes qui se sont par la suite penchés sur la question et confirmé l'existence de ce qu'il est communément admis d'appeler aujourd'hui " l'Effet Jacq " . Nous citerons notamment l'expérience faite par Mr. G. d'Albon qui mit fin aux doutes :

\*. Expérience du Pr. G. d'Albon :

Soit un tube métallique A de conductibilité thermique  $\lambda$  et de résistivité  $\rho$  , chauffé électriquement sous une tension E et un courant I de densité  $j = \frac{dI}{dS} = \frac{I}{S} = \text{cste}$  .





- Les chutes Jacq  $\Delta T_{j1}$  et  $\Delta T_{j2}$  sont proportionnelles au flux unitaire  $\varphi$  :

$$\Delta T_{j1} = R_{j1} \cdot \varphi \quad \text{et} \quad \Delta T_{j2} = R_{j2} \cdot \varphi$$

Les indices 1 et 2 se rapportent respectivement aux faces d'entrée et de sortie du flux .

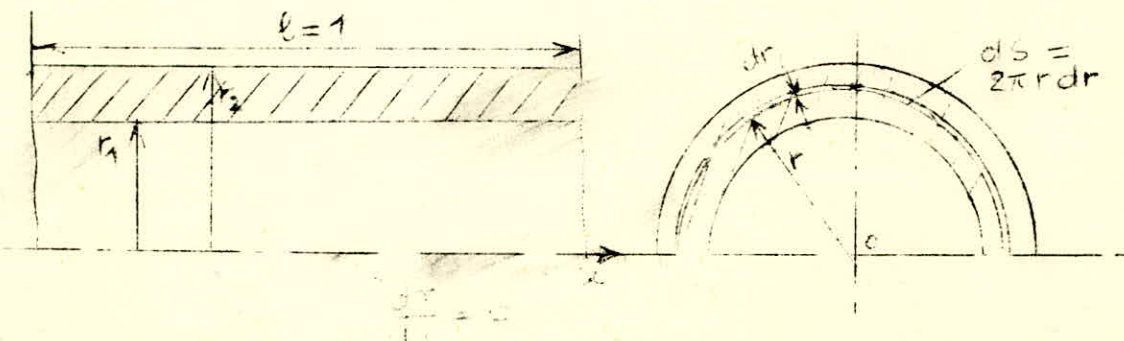
- Les deux constantes  $R_{j1}$  et  $R_{j2}$  qui traduisent les résistances thermiques unitaires des couches Jacq ont des valeurs différentes en première approche (  $R_{j1} > R_{j2}$  ) .

- Les chutes Jacq prennent leur amplitude maximale quand les deux faces 1 et 2 ne sont pas en contact direct avec le corps chauffant s'il est conducteur ( solide ou liquide ) . Ce phénomène s'aperçoit donc pleinement si le flux thermique est d'origine convective ou radiante . Si le flux thermique est un flux de conduction , il est recommandé de l'amener aux deux faces par entreposition d'une pellicule de matériau mauvais conducteur ( papier ) .

L'ensemble de ces constatations faites par Mr. Jacq ont attiré l'intérêt d'autres spécialistes qui se sont par la suite penchés sur la question et confirmé l'existence de ce qu'il est communément admis d'appeler aujourd'hui " l'Effet Jacq " . Nous citerons notamment l'expérience faite par Mr. G. d'Albon qui mit fin aux doutes :

\*. Expérience du Pr. G. d'Albon :

Soit un tube métallique A de conductibilité thermique  $\lambda$  et de résistivité  $\rho$  , chauffé électriquement sous une tension E et un courant I de densité  $j = \frac{dI}{dS} = \frac{I}{S} = \text{cste}$  .



Le flux thermique unitaire  $\varphi(r)$  résultant du passage du courant dans le tube, produit une différence de température  $(T_1 - T_2)$ , entre les faces intérieure et extérieure de celui-ci :

$$\begin{aligned} \varphi(r) &= \frac{1}{2\pi r} \int_{r_1}^{r_2} \rho j^2 \cdot 2\pi r \, dr \\ \varphi(r) &= \frac{\rho j^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2} \cdot \frac{1}{r} = \frac{\rho I^2}{2\pi^2 (r_2^2 - r_1^2)} \cdot \frac{1}{r} \\ T_1 - T_2 &= - \int_1^2 dT = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varphi(r)}{\lambda} \, dr = \frac{\rho I^2}{2\pi^2 (r_2^2 - r_1^2) \lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \\ T_1 - T_2 &= \frac{\rho I^2}{2\pi^2 (r_2^2 - r_1^2) \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \end{aligned}$$

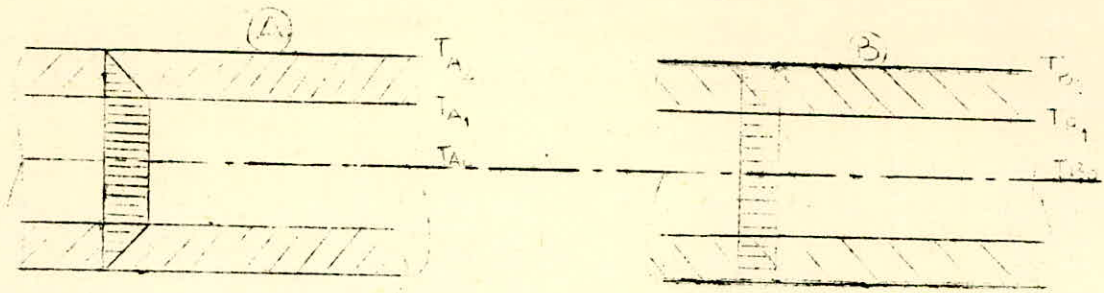
Il est donc possible de déterminer la différence de température  $(T_1 - T_2)$  uniquement par calcul sur les données du courant et des constantes physiques du métal, et ce avec une précision d'aurant plus poussée que ces données sont plus serrées.

Le principe de l'expérience citée réside dans la comparaison entre la différence de température  $(T_1 - T_2)_{th}$  établie par voie de calcul et la différence de température  $(T_1 - T_2)_m$  établie, avec le plus grand soin, par voie de mesure.

Mais la mesure directe des températures superficielles s'éloigne nettement de la réalité, et la pose d'un thermocouple sur une surface n'est jamais parfaite, ce qui fait que son indication n'est pas significative dans notre cas.

C'est dans cette fin qu'il a été établi une méthode indirecte dénuée d'erreurs systématiques. Cette méthode consiste à placer dans les mêmes conditions que le tube A, un autre tube de verre, B, recouvert d'une très mince pellicule de métal de même nature que celui de A, et soumis à la même puissance électrique EI. L'épaisseur de cette pellicule doit être de l'ordre du micron pour que la chute thermique qu'elle pourrait entraîner soit parfaitement négligeable.





La distribution des températures à l'intérieur des deux tubes prend l'allure indiquée sur le schéma. A l'intérieur du tube A il n'y a pas de flux thermique et la température est la même partout, en particulier  $T_{A0} = T_{A1}$ . Pour le tube B, la source de chaleur est localisée juste à la paroi extérieure et le flux thermique est partout nul à l'intérieur de la pellicule métallique, d'où  $T_{B0} = T_{B1}$ .

Mais  $T_{B2} = T_{A2}$  car, au régime stationnaire, il ne peut qu'en être ainsi pour les deux tubes soumis aux mêmes conditions. Finalement  $(T_1 - T_2)_m = T_{A1} - T_{A2} = T_{A0} - T_{B0}$ .

La mesure de  $T_{A0}$  et  $T_{B0}$  est aisée car des thermocouples bien soignés, posés à l'intérieur des deux tubes permettent de les relever avec précision.

$$\Delta = (T_1 - T_2)_m - (T_1 - T_2)_{th}$$

L'expérience a prouvé que  $\Delta$  n'est jamais nul. Tout se passe comme s'il y avait introduction d'une résistance thermique supplémentaire inconnue jusqu'à lors. On attribue cette résistance aux couches Jacq existantes au sein du métal; soit  $R_j$  cette résistance.

$$\Delta = R_j \cdot \varphi \qquad R_j = \frac{\Delta}{\varphi}$$

Cette résistance thermique  $R_j$  est tout de même notable puisque la chute thermique totale qu'elle entraîne, sous l'hypothèse de Fourier, correspond à une épaisseur de 300 mm pour le cuivre, de 106 mm pour l'aluminium, de 55 mm pour le nickel et de 31 mm pour le fer.



Chapitre 1

CONTENU DES RECHERCHES PRESENTÉES

1.1 - Projet initial :

Il y a deux ans déjà , pendant l'année universitaire 1972.- 1973 , Mr d'Albon nous avait fait part de l'existence de l'effet Jacq et de son désir d'effectuer des recherches dans ce domaine. Cela nous a amené à étudier ensemble les plans d'un appareil expérimental qui puisse servir à la mesure quantitative de la résistance thermique d'échantillon métalliques de faible épaisseur.

Le principe adopté consiste à faire passer un flux thermique donné à travers deux conducteurs mis en juxtaposition. L'échantillon à examiner , mis entre ces deux conducteurs , est préalablement isolé de ceux-ci par deux feuilles de papier à cigarette pour que l'effet désiré puisse se manifester pleinement. Des thermocouples permettent de relever les différentes températures au sein des deux conducteurs en fonction de l'épaisseur traversée par le flux.

La distribution des températures qui en résulte se trouve alors affectée par la présence de l'échantillon entre les deux conducteurs et manifeste une coupure prononcée au niveau de celui-ci.

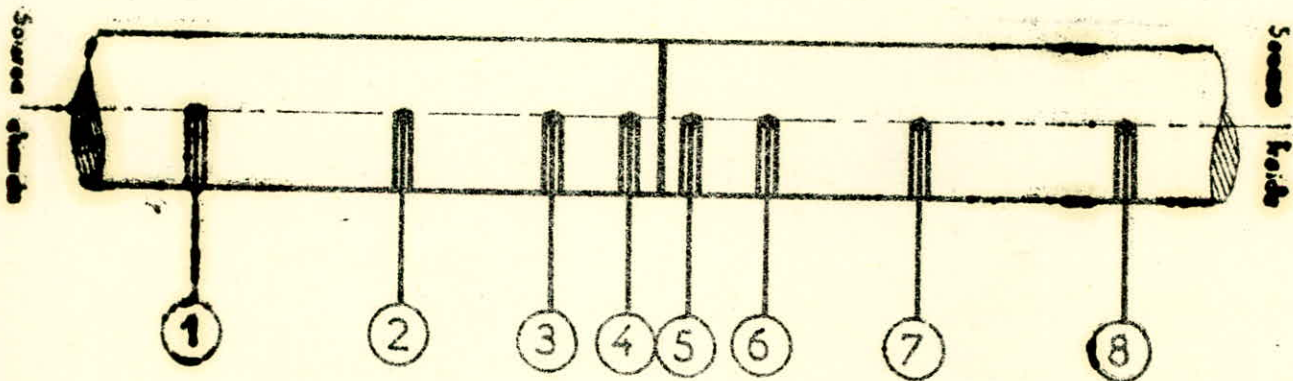
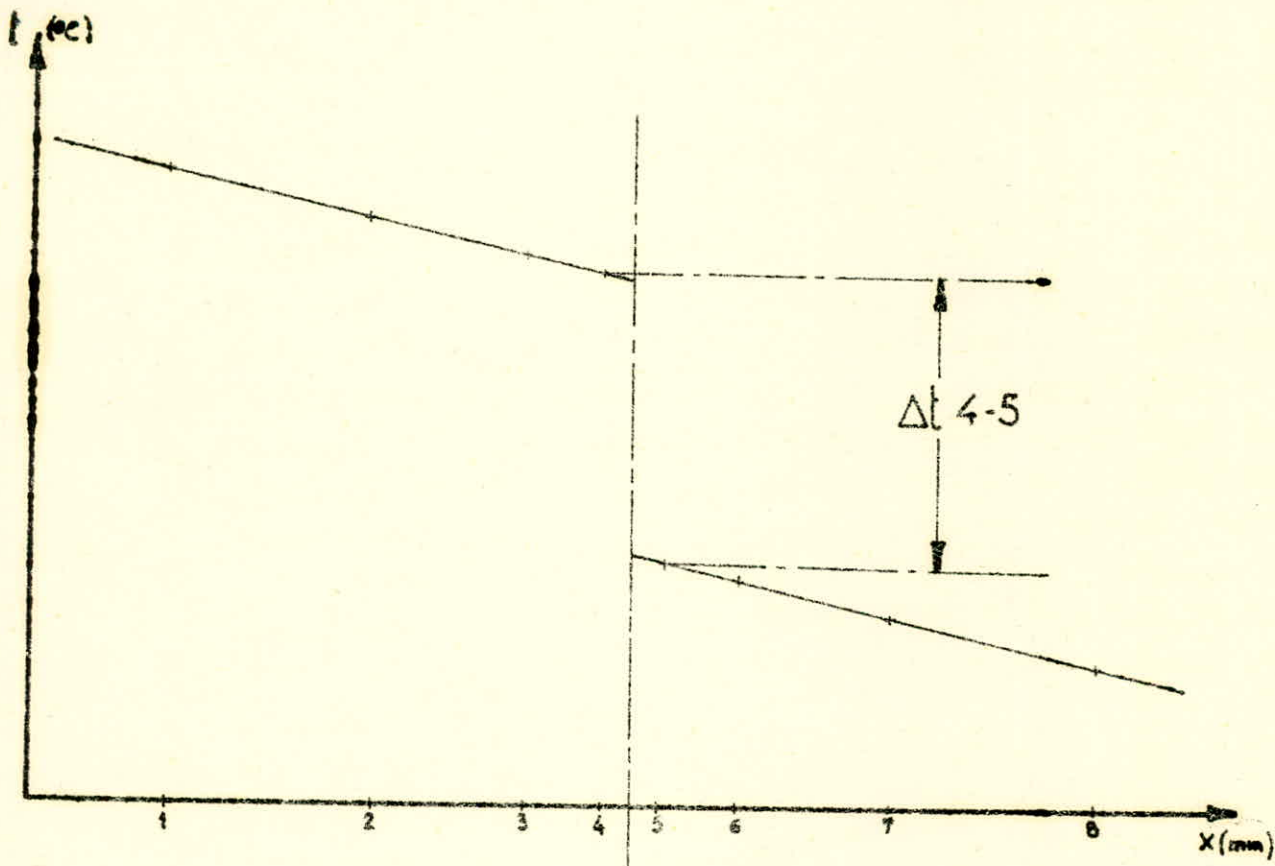
la planche 2 résume ce principe , la planche 12 donne le détail de toutes les chutes thermiques contenues dans cette coupure.

La résistance thermique totale du clinquant , contenant les chutes Jacq , peut-être déterminée sur les données du flux thermique unitaire , de la différence de température engendrée par la présence de l'échantillon et de la résistance thermique des deux feuilles de papier à cigarette.

1.2 - Appareil proposé :

Le plan de l'appareil définitivement adopté est celui représenté sur la planche 3 .

# DEDUCTION GRAPHIQUE DE $\Delta t$ 4-5



PL.2



Les deux conducteurs en question sont des tiges cylindriques de diamètre 10 mm . Ce diamètre , qui paraît petit au prime abord , est en fait dicté par la nécessité d'obtention rapide du régime stationnaire . Le flux thermique qui les parcourt doit être dirigé de haut en bas pour éviter toute convection perturbatrice au sein de l'appareil ; ceci est obtenu par une circulation d'eau chaude à température et débit constants dans le conducteur du haut et une circulation d'eau froide à température et débit constants dans celui du bas . Pour permettre un meilleur échange de chaleur entre l'eau et les conducteurs , les enceintes destinées à recevoir le fluide , comportent des raccords d'entrée et de sortie disposés à 45° l'un de l'autre . En outre la présence d'anneaux de garde autour des deux conducteurs , soumis au même flux , contribue à éliminer tout gradient de température selon une direction radiale .

L'ensemble est démontable pour permettre la pose du clinquant entre les deux conducteurs . Une bague de centrage permet de positionner les deux parties de l'appareil au moment du montage .

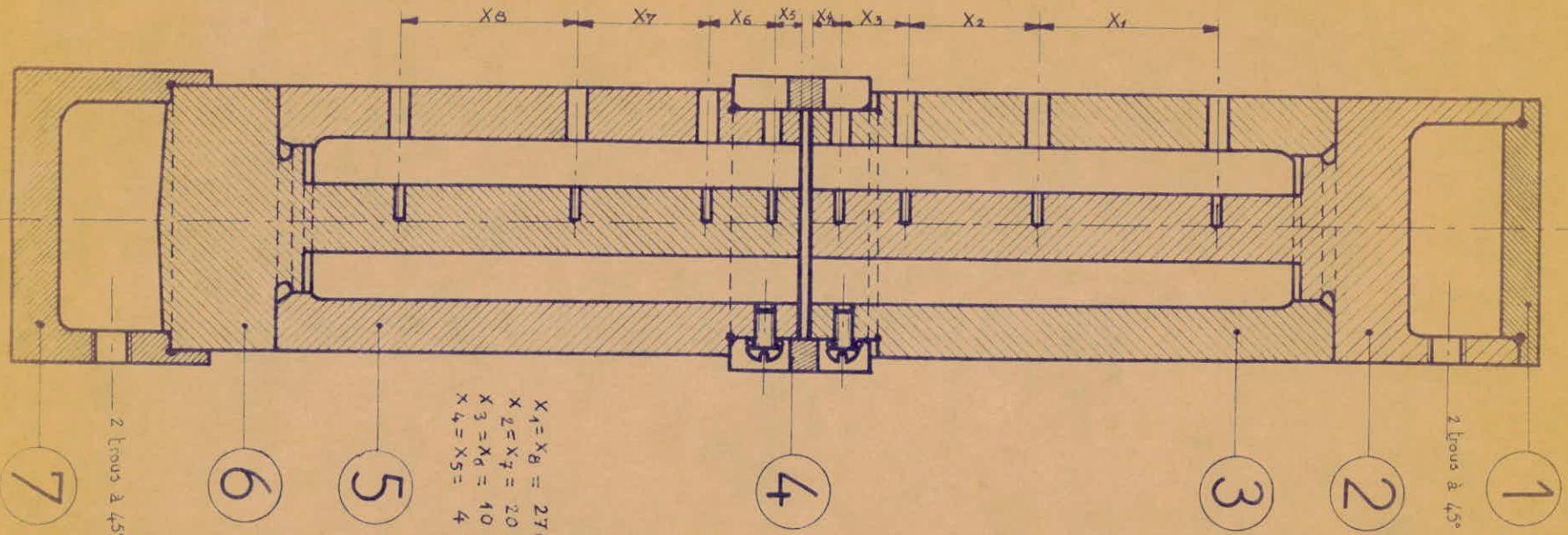
En ce qui concerne la mesure des températures , huit trous de diamètre 1,2 mm et de pénétration 5 mm , destinés à recevoir des thermocouples , sont exécutés sur les deux conducteurs , à des distances déterminées . En réalité , deux thermocouples par conducteur seraient suffisants , mais il n'empêche que l'adjonction d'autres thermocouples est bénéfique pour la vérification du régime stationnaire sur examen de la linéarité des courbes obtenues .

Il est à noter enfin que l'ensemble est calorifugé et mis dans des boîtiers rigides . Mais nous parlerons de cela dans le chapitre consacré aux améliorations technologiques apportées cette année .

### 1.3 - Recherches faites l'année passée :

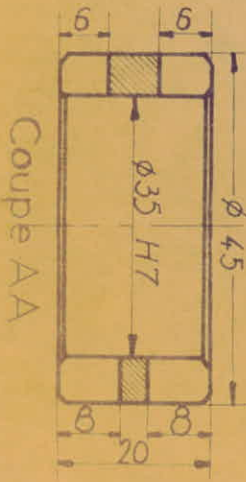
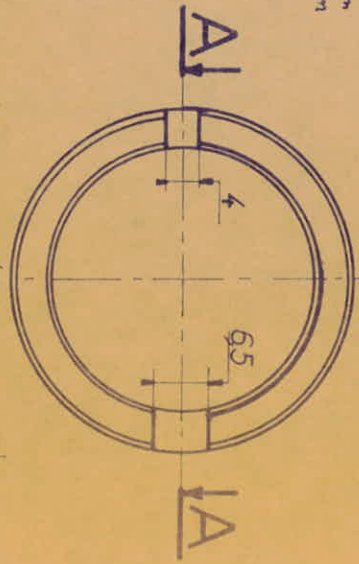
L'appareil proposé a été mis en exécution l'année passée (1973 - 1974) , et a permis les premières recherches dans le cadre d'un projet de fin d'études .





$X_1 = X_8 = 27 \text{ mm}$   
 $X_2 = X_7 = 20 \text{ mm}$   
 $X_3 = X_4 = 10 \text{ mm}$   
 $X_5 = X_6 = 4 \text{ mm}$

Détails sur la bague ④



Repère	n.bre	Matériau	Observations	Désignations
⑦	1	Acier doux		Couvercle
⑥	1	Acier doux	Surface de contact rodée	Pièce d'essai
④	1	Acier doux		Bague de centrage
⑤ ③	2	Acier doux	Surface de contact rodée	Anneaux de garde
②	1	Acier doux	Surface de contact rodée	Pièce d'essai
①	1	Acier doux		Couvercle

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

# DISPOSITIF EXPERIMENTAL

PLANCHE 3

EGHELLE 1

JUIN 75

Les recherches effectuées l'année passée ont porté sur l'étude sommaire de trois métaux : le cuivre , l'aluminium et le bismuth , Les résultats obtenus étaient intéressants mais inattendus . En effet , la résistance thermique des clinquants en fonction de leurs épaisseurs présente des variations qui ne laissent entrevoir aucune allure de courbe représentative ( voir planches 4a , 4b , 4c ) . L'analyse des résultats obtenus est donc impossible .

La proliférance de ces singularités est-elle due à des erreurs systématiques dans la méthode de mesure ou à un phénomène physique réel ? Voilà la question qui nous a incités à reprendre ces recherches cette année dans le cadre de notre projet de fin d'études .

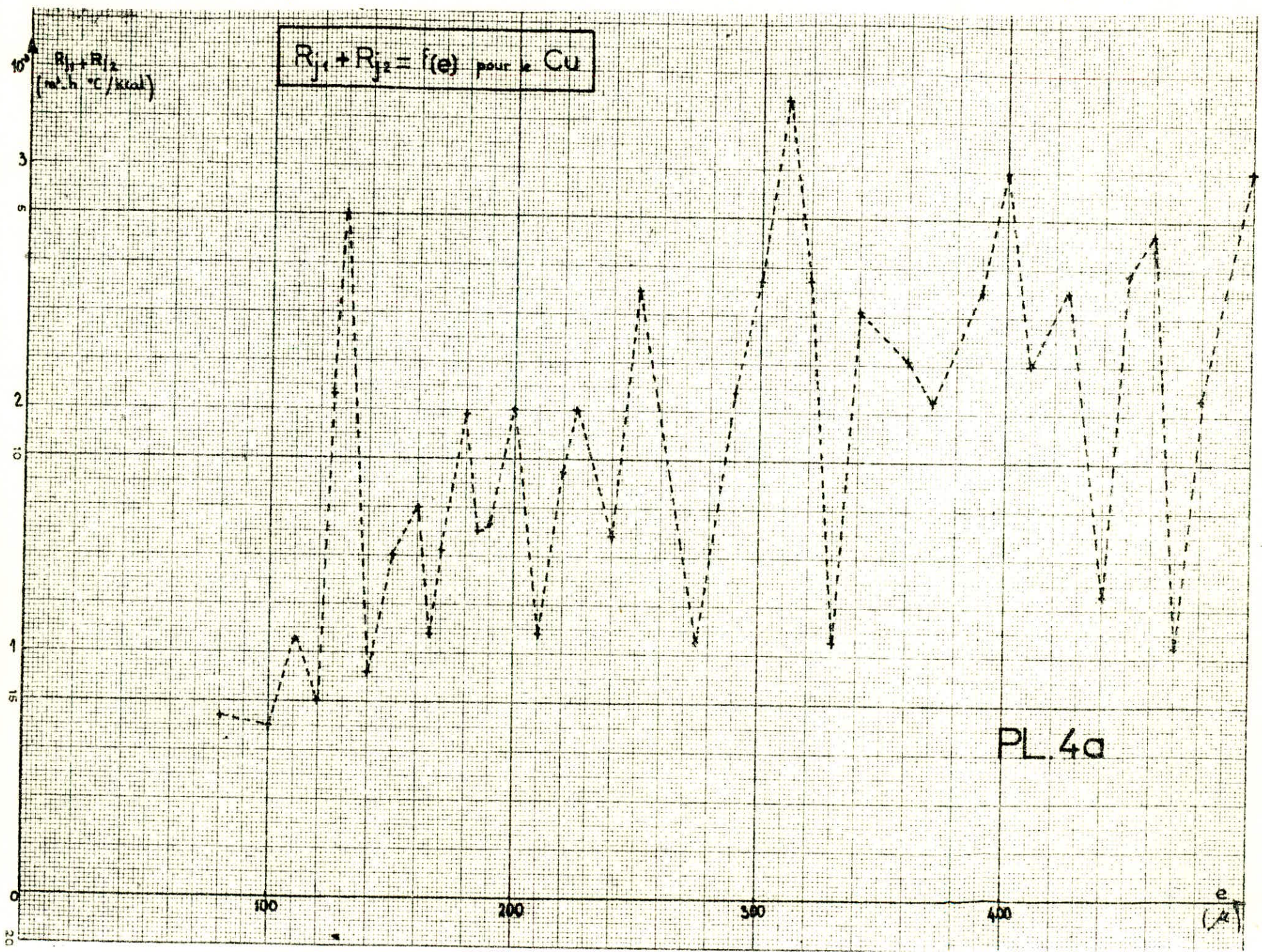
#### 1.4 - Contenu des recherches présentées cette année :

Nous avons préféré consacrer notre étude à un seul métal, en l'occurrence le cuivre qui semble présenter le meilleur intérêt . Et dans le but d'avoir une courbe  $R_j = f(e)$  la plus représentative possible , nous nous sommes assignés des tolérances serrées sur la distribution des épaisseurs d'échantillons examinés , qui varient pour la plupart de  $5\mu$  en  $5\mu$  ; ces tolérances ont été serrées d'avantage encore sur certaine partie de la courbe pour vérifier la reproductibilité des résultats obtenus .

Mais tout cela nous entraîne des complications d'ordre technologique tant sur le plan de l'amélioration de l'installation elle même et de la méthode de mesure que sur le plan de la fabrication des clinquants .

Nous préférons consacrer tout un chapitre à cela pour permettre d'une part d'assurer la reproductibilité d'une pareille installation et d'autre part d'apprécier l'effort entrepris .



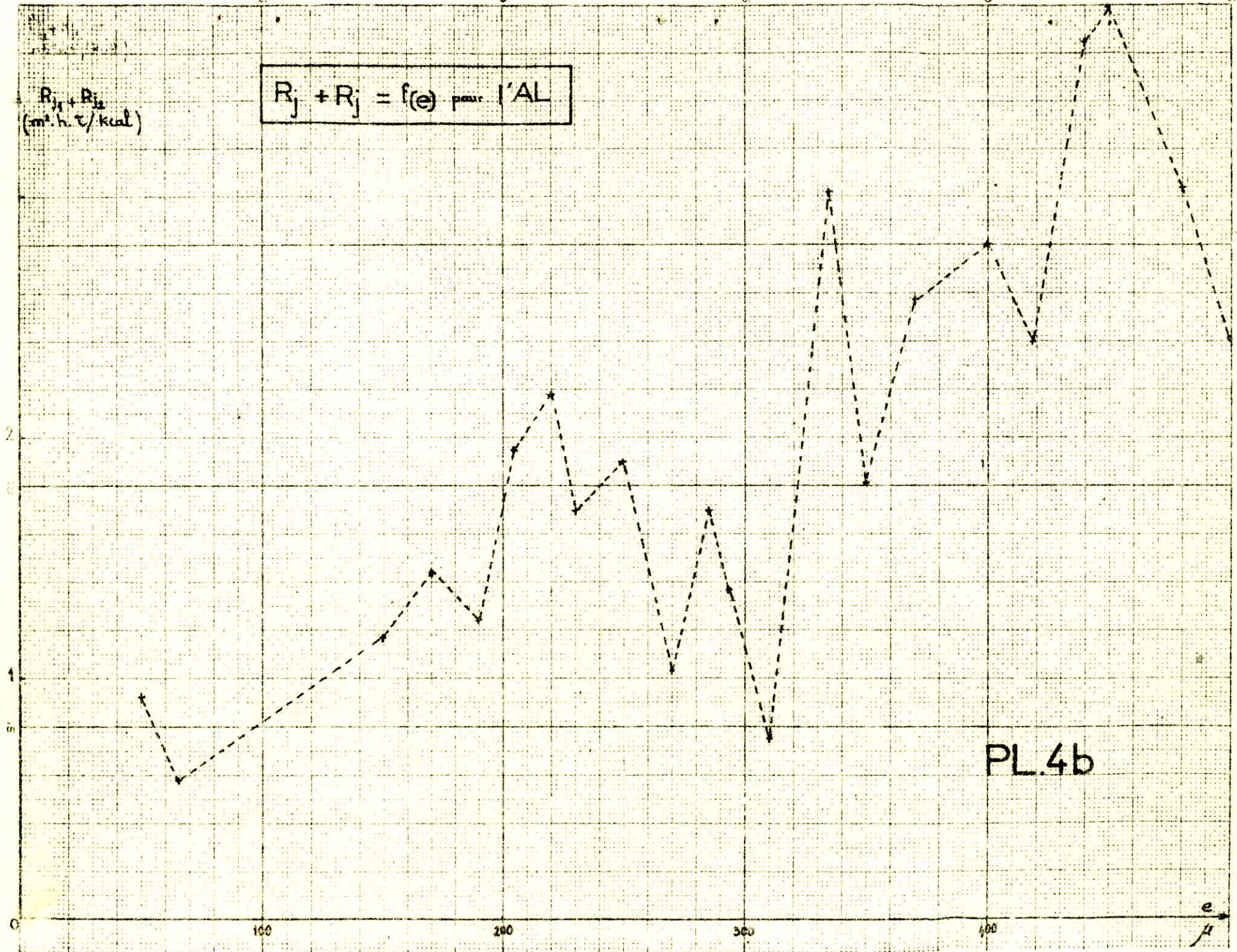


PL.4a



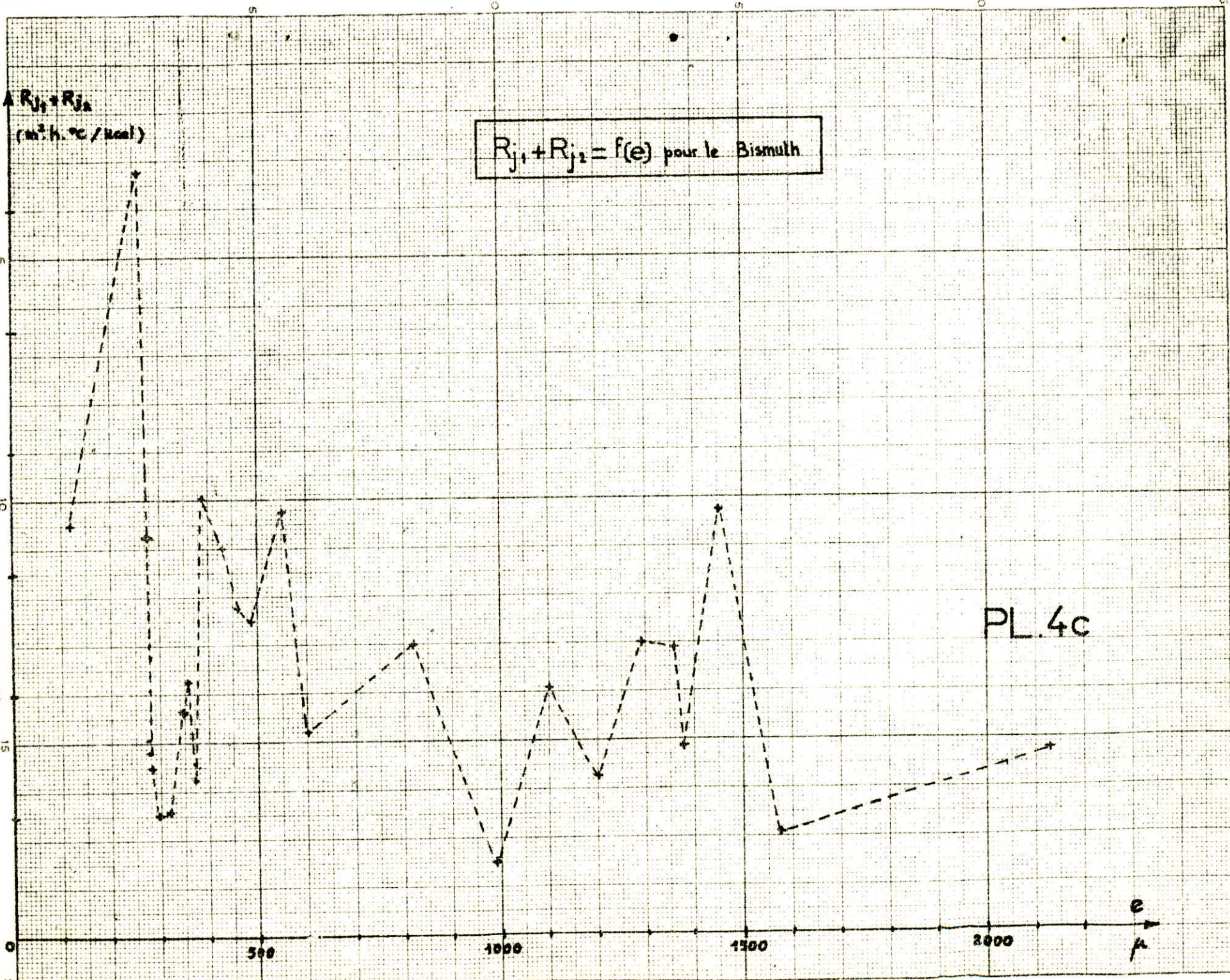
$$R_j + R_j = f(e) \text{ pour } \text{'AL}$$

$R_j + R_j$   
(m<sup>2</sup>.h.°/kcal)



PL.4b







Chapitre 2

INSTALLATION UTILISEE

2.1 - Améliorations apportées à l'ancienne installation :

2.1.1 - Thermocouples :

Les thermocouples qui étaient utilisés l'année dernière étaient constitués par des thermocoax de chromel - alumel enrobés par une gaine protectrice allant des trous de logement jusqu'à l'appareil de mesure . Cependant , de par leur constitution même , ils présentent certains défauts qui risquent d'entacher d'erreurs les mesures auxquelles nous nous livrons :

- Citons en premier lieu le mauvais contact thermique dû à l'espace d'air subsistant entre la soudure des thermocouples et le fond du trou de logement ( figure 1 )

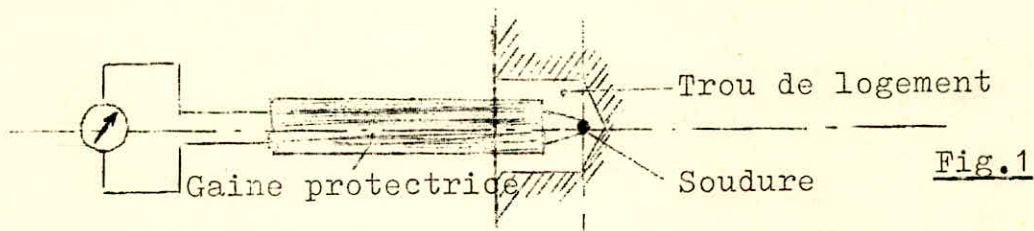


Fig.1

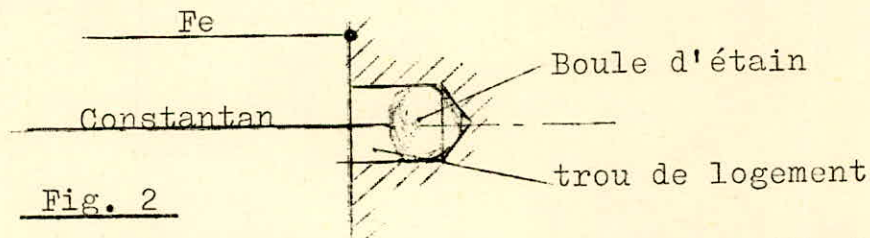
- Il faut noter aussi le pont thermique constitué par la gaine protectrice qui , de par son diamètre , sa conductibilité et son contact direct avec l'atmosphère à la sortie de l'appareil , risque de transférer une certaine quantité de chaleur vers l'extérieur , ce qui n'est pas fait pour nous arranger .

- La longueur des thermocouples est influente car elle est proportionnelle à leur résistance électrique . En effet la méthode de lecture utilisée est une méthode directe vu que les deux fils de chromel et d'alumel sont branchés directement aux bornes de l'appareil de mesure , ce qui fait que la déviation du galvanomètre de celui-ci est tributaire du courant parcourant les fils et tout mauvais contact ou toute résistance supplémentaire risque de perturber l'indication de lecture.

- Notons enfin que toute mauvaise manipulation risque d'arracher carrément les thermocouples de leur logement , car rien ne permettait le maintien de ceux-ci , d'autant plus que la rigidité de la gaine protectrice pouvait transmettre toute secousse ou effort commis par inadvertance depuis l'appareil de mesure .

Toutes ces considérations nous ont amené à changer totalement la méthode de mesure . C'est ainsi qu'on a porté notre choix sur un autre type de thermocouples, constitués par un simple fil dénudé en constantan de 0,2 mm de diamètre terminé par une boule d'étain enfoncée dans le trou de logement et une masse commune en fil de fer mince . Les avantages introduits par cette nouvelle procédure sont certains :

- citons d'abord que le contact thermique et électrique devient ainsi assuré . en effet, de par sa malléabilité , la boule d'étain qui est enfoncée et pressée dans le trou , épouse parfaitement la forme de celui-ci ( voir fig. 2 ) .



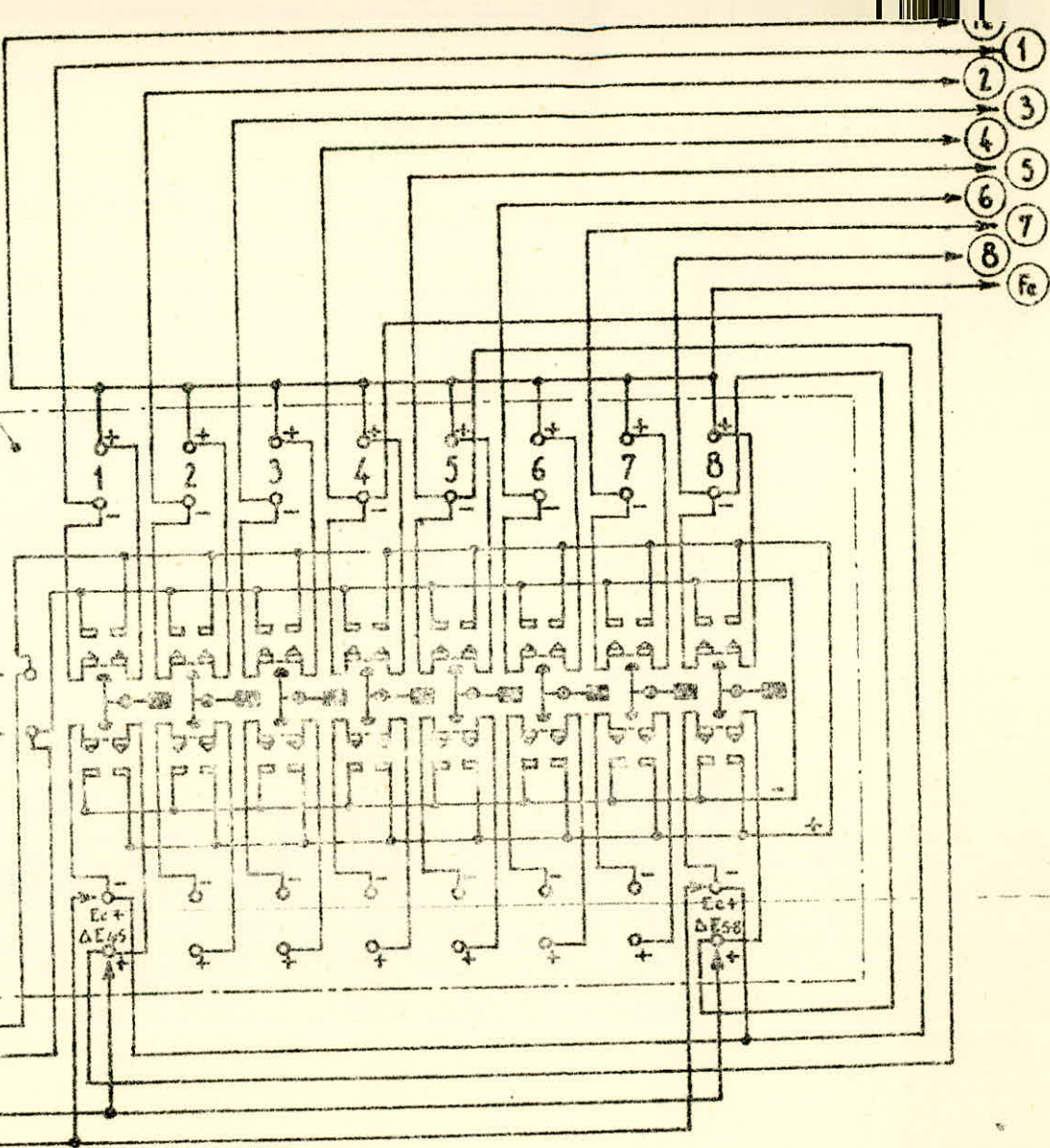
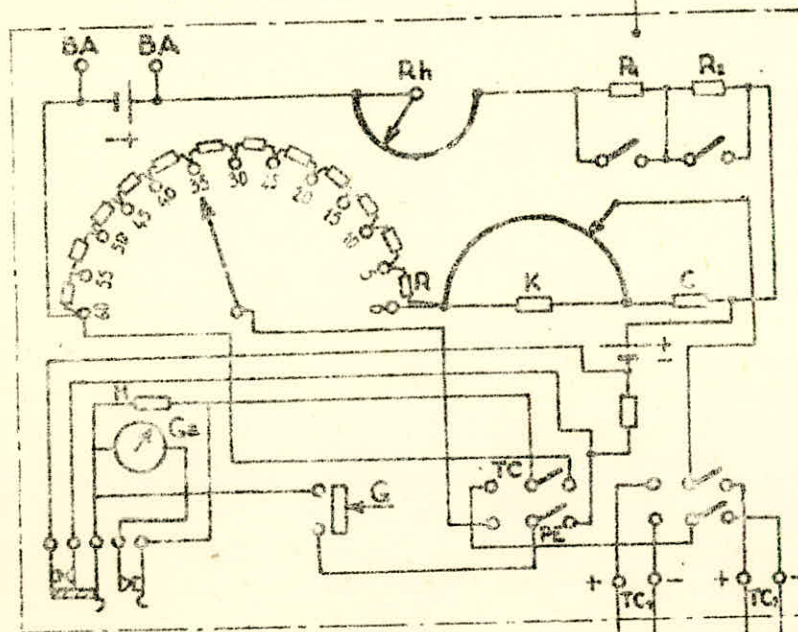
- Le pont thermique gênant dans l'ancienne méthode , devient insignifiant dans celle-ci , vu le faible diamètre du fil de constantan . D'autant plus que la gaine protectrice nécessaire à l'isolement du fil , qui est constituée de caoutchouc mauvais conducteur , ne démarre qu'à partir de l'anneau de garde et non des trous de logement .

- La résistance électrique des fils n'a plus d'influence car il n'y a pas de courant qui les parcourt . En effet , dans ce cas , la méthode utilisée est une méthode différentielle et tout mauvais contact ou résistance supplémentaire n'influe pas sur la lecture elle même mais sur la sensibilité . Cela nous permet en outre d'assurer toute combinaison de lecture qui nous arrange , en particulier la lecture directe des différences de température entrant dans les calculs ( voir planche 6 ) .



Boîte de sélection

Appareil de mesure



BRANCHEMENT DES THERMOCOUPLES



- Enfin , l'ensemble est rigide car les fils de constantan sont relativement mieux maintenus dans leurs trous de logement grâce à la boule d'étain de diamètre légèrement supérieur à celui des trous . D'autant plus qu'avant d'aller à l'appareil de mesure , ils sont fixés sur une plaquette porte-dominos solidaire du boîtier de l'appareil d'expérimentation . De cette plaquette partent des terminaisons en fil de cuivre souple qui ne transmet pas les efforts et les secousses qui pourraient avoir lieu par inadvertance lors d'une mauvaise manipulation .

Quant à la masse commune en fer , elle n'a pas manqué de nous poser de problème elle aussi . En effet , il ne s'agit pas que le fil de fer puisse constituer un pont thermique ou que le contact électrique soit négligé d'une part , et d'autre part il ne s'agit pas non plus de courir le risque que la soudure se détache lors d'une mauvaise manipulation et que pour des raisons d'inaccessibilité , l'on soit obligés de démonter l'ensemble . L'endroit optimum choisi se trouve donc être la région de la bague de centrage . Mais , à moins d'une technique poussée , le soudage d'un fil en bout sur une surface métallique relativement grande est impossible pour nos moyens existants , car le fil de fer fondrait avant que la masse soit effleurée par la source de chaleur .

Toutes ces considérations nous ont porté à recourir au serrage du fil de fer sous tête de vis , ladite vis pénétrant dans un trou taraudé pratiqué dans l'anneau de garde au niveau de la bague de centrage ( voir planche 3 ) . Cette concession n'a pas été sans nous amener d'inconvénients relatifs à la bague de centrage qui , de par la forme qu'elle doit avoir , court le péril d'une ovalisation qui pourrait nuire à la fonction à laquelle on la destine :

\* Etalonnage des thermocouples :

Malgré l'existence en bibliographie de tables de conversion des mV en °C pour les couples de Fer-Constantan , nous avons

préféré faire l'étalonnage des thermocouples nous-mêmes , ce qui a l'avantage de tenir compte de la nature de notre fil et de notre appareil de mesure . Le montage utilisé à cette fin est celui de la figure 3 :

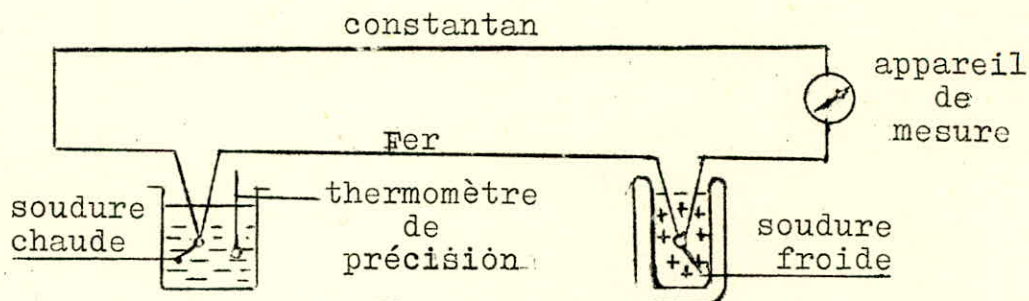


Fig.3

La soudure froide est plongée dans un vase de Dewar contenant un mélange d'eau et de glace maintenu à 0 C , la soudure chaude est plongée dans un b cher chauffé au bec bunsen . On chauffe d'abord l'eau du b cher jusqu'à ébullition et on éteint le gaz . A ce moment on commence à relever la température de l'eau du b cher en même temps que l'indication de l'appareil de mesure et l'on poursuit la manipulation pendant tout le temps que met l'eau à refroidir , à intervalles r guli rs et on veillant à ce que le thermomètre soit voisin de la soudure du thermocouple . Au voisinage de la température ambiante , on met le b cher dans le dewar pour pouvoir lire les indications inférieures à celles correspondante à la température de l'ambiance .

Il résulte de tout cela la courbe d'étalonnage présentée à la planche 7 . Cette courbe a l'allure d'une droite passant par l'origine et de pente k .

$$k = 5,12 \cdot 10^{-2} \text{ mV} / \text{ C}$$

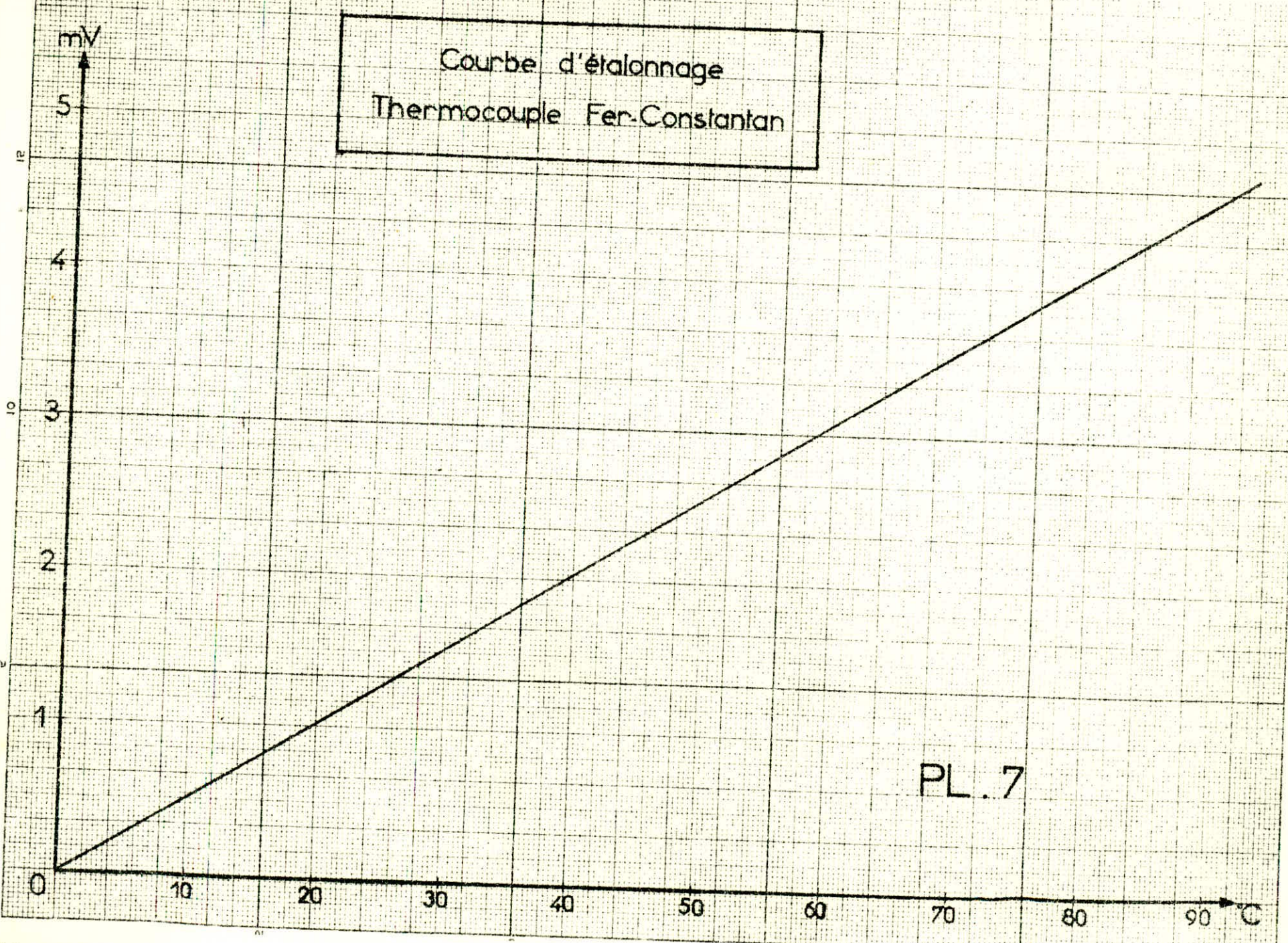
Sur la donnée de cette pente on peut trouver toute conversion qui nous interesse par les relations :

$$E = k \cdot T \text{ , ou}$$

$$T = \frac{E}{k}$$



Courbe d'étalonnage  
Thermocouple Fer-Constantan



PL. 7



### 2.1.2. Calorifugeage de l'appareil d'expérimentation :

L'intérêt du calorifuge est d'éliminer les influences extérieures variables sur le bon déroulement de l'expérience en particulier pour ne pas perturber le flux thermique . Il est donc essentiel d'apporter un soin particulier au calorifugeage de l'appareil .

Le calorifuge employé l'année dernière était formé de coques de polystyrène expansé et de coton ; mais il ne présente pas de bonnes caractéristiques d'isolation et de rigidité . C'est pour cela que nous avons préféré refaire complètement celui-ci et l'amélioration a porté tant sur la qualité de l'isolant que sur la rigidité de l'ensemble . ( Voir planches 5a et 5b ) .

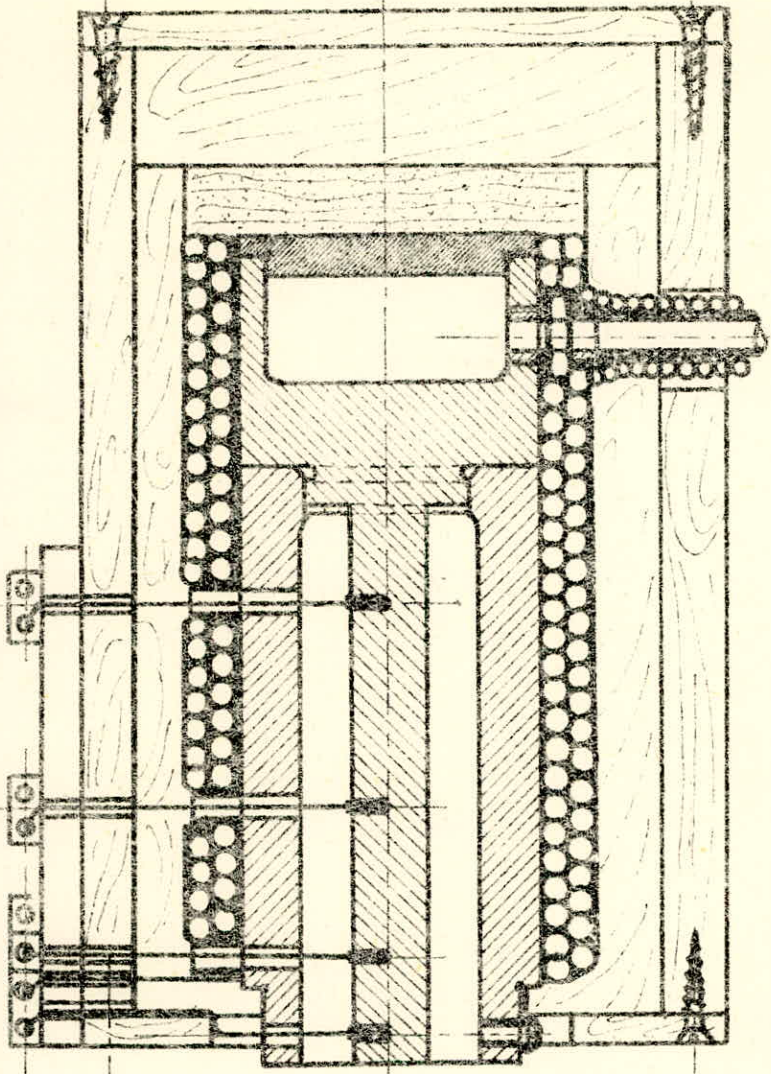
L'appareil a ainsi été complètement emmaillotté dans plusieurs couches de ficelle d'amiante, qui ne laissent accès aux trous de logement des thermocouples qu'à travers des morceaux de gaine isolante collés à la ficelle . Les parties plates, inaccessibles à la ficelle, ont été protégées par plusieurs morceaux d'amiante en plaque .

L'ensemble est ensuite placé dans des boîtiers rigides en bois contreplaqué et bien calé à l'intérieur . Les interstices restants sont dûment remplis par de la laine de verre . Le boîtier est cloué sur toutes ses faces, sauf le couvercle et le panneau latéral situé du côté des thermocouples, qui sont vissés pour permettre l'accès . Sur le panneau latéral d'accès de chaque boîtier est fixée une plaquette de plexiglas sur laquelle sont collés des dominos dans le but de faire la liaison entre les thermocouples et l'appareil de mesure .

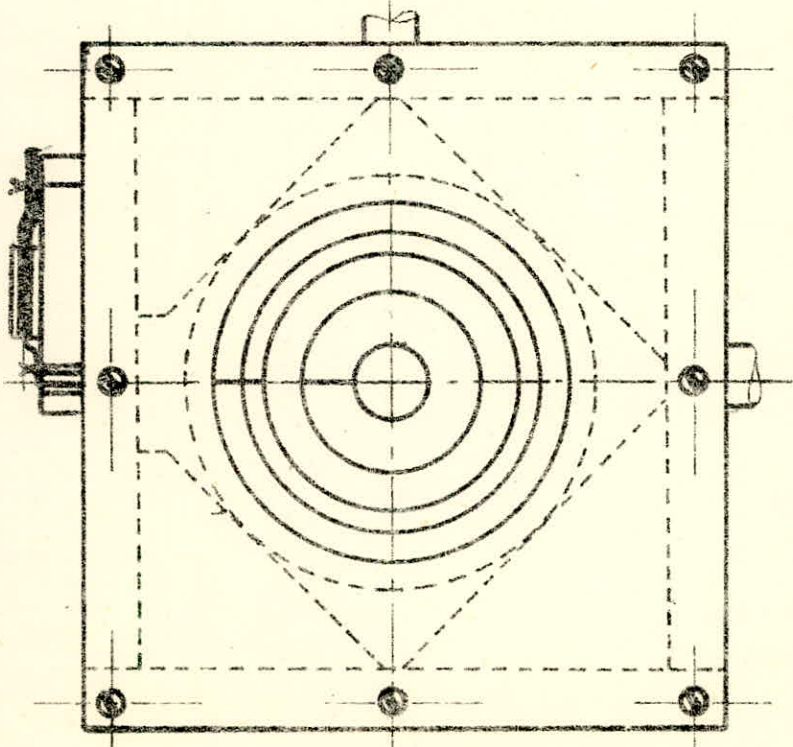
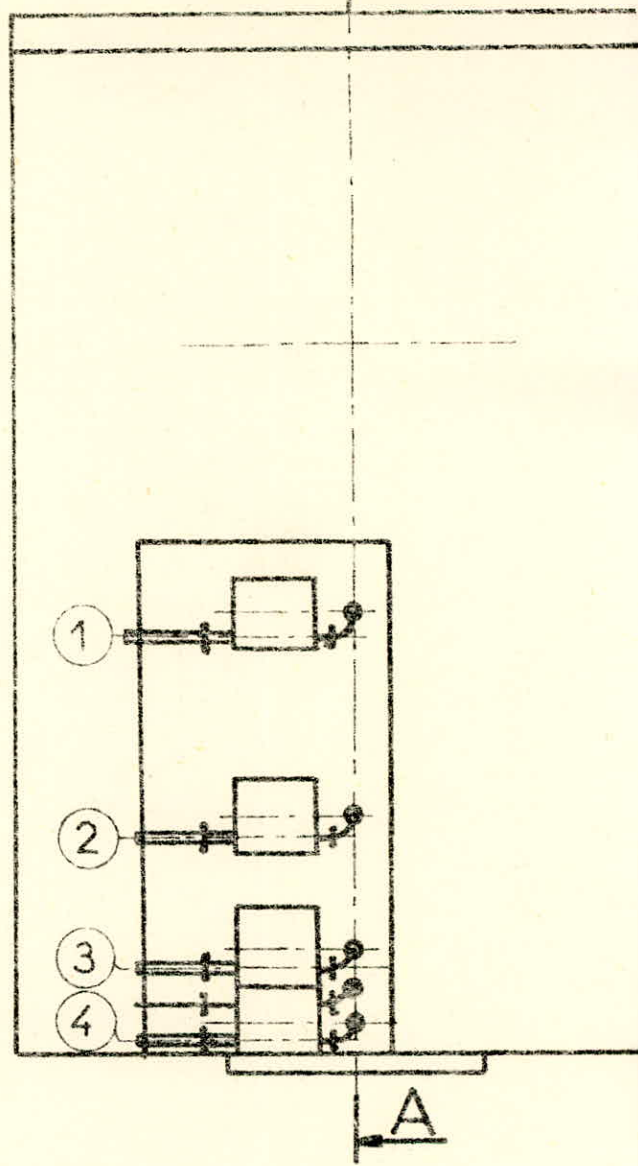
En outre le boîtier inférieur comporte une semelle assez large qui peut-être maintenue par vis sur le support de l'ensemble expérimental et le boîtier supérieur comporte un pignon qui permet d'accrocher celui-ci au plafond du support au moment de la mise en place de l'échantillon examiné .

Pour le dessin du support voir planche 11 .

Coupe AA



A



PARTIE SUPERIEURE  
DE L'APPAREIL

(source chaude)

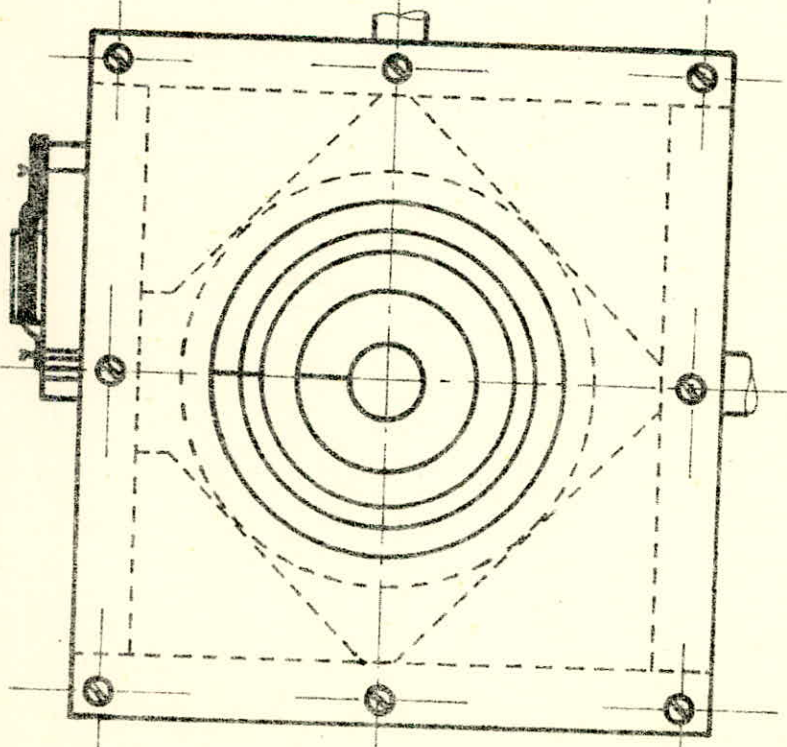
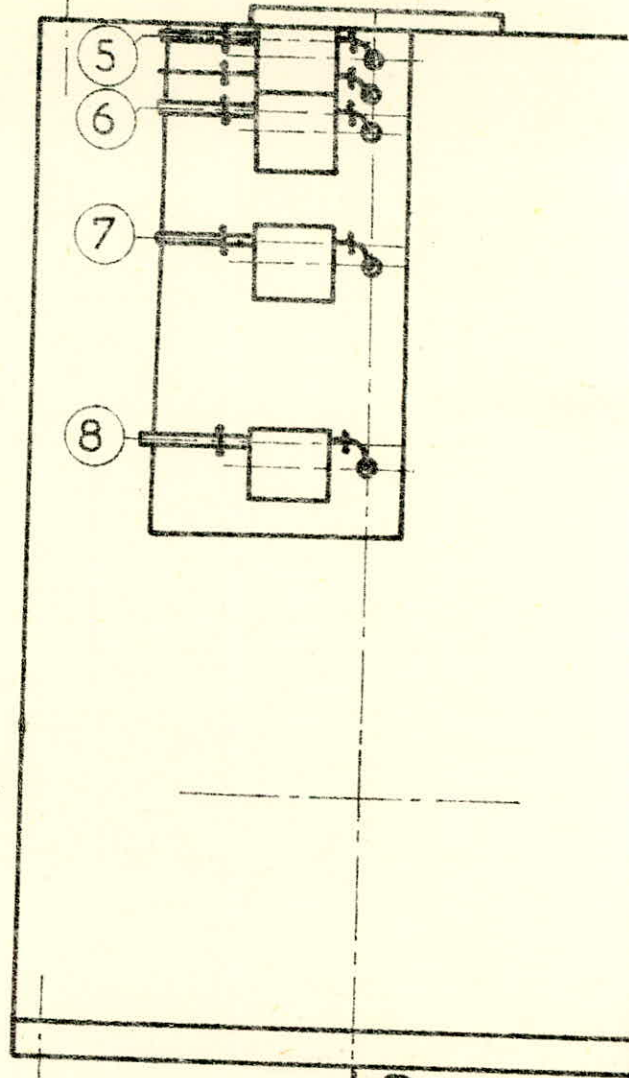
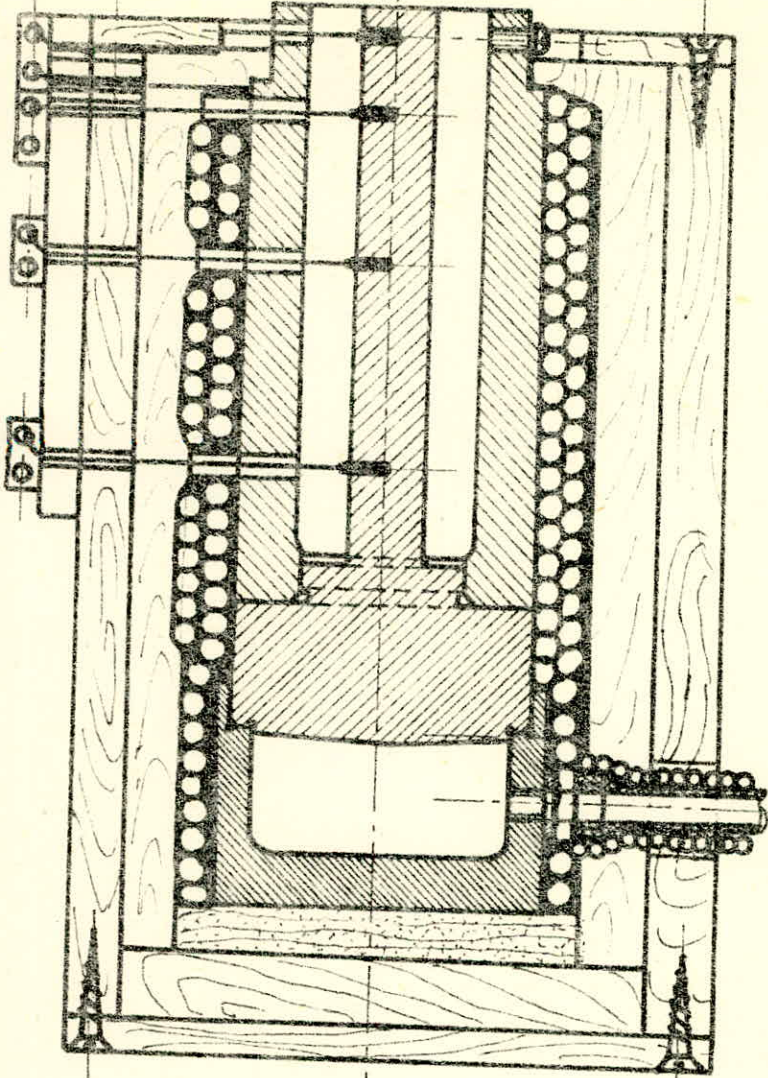
PL. 5a



Coupe BB

.26.

B



Vue de dessous :

PARTIE INFÉRIEURE  
DE L'APPAREIL

(source froide)

PL.5b



### 2.1.3 - Bague de centrage :

La bague de centrage employée l'année dernière avait une hauteur de 5 mm , ce qui est très insuffisant pour assurer un bon positionnement des deux parties de l'appareil d'expérimentation . Outre cela , plusieurs considérations entrent en jeu pour la détermination de cette bague :

- Elle doit être assez haute pour assurer un bon positionnement des deux parties de l'appareil , d'une part , et elle ne doit pas être trop haute pour ne pas compliquer le problème du calorifugeage d'autre part .

- Elle doit être rainurée pour permettre le passage des thermocouples et des têtes de vis de fixation de la masse commune en fil de fer . Mais d'un autre côté , elle ne doit pas être rainurée du tout pour ne pas courir le risque d'ovalisation conséquente de la partie de matière qui s'en suit .

- Elle doit être , pour des raisons pratiques en cours de manipulation , montée serrée dans l'anneau de garde du haut pour que le tout sorte ensemble au démontage , d'une part ; mais d'autre part , elle ne doit pas être serrée sur l'anneau de garde du bas pour permettre un démontage facile . Dans ce contexte , elle aurait pu faire tout simplement partie constituante de l'anneau de garde supérieur . Mais il ne faut pas oublier , comme on vient de le faire en n'évoquant pas cela au moment voulu , que l'appareil est rôdé avant montage pour amener au même niveau les bouts de l'anneau de garde et du conducteur central .

- Mais surtout , en ce qui concerne le jeu fonctionnel relatif à sa partie inférieure , on a constaté après avoir refait deux bagues déjà , qu'un jeu supérieur à 0,05 mm permet le démontage mais non le centrage surtout si le clinquant est en place , ce qui diminue la portée de l'ensemble aux dimensions du clinquant ; ceci d'une part , mais d'autre part un jeu inférieur à 0,05 mm permet un positionnement acceptable mais ne permet pas le démontage .



Tout ce cannevas de paradoxes demande tout de même une solution et l'on a été obligés malgré tout de trouver un optimum satisfaisant .

La bague définitivement adoptée est celle représentée sur la planche 3 , avec notamment les spécifications suivantes :

- Le diamètre intérieur de 35 mm n'est pas uniformément le même . Il comporte un palier de 0,03 mm sur une moitié , qui a été obtenu par abrasion par de la toile Emeri quand la pièce était montée sur le mandrin du tour . Des chanfreins de dégagement sont prévus à l'entrée .

- Les rainures sont ajustées à la lime ronde après mise en forme à la perceuse et à la scie .

Somme toute , il subsiste quand-même des défauts de centrage , mais ils sont rattrapables quant à eux par la dextérité et l'expérience de l'opérateur ce qui , dans bien des cas, est le meilleur garant de sécurité . Mais il n'empêche qu'une amélioration notable est introduite par un poids supplémentaire sur le boîtier supérieur .

#### 2.1.4 - Pression de contact :

Celle-ci était assurée , l'année dernière , par le propre poids de la partie supérieure de l'appareil expérimental . Mais pour les faibles clinquants ou pour les papiers de cigarette seuls , on a constaté des aberrations dans les résultats qui nous ont orienté vers l'adjonction d'un poids supplémentaire sur le boîtier supérieur , ce qui a amélioré les choses . Ce poids , fait d'un disque de fonte de 1,5 kg environ présente un autre avantage encore , et qui n'est pas des moindres . En effet , en le décentrant un peu dans une direction déterminée , il offre la possibilité de pouvoir contrer la traction exercée par les tuyaux d'alimentation , traction qui faisait basculer un tant soit peu le boîtier supérieur dans la bague de centrage malgré le jeu fonctionnel réduit dont elle dispose .

Mais l'encombrement que possède maintenant le boîtier supérieur nous pose , au moment du démontage , le problème

de l'endroit où l'on dépose celui-ci en attendant la mise en place du clinquant . Cela nous amène à changer la forme du support de l'ensemble expérimental .

#### 2.1.5 - Support de l'ensemble expérimental :

Au support utilisé l'année dernière , fait en cornières standard soudées , on a ajouté quelques retouches qui ont été surtout dictées par le souci d'aisance dans la manipulation et la possibilité de faire celle-ci par un seul opérateur . Dans ce contexte , on a fixé à son assise une semelle en bois épais sur laquelle vient se visser le boîtier inférieur . Quant à l'amélioration la plus notable , elle porte sur l'adjonction à la partie supérieure du support d'un plafond en tôle longée de cornières soudées . Ce plafond est muni d'un crochet sur lequel on fixe le boîtier supérieur par le piton qu'il porte à cet effet , et ce au moment de la mise en place du clinquant à examiner ( planche 11 ) .

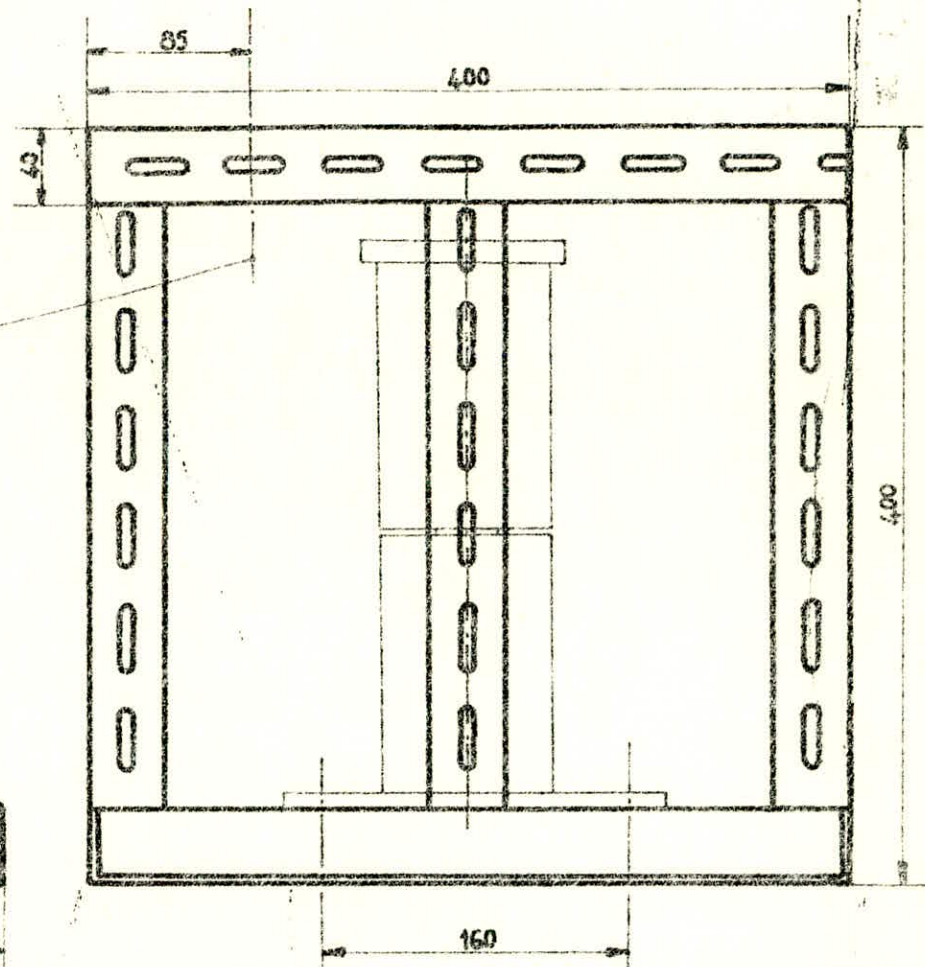
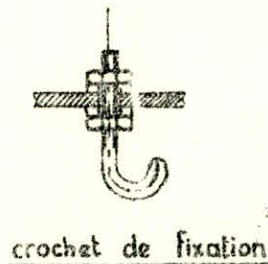
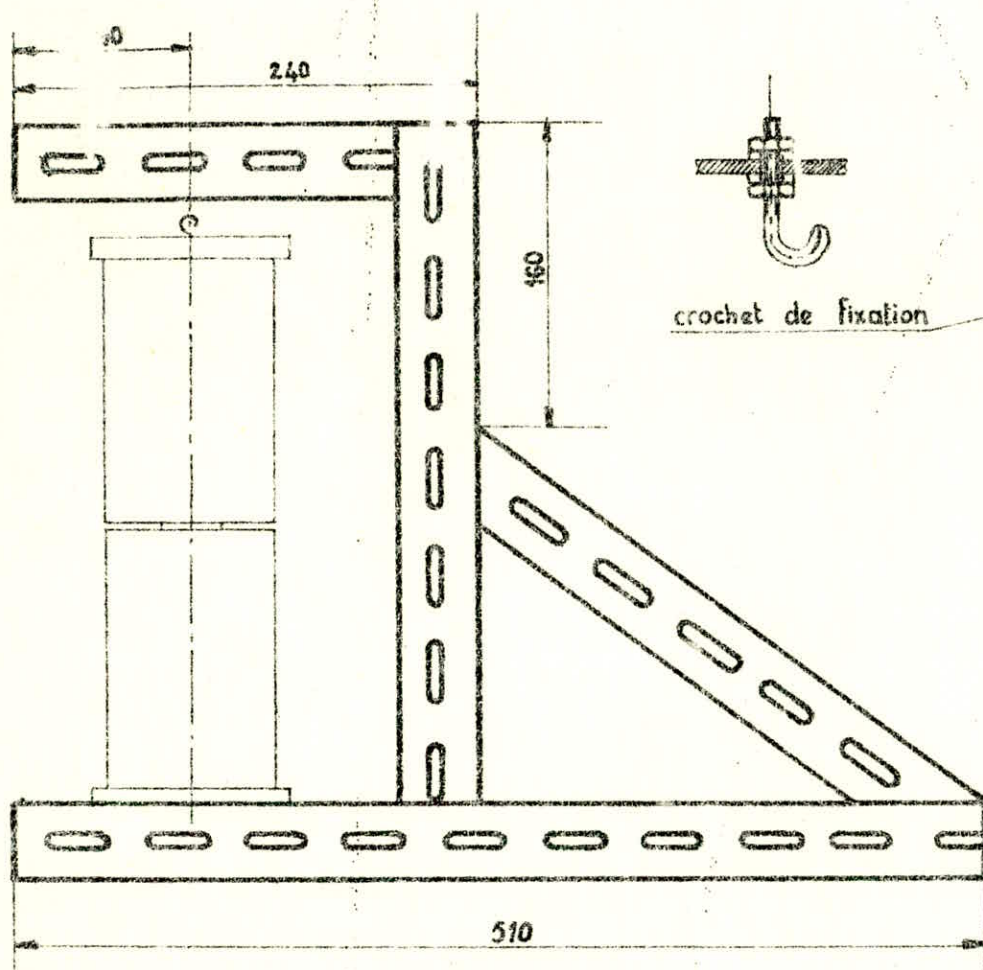
Sur la partie arrière du support sont fixés , par fils de fer , les différents tuyaux d'alimentation . Et , finalement , question de joindre l'utile à l'agréable , on n'a pas hésité à agrémenter l'ensemble par une belle couche de peinture .

#### 2.1.6 - Ecran thermique :

Cet écran , qui n'existait pas l'année dernière , est en fait dicté par le souci d'isolation de l'ensemble expérimental de toute perturbation thermique convective ou radiante affectant l'ambiance dont dépendent les indications des thermocouples .

On a donc été obligés d'exécuter cet écran sous la forme d'une tôle assez haute , pourvue d'un dispositif de fixation au mur . Cet écran qui n'était pas tellement nécessaire l'année dernière est cependant très utile pour notre installation actuelle vu que notre nouvelle source chaude est fortement radiante comme on le verra dans ce qui suit .





SUPPORT DE L'APPAREIL  
EXPERIMENTAL

PL.11

## 2.2 - Installation utilisée :

Hormis les améliorations citées plus haut et qui ne sont en fait qu'accessorielles, la véritable installation est formée par les sources d'eau chaude et d'eau froide et par les tuyauteries de raccordement .

Le schéma complet de l'installation est celui de la planche 8 . Il faut noter cependant que la disposition représentée des pompes et des tuyauteries, assez sinueuse pour les besoins de clarté de dessin, n'est pas celle réelle car elle introduirait trop de pertes de charge prohibitives .

Il est à recommander l'emplacement de cette installation auprès d'un robinet d'eau courante pour les besoins de celle-ci.

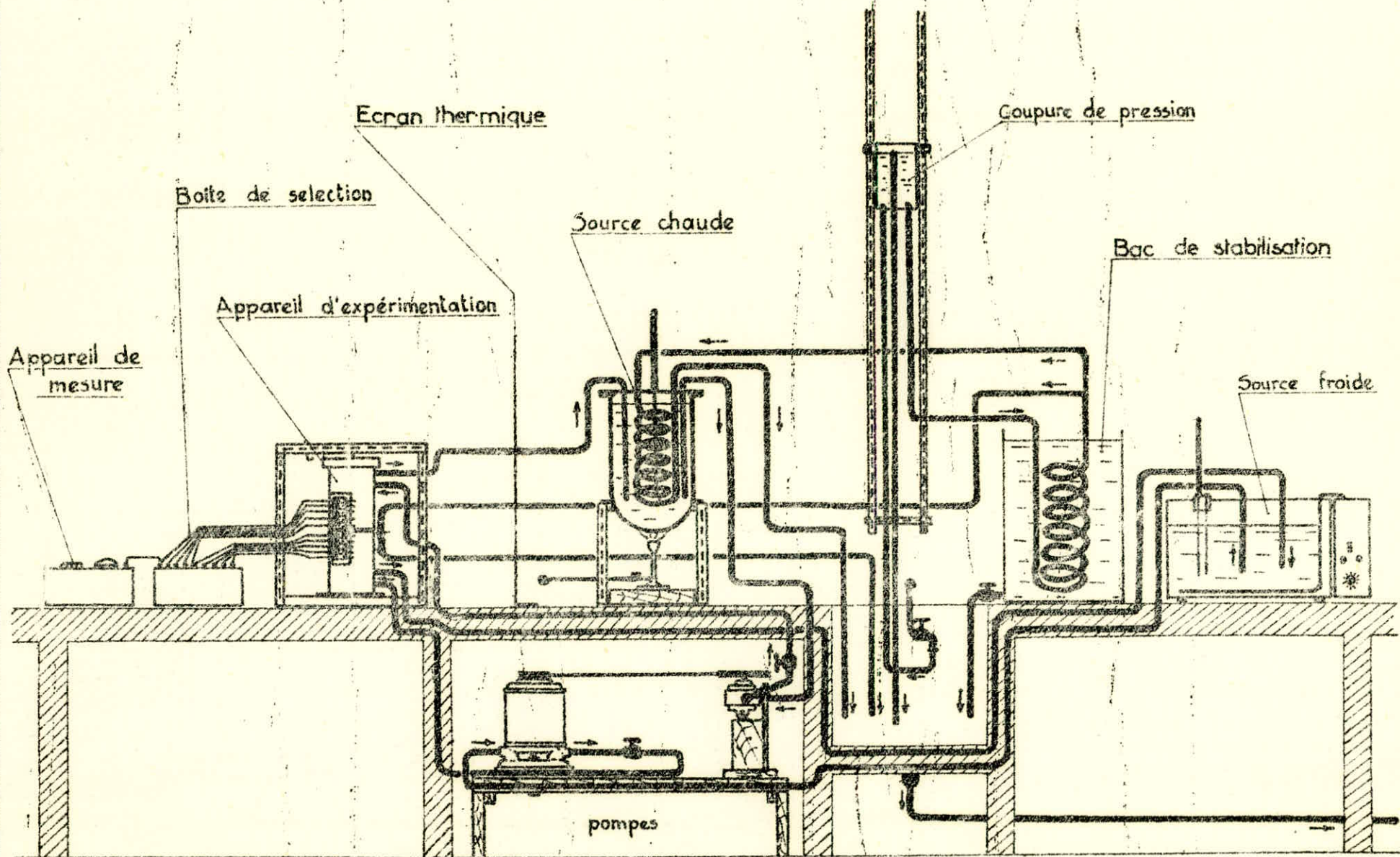
Nous commencerons notre présentation par la source d'eau froide d'abord car elle ne nous a pas posé de problèmes particulièrement importants relativement à ceux posés par la source d'eau chaude .

### 2.2.1 - Source d'eau froide :

L'idéal aurait été de disposer d'un bain thermostatique réglable avec pompe et thermostat incorporés, qui puisse permettre une circulation d'eau à température et débit constants . Mais ce genre d'appareils est rare dans notre Ecole et les seuls existants sont utilisés à plein temps, d'autant plus que les lenteurs qui caractérisent les commandes de matériels risquent de nous faire attendre jusqu'après échéance de notre projet .

On a donc utilisé au début, comme source d'eau froide, l'eau du robinet même après passage préalable de celle-ci dans un vase élevé de coupure de pression pour régler le débit et dans un serpentín plongé dans un bac d'eau pour assurer la stabilisation en température, stabilisation qui est d'ailleurs bien acceptable vu que l'écart de température constaté ne dépasse pas  $0,5^{\circ}\text{C}$  pendant quatre heures . Cependant, il est prévisible que vers la fin mai la température ambiante sera plus élevée que celle correspondante à l'indication du dernier thermocouple avec pour conséquence l'impossibilité de détecter celle-ci .





SCHEMA COMPLET DE L'INSTALLATION

PL.8



Dans cette fin, on a réussi à nous procurer tant bien que mal du département de Génie Chimique un bain-marie qu'on a réglé à 30°C ; cela nous a nécessité l'adjonction d'une pompe dans notre circuit avec tout ce que cela comporte d'adaptation des raccords et de travaux de plomberie . L'ancienne installation est restée débranchée mais en place dans l'attente d'un éventuel dépannage en cas de défaillance de la pompe ou de réclamation du bain .

#### 2.2.2 - Source d'eau chaude :

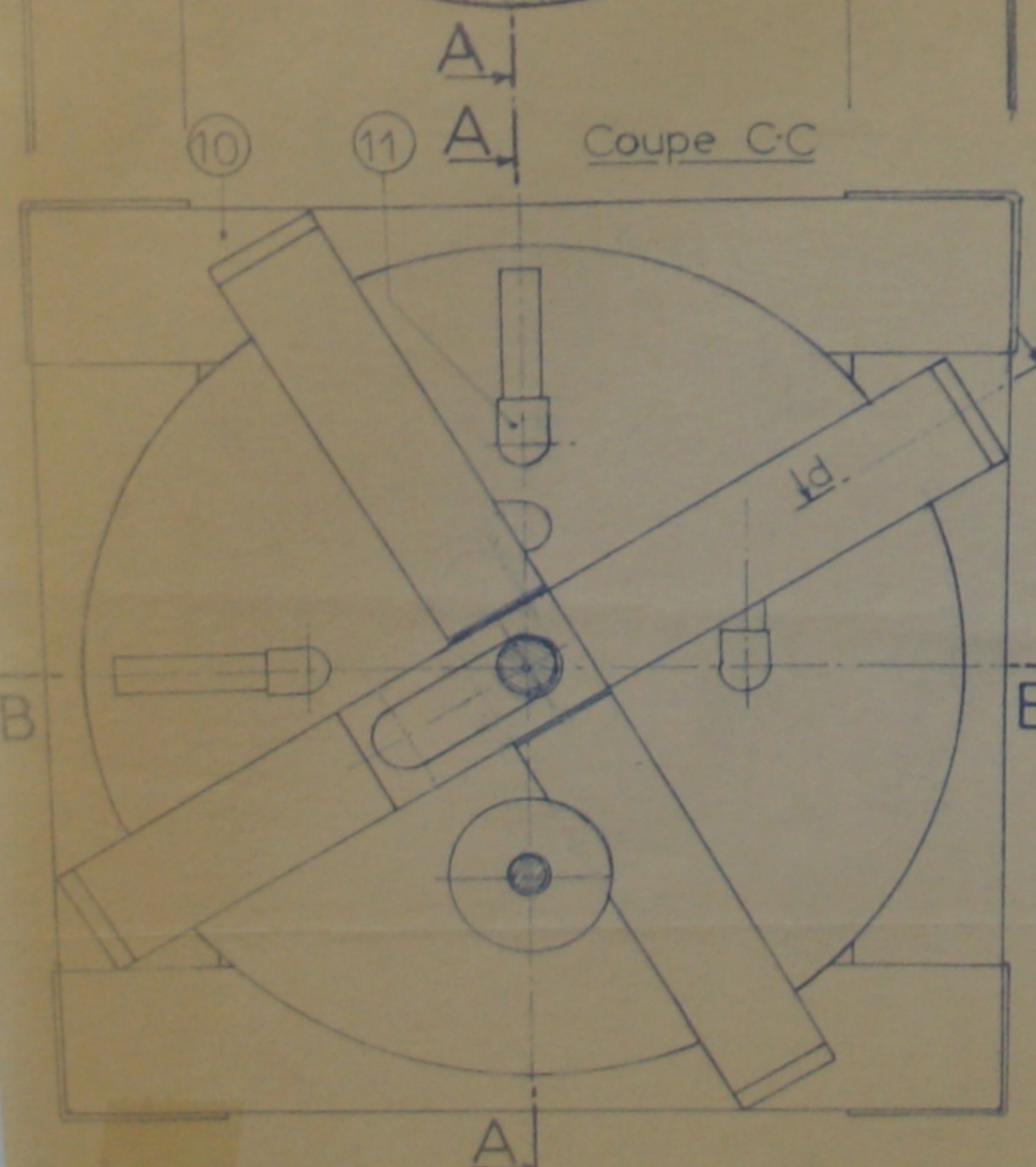
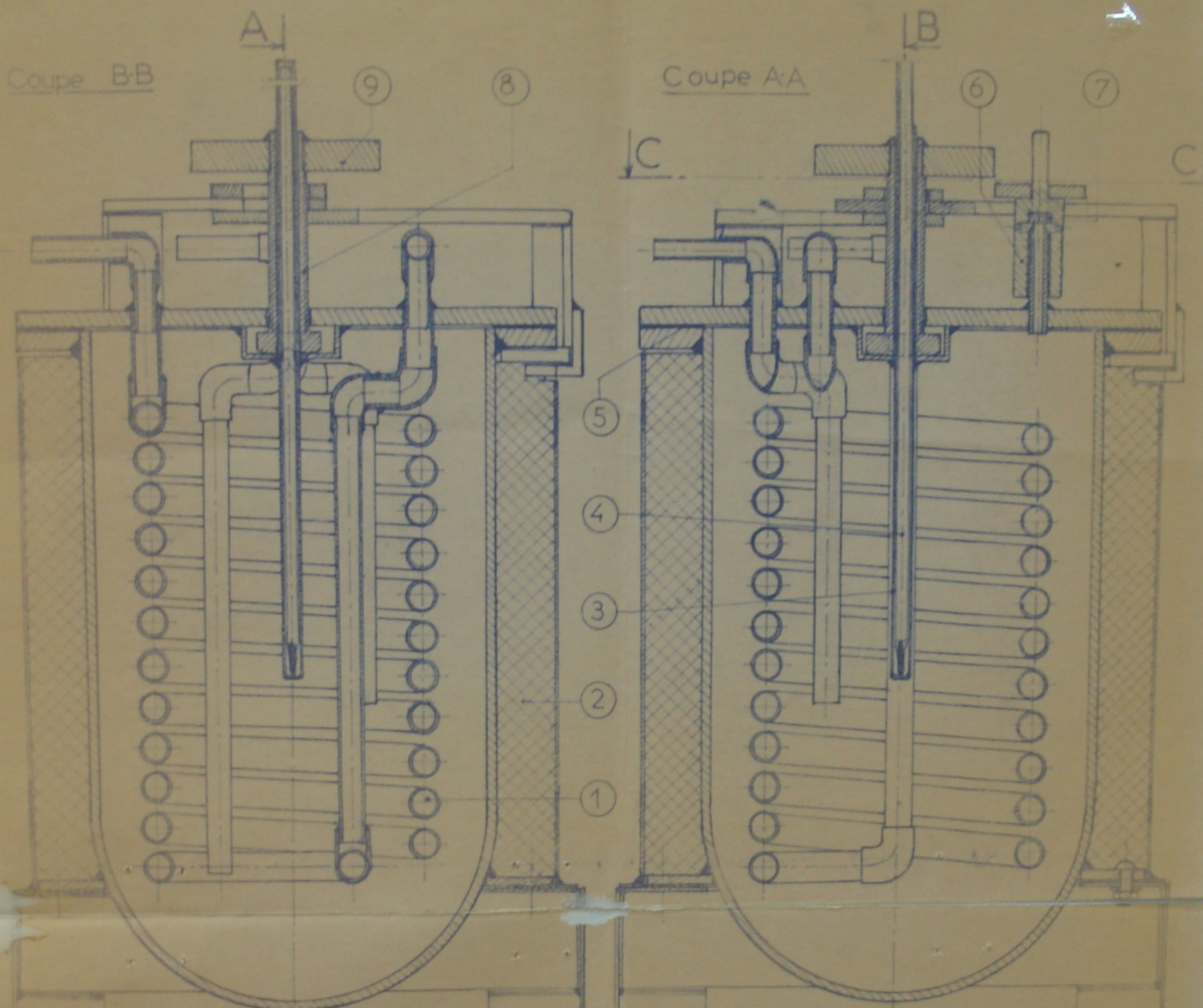
On peut dire qu'elle a représenté le gros d'oeuvre du projet tant par la complexité des problèmes posés que par le temps pris pour sa réalisation .

On disposait bien au début d'une cuve thermostatée, idéale pour nos besoins, qui permettait une circulation d'eau à température et débit réglables, avec pompe et thermostat incorporés, qui avait été prêtée l'année dernière par le département de Génie Chimique pour les besoins de ce projet ; mais par la suite elle nous a été reprise, ce qui a inauguré pour nous le véritable commencement de nos problèmes .

En effet, on s'est vus obligés de concevoir et fabriquer par nos propres moyens, une source d'eau chaude qui puisse assumer correctement les fonctions auxquelles on la destine . Cette réalisation nous a coûté plus d'un mois de labeur, compte-tenu des difficultés d'approvisionnement en matière et matériel, des essais non concluants et leurs améliorations et des empêchements de toutes sortes . Il n'en demeure pas moins que cette tâche a été menée à échéance et les résultats valables enregistrés nous ont donné la satisfaction de l'oeuvre accomplie . Le dessin complet de la source d'eau chaude est représenté sur la planche 9 .

L'idée directrice qui nous avait conduit à adopter ce genre de chaudière est celle de l'échangeur de chaleur . En effet, on désirait effectuer dans le serpentin un échange de chaleur entre l'eau de la chaudière portée à ébullition et l'eau du robinet stabilisée en débit et en température par le même procédé que celui utilisé initialement pour la source d'eau froide .





Section dd

PL.9

11	8	Coudes Ø 10-12 soudés à l'étain	Cuivre
10	1	Support cubique en cornières soudées	Adx
9	1	Volant de fermeture moleté	Adx
8	1	Vis M 16 . 80	Adx
7	1	Joint	Caoutchouc
6	1	Soupape de sécurité réglable	Adx
5	1	Joint plat	
4	1	Thermomètre gradué	
3	1	Tube Ø 8-10	Cuivre
2	1	Calorifuge	laine diamante
1	1	Serpentin tube Ø 12-14	
Rp/Nb		Désignation	Matériau
Ecole Nationale Polytechnique			Echelle: Q5
<b>SOURCE CHAUDE</b>			



Vue la nature et les dimensions de notre serpentin ( tube de cuivre de  $\varnothing$  12/14 et de longueur 5 m ), un calcul préliminaire d'échangeur de chaleur nous avait donné les résultats suivants : pour une température d'eau du robinet de 20°C et de la chaudière de 100°C, l'échange de chaleur effectué dans le serpentin permettrait de sortir de l'eau à 80°C à condition que le débit soit maintenu à 1,3 l /mn . Ces résultats nous paraissant convenables, on a entrepris sans tarder la réalisation de cet échangeur . Nous ne passerons pas sans évoquer certains problèmes technologiques de fabrication pour juger de la complexité de la réalisation .

D'abord, il fallut trouver avec quoi fabriquer la cuve elle-même . Pour cela, on a eu la chance de trouver au rebut une petite bouteille d'air comprimé dans laquelle on a découpé le morceau qui nous convient . Il a fallu ensuite lui adapter un couvercle et une bride pour fixer celui-ci , avec tout ce que cela comporte comme phases de tournage et de soudage . De même qu'il a fallu exécuter le serpentin et l'adapter au couvercle avec des renvois par coudes . Enfin l'ensemble fut réalisé et devait théoriquement nous donner satisfaction ; la présence de la soupape de sécurité réglable donnait même la possibilité de travailler sous pression et la température d'échange pouvait ainsi s'élever à notre guise .

Mais au moment où l'on devait procéder, comme il se doit, aux premiers essais de mise en marche, on a eu la surprise désagréable de constater que la température de sortie de l'eau n'atteignait même pas les 60°C, malgré un débit minimum utilisé. La cause en était la puissance calorifique du brûleur meker utilisé qu'on ne pouvait pas connaître auparavant et qui s'est avérée très insuffisante, vu ~~que~~ les rapports de volume entre les deux fluides auxquels on désirait faire effectuer un échange de chaleur . Un autre brûleur de secours fut mis, puis un troisième et nous n'eumes toujours pas d'amélioration notable . Aurait-il fallu une batterie de brûleur de haut-fourneau que nous eussions voulu la mettre si nous n'eumes la sage idée de changer de procédure sans toucher à l'installation utilisée .



Plusieurs procédés furent utilisés par la suite en passant par le système du thermosyphon, à la circulation par pompe sans nous donner grande satisfaction, et finalement on a réussi quand même à résoudre le problème .

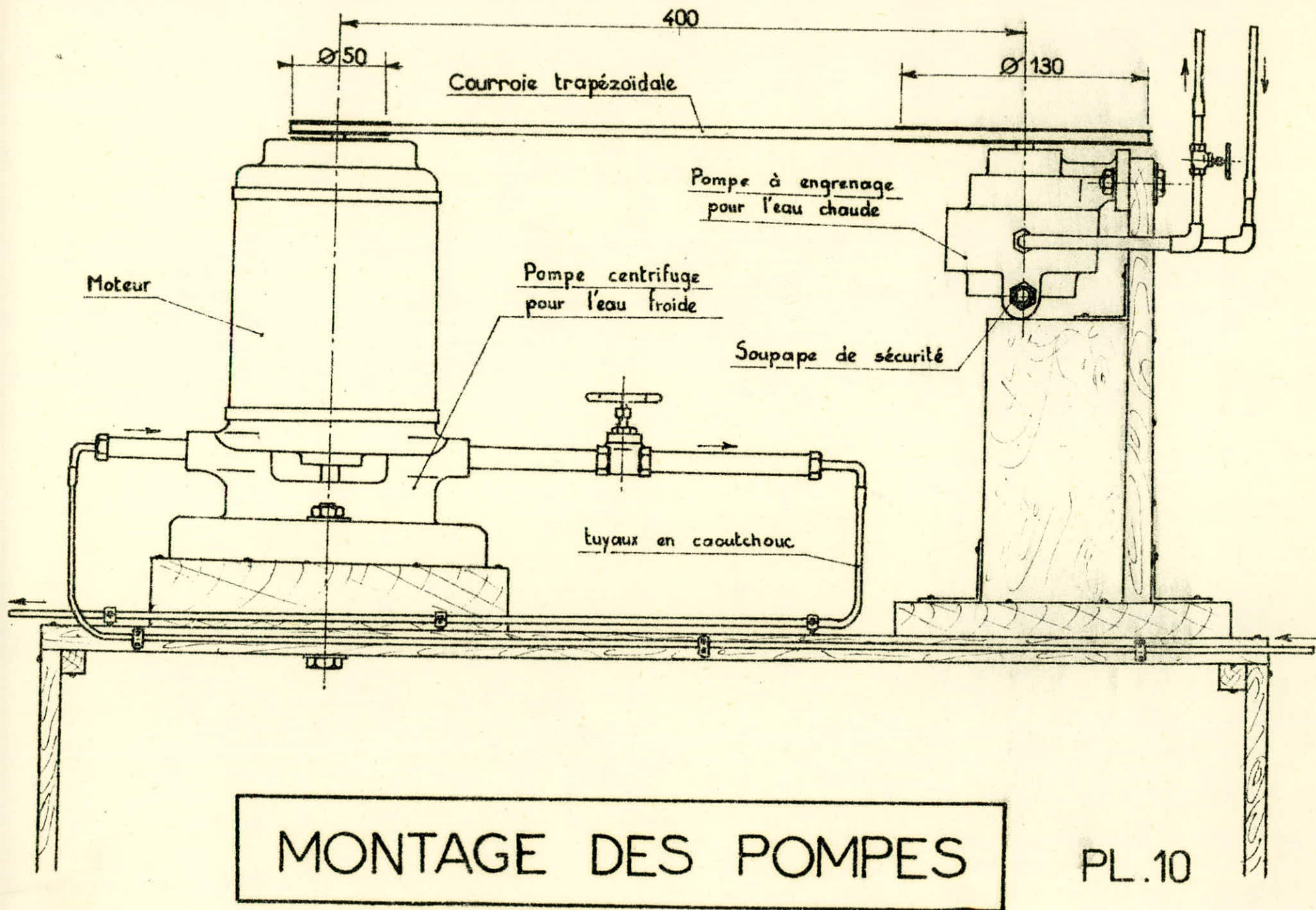
A ce niveau, on aimerait ouvrir une parenthèse : il peut paraître fastidieux de citer tous ces désagréments, mais on a préféré le faire tout de même car les enseignements tirés sont très fructueux . Et d'abord la recherche scientifique n'est-elle pas, de part sa nature même, sujette à maints déboires ce qui fait que sans abnégation dans l'effort entrepris il est inutile de faire de la recherche . Pour notre part nous ne regrettons nullement de nous être exposés à tant de problèmes car ils nous ont permis de faire un large tour d'horizon dans plusieurs domaines de fabrication .

Pour revenir au système utilisé actuellement notons qu'il consiste à prélever l'eau en ébullition de la chaudière, à l'aide d'une pompe branchée en circuit fermé . Cela a nécessité l'adjonction de tubes coudés et soudés sur le couvercle qui servent à l'aspiration et au refoulement de l'eau chaude . Notons, au passage, que la fonction initiale de la chaudière en échangeur est encore possible si l'on dispose de brûleur ou de résistance chauffante assez puissante, et si l'on désire travailler sous pression il suffit de mettre la soupape et court-circuiter les tubes d'aspiration et de refoulement entre eux .

Quant à la pompe, on a eu du mal au début à en trouver une qui puisse admettre de l'eau à 100°C, mais finalement on a opté pour une pompe à engrenages récupérée sur un vieux tour . Comme il lui fallait forcément un moteur d'entraînement, on a préféré utiliser pour cela celui même de la pompe de la source froide . Cela a nécessité l'usinage et l'adaptation d'une poulie fixée en bout d'arbre et un entraînement par courroie trapézoïdale .

Les deux pompes sont ensuite fixées et mises au même niveau sur un même support en bois qu'il a fallu travailler lui aussi . ( Voir planche 10 ) .







### Chapitre 3

#### PROCEDES TECHNOLOGIQUES UTILISES POUR LA POSE DES THERMOCOUPLES ET LA FABRICATION DES CLINQUANTS DE CUIVRE

##### 3.1 - Thermocouples :

Les expériences que nous menons étant principalement basées sur des mesures de température, il est donc essentiel d'apporter un soin particulier aux thermocouples employés . Nous avons déjà parlé du choix de ceux-ci et du principe de la méthode adoptée ( voir § 2.1.1, pages 18 à 23 ) ; nous parlerons maintenant uniquement de la technologie employée pour la confection de ces thermocouples .

##### 3.1.1 - Considérations sur la forme de la boule d'étain et de l'outil servant à son introduction :

Soit  $d$  le diamètre de la boule d'étain, considérée comme sphérique au départ . Ce diamètre doit obéir à des tolérances serrées telles que  $1,2\text{mm} < d < 1,3\text{mm}$  ; ceci pour les raisons suivantes vérifiées par des considérations pratiques :

- La borne inférieure est imposée par le diamètre du trou de logement qui est de 1,2mm . Le diamètre  $d$  doit être strictement supérieur à 1,2mm pour ne pas avoir un contact linéaire mais surfacique après écrasement de la boule . Ceci d'une part et d'autre part pour avoir un dégagement difficile de la boule de son trou de logement .

- Quant à la borne supérieure, elle est imposée par deux facteurs : la nature de l'outil servant à l'introduction de la boule et la malléabilité de celle-ci .

En ce qui concerne l'outil d'introduction, il doit être assez long et creux à l'intérieur pour permettre le passage du fil de Constantan au bout duquel est soudée la boule d'étain . Son diamètre extérieur ne doit pas dépasser 1,2mm vu que sa fonction est de pouvoir presser la boule d'étain au fond de son trou de logement .



Cela nous laisse le choix entre deux types d'outils : le capillaire en verre et la seringue d'injection intramusculaire . Mais le premier, outre la délicatesse qui doit entourer sa fabrication, présente l'inconvénient de ne pas pouvoir assurer une pression suffisante à faire épouser à la boule la forme de son trou de logement ; d'autant plus que ses éventuelles cassures sont très isolantes et risquent de porter préjudice au bon contact . Nous avons donc opté pour la seringue qui est en acier traité ; mais il faut auparavant dresser son biseau et adoucir son extrémité à la lime fine . L'expérience nous a montré qu'elle est capable de presser des boules dont le diamètre peut aller jusqu'à 1,3mm . Mais cette opération nécessite des soins particuliers dont nous parlerons plus loin .

### 3.1.2 - Soudage de la boule d'étain sur le fil de Constantan:

- Préparer d'abord un morceau de fil de Constantan d'une quinzaine de cm de longueur et le faire passer à travers la seringue jusqu'à apparition de son extrémité à trois ou quatre millimètres du bout de celle-ci . Tremper l'extrémité dans du décapant spécial pour étain et procéder aux opérations suivantes:

- Découper dans le fil d'étain cylindrique un morceau de longueur estimée capable d'engendrer un volume équivalent à celui de la boule à fabriquer .

- Placer ce morceau dans une cuillère à café bien propre et chauffer l'ensemble au bec bunsen . L'étain fond rapidement et prend de lui même la forme sphérique souhaitée .

- Approcher rapidement le fil de Constantan décapé et l'enfoncer dans la boule d'étain . Le décapant fait alors son effet en donnant une soudure franche et propre .

- Avec une loupe, s'assurer qu'après refroidissement, le fil traverse diamétralement la boule de part en part . Tenir la boule avec des pinces plates et découper le fil excédant .

- Vérifier finalement au micromètre que le diamètre de la boule est bien dans les tolérances citées .



Eviter durant toutes ces opérations de faire subir au fil des contraintes de cisaillement et de fatigue qui risquent de le détacher de sa boule .

Le thermocouple est maintenant prêt à être monté, mais avant cela il faut d'abord bien nettoyer le trou de logement par un décapage à l'acide chlorhydrique dilué et rinçage à l'eau.

### 3.1.3 - Introduction de la boule d'étain :

Cette opération doit être effectuée avec le panneau de fermeture du boîtier préalablement démonté, à cause de la longueur de seringue insuffisante dans notre cas .

- Introduire la seringue, avec l'ensemble fil-boule dedans, à travers les trous de l'anneau de garde jusqu'à atteindre ceux du conducteur central .

- A ce moment, appliquer une pression régulière jusqu'à introduction complète . Un repère doit être établi auparavant sur la seringue en tenant compte des dimensions de la boule, ce qui indique que celle-ci bute bien au fond du trou . Il est recommandé d'insister, sans toutefois exagérer, de presser pour faire épouser à la boule la forme du trou de logement .

L'ordre préférentiel à respecter dans cette opération est le suivant : - partie supérieure : 1 , 2 , 3 , 4

- partie inférieure : 8 , 7 , 6 , 5 .

Il peut arriver qu'à force de presser, le fil se détache de la boule car, de par sa finesse, celui-ci peut se présenter à l'avant de l'arête de la seringue . Il faut alors dégager la boule qui reste par un fil de fer chauffé et recommencer entièrement l'opération .

### 3.1.4 - Isolation du fil de Constantan et fermeture du boîtier

- La température à mesurer étant axiale, il faut annuler tout autre contact fil-acier .

La gaine employée doit, si possible, isoler le fil juste au niveau du trou de logement et de l'anneau de garde uniquement pour ne pas créer de pont thermique .

- Faire passer ensuite les extrémités libres des fils à travers le panneau de fermeture du boîtier et fermer celui-ci .



- Introduire les cordons prolongateurs en fil de cuivre souple dans les dominos prévus à cet effet, en même temps que le fil de Constantan et visser l'ensemble .

La masse commune en fil de fer est-elle aussi fixée dans un domino .

- Vérifier une dernière fois à l'Ohmmètre le bon contact entre le fil de fer et le fil de Constantan .

L'ensemble est maintenant rigide et prêt à être branché sur la boîte de sélection ( voir planche 6 ) .

### 3.2 - Fabrication des clinquants de cuivre :

De par sa conception même, l'appareil d'expérimentation exige un bon dimensionnement de l'échantillon de cuivre dont on veut mesurer la résistance thermique .

Son diamètre doit être égal ou de préférence légèrement supérieur à celui du conducteur central pour avoir un bon contact thermique sur toute la surface . Il est nécessaire aussi d'avoir une bonne planéité du clinquant ( erreur admise inférieure à deux microns ) pour ne pas introduire de résistance thermique parasite due à la présence de couches d'air . Toutes ces restrictions entourant la confection des clinquants augurent du soin particulier qui doit être apporté à cette fin .

L'idéal aurait été de disposer d'une panoplie de feuilles minces du commerce ; mais on n'en trouve pas car la variété d'épaisseurs à étudier sort du cadre de la série et il faut donc bien, par un moyen ou par un autre, établir une méthode de fabrication .

Une idée intéressante à exploiter serait de passer une commande chez un artisan bijoutier dont le laminoir précis s'apprête bien à cette fin ; mais aucun des bijoutiers consultés n'a accepté car, paraît-il, le cuivre laisserait des traces sur son laminoir difficiles à enlever sans abîmer celui-ci, ce qui pourrait paraître louche lors d'un éventuel contrôle .

Cela nous a amené à essayer plusieurs autres méthodes,



mais auparavant il a fallu découper à la poinçonneuse toute une récolte de disques de cuivre de 10mm de diamètre, extraits à partir d'une tôle de 0,5mm d'épaisseur .

### 3.2.1 - Méthodes essayées :

#### 3.2.1.1 - La polisseuse :

On dispose, au laboratoire de Métallurgie, d'une polisseuse servant à des travaux de métallographie . Sur le plateau tournant de celle-ci, on appliquait au doigt le clinquant à travailler . L'abrasion avait quand même lieu et permettait de descendre en profondeur . Mais cette procédure est pénible et peu précise ; ce qui nous a obligés de fabriquer au tour, une pièce qui puisse tenir les clinquants et nous éviter de les tenir au doigt . Mais c'est le maintien de cette pièce elle-même qui nous a fait abandonner cette méthode .

#### 3.2.1.2 - La presse hydraulique :

Le clinquant est mis entre deux rondins d'acier dur bien plats et bien pôlis, et positionnés sous le piston d'une presse hydraulique qui déforme le métal par écrasement, lequel gagne en surface ce qu'il perd en épaisseur . Mais cela nécessite une procédure par étapes car il faut enlever l'érouissage du métal par recuits successifs . Il est recommandé aussi d'induire les surfaces par un mince film d'huile pour faciliter l'étalement du métal .

La machine utilisée permet d'enlever 0,2mm par 10 tonnes de charge pour la première étape ; mais cette performance va en diminuant pour les étapes suivantes car le clinquant change à chaque fois en dimensions et en constitution .

La méthode, qui s'apprête bien à la fabrication par série, est assez bonne tant que le parallélisme des rondins d'acier est respecté, mais offre des possibilités limitées . En effet, plus on descend en profondeur et plus il faut des rondins d'acier de plus en plus durs et de résistance à la rupture par compression de plus en plus élevée, car au delà de 120 microns on n'a pas trouvé d'acier qui ne se fendille pas .



### 3.2.1.3 - L'électrolyse :

Le montage se compose d'un bain électrolytique formé par une solution aqueuse d'acide ortho-phosphorique ou sulfurique, des électrodes et d'une batterie d'alimentation . L'anode est formée par l'échantillon de cuivre lui-même, ce qui fait que les ions  $\text{Cu}^{++}$  s'en détachent et se fixent sur la cathode en provoquant une corrosion régulière de l'échantillon, corrosion qui est fonction de la densité du courant et de l'acide .

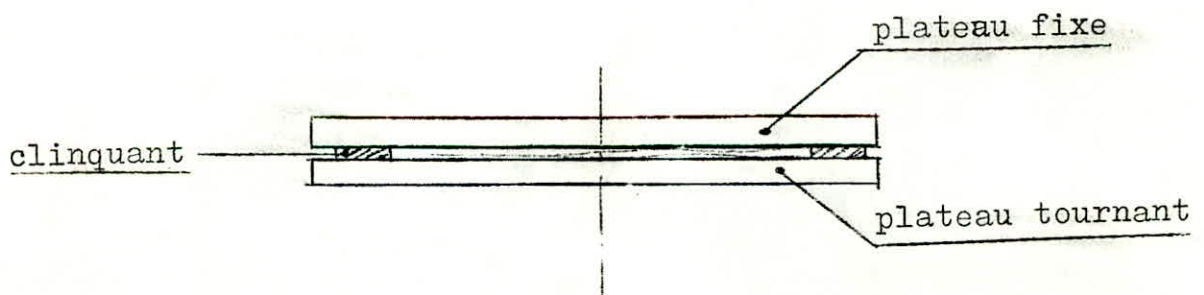
Cette méthode donc donne de très bons résultats en ce qui concerne l'état de surface et la planéité ( à condition que l'échantillon soit plan avant l'opération ) . Cependant elle présente l'inconvénient d'être trop lente vu qu'il faut 5 mn environ pour enlever une dizaine de microns . En outre, elle s'apprête mal à une fabrication par série .

Tout cela fait que nous avons préféré abandonner cette méthode pour ne la réserver qu'à une finition ou une mise à la côte éventuelles .

### 3.2.2 - Méthode définitive :

Cette méthode consiste en une amélioration apportée à celle utilisant la polisseuse :

Sur le plateau de celle-ci, on dispose une série de clinquants régulièrement espacés et l'on recouvre l'ensemble par un autre plateau identique, le côté abrasif dirigé vers le bas. Le plateau inférieur tourne autour de son axe de rotation, tandis que le plateau supérieur est maintenu fixe par une pression régulière . Mouiller auparavant les faces abrasives avec de l'eau en guise de lubrification .





La conséquence de ce montage est l'uniformité de l'abrasion produite, ce qui fait que l'état de surface et le parallélisme qui en découlant sont très satisfaisants .

Il est à noter aussi l'avantage que recèle cette méthode quant à la possibilité d'une production en série .

### 3.2.3 - Contrôle et tri des clinquants :

La résistance thermique des clinquants pouvant accuser de grandes variations pour une très faible variation de leur épaisseur, il est clair que le plus grand soin doit être apporté à la mesure de ces épaisseurs .

Dans cette vue là on a mesuré tous les clinquants à l'aide d'un micromètre de précision, pouvant apprécier le micron, et seuls sont retenus ceux qui ne présentent pas des variations d'épaisseur, mesurées en des points différents, qui n'excèdent pas deux à trois microns, pour ne pas laisser de couches d'air intersticielles lors du montage .

Une fois mesurés, les clinquants sont mis dans des petites enveloppes individuelles spécialement confectionnées pour eux et classés par ordre dans un tiroir .

Au moment de l'expérience le clinquant est nettoyé à l'alcool et monté dans l'appareil . Après l'expérience , il est remis dans son enveloppe et repéré .

Il est recommandé aussi de bien conserver le paquet de Papiers à cigarette dans une enveloppe spéciale, bien à l'abri de l'humidité et des poussières .



Chapitre 4

METHODOLOGIE D'EXPERIMENTATION

4.1 - Mise en place du clinquant :

- Démontez le boîtier supérieur et le fixer au crochet du support,
- S'il y a un autre clinquant déjà en place, l'enlever à l'aide d'un tourne vis par exemple, avec les deux feuilles de papier à cigarette et le remettre dans son enveloppe ; repérer celle-ci pour noter que le clinquant qu'elle contient est déjà passé à l'essai .

- A l'aide du tournevis poser sur le conducteur central de l'appareil expérimental :

- Une feuille de papier à cigarette ,
  - Le clinquant à examiner, préalablement nettoyé à l'alcool ,
  - Une autre feuille de papier à cigarette .
- Remettre en place, avec soin, le boîtier supérieur en s'assurant du bon contact et de la bonne assise de celui-ci ( pas de basculement ) .

4.2 - Mise en marche de l'installation :

- Remplir d'eau la cuve servant de source chaude,
- Allumer le ou les brûleurs à plein gaz et attendre l'ébullition de l'eau .
- Entretemps, allumer le thermostat de la source froide ; le repère de celui-ci ( fixé à 30°C ) ne doit pas être touché durant toutes les expériences .
- Lorsque l'eau de la source chaude atteint la température d'ébullition, brancher les pompes . A ce moment la température décroît rapidement jusqu'à 85°C environ, à cause de la demande de calories qui s'effectue dans l'ensemble du circuit d'alimentation ; mais au fur et à mesure que l'ensemble se réchauffe, la température de la chaudière s'élève jusqu'à se stabiliser à 100°C , et ce un quart d'heure environ après la mise en marche des pompes . A ce moment, diminuer la flamme du brûleur



de façon à maintenir juste la chaleur latente de vaporisation, et ce pour diminuer les pertes d'eau par évaporation pour assurer une meilleure autonomie de l'alimentation .

- Attendre encore une demi-heure avant de procéder aux mesures .

#### 4.3 - Mesures effectuées :

- Relever les indications des thermocouples à des intervalles réguliers de préférence, allant de quart d'heure en quart d'heure, et ce jusqu'à apparition d'une stabilité dans les indications et leurs écarts .

- Reporter les résultats sur des feuilles types du genre de celles jointes à ce texte .

- Pendant les temps morts passés à attendre la montée en température et l'établissement du régime stationnaire, faire un calcul préliminaire de la résistance thermique du clinquant en se basant sur la notice de calcul du chapitre 5, avec une représentation graphique pour s'assurer de l'établissement du régime stationnaire .

Il est recommandé, en outre, de représenter sur une feuille de papier millimétré, les résistances thermiques des clinquants étudiés en fonction de leur épaisseur, pour se faire une idée déjà sur les points douteux ou ceux qu'il reste à faire .



Chapitre 5

METHODOLOGIE DE CALCUL

5.1 - Analyse de la planche 12 :

Nous avons déjà parlé, au § 1.1 - page 10, du principe directeur de la méthode d'expérimentation et de calcul basé sur la mesure de la chute thermique brusque produite au niveau du clinquant étudié, ce que l'on a résumé sur la planche 2 . La planche 12 donne justement le détail de toutes les chutes thermiques contenues dans cette coupure brusque .

5.1.1 - Considérations sur la résistance thermique du clinquant :

La résistance thermique R totale qu'offre le clinquant au passage du flux  $\varphi$  , est la somme des résistances de conduction  $R_c$  et des résistances Jacq  $R_j$  .

$$R_c = \frac{\Delta T_7 + \Delta T_9 + \Delta T_{11}}{\varphi}$$

$$R_j = \frac{\Delta T_8}{\varphi} + \frac{\Delta T_{10}}{\varphi} = R_{j1} + R_{j2}$$

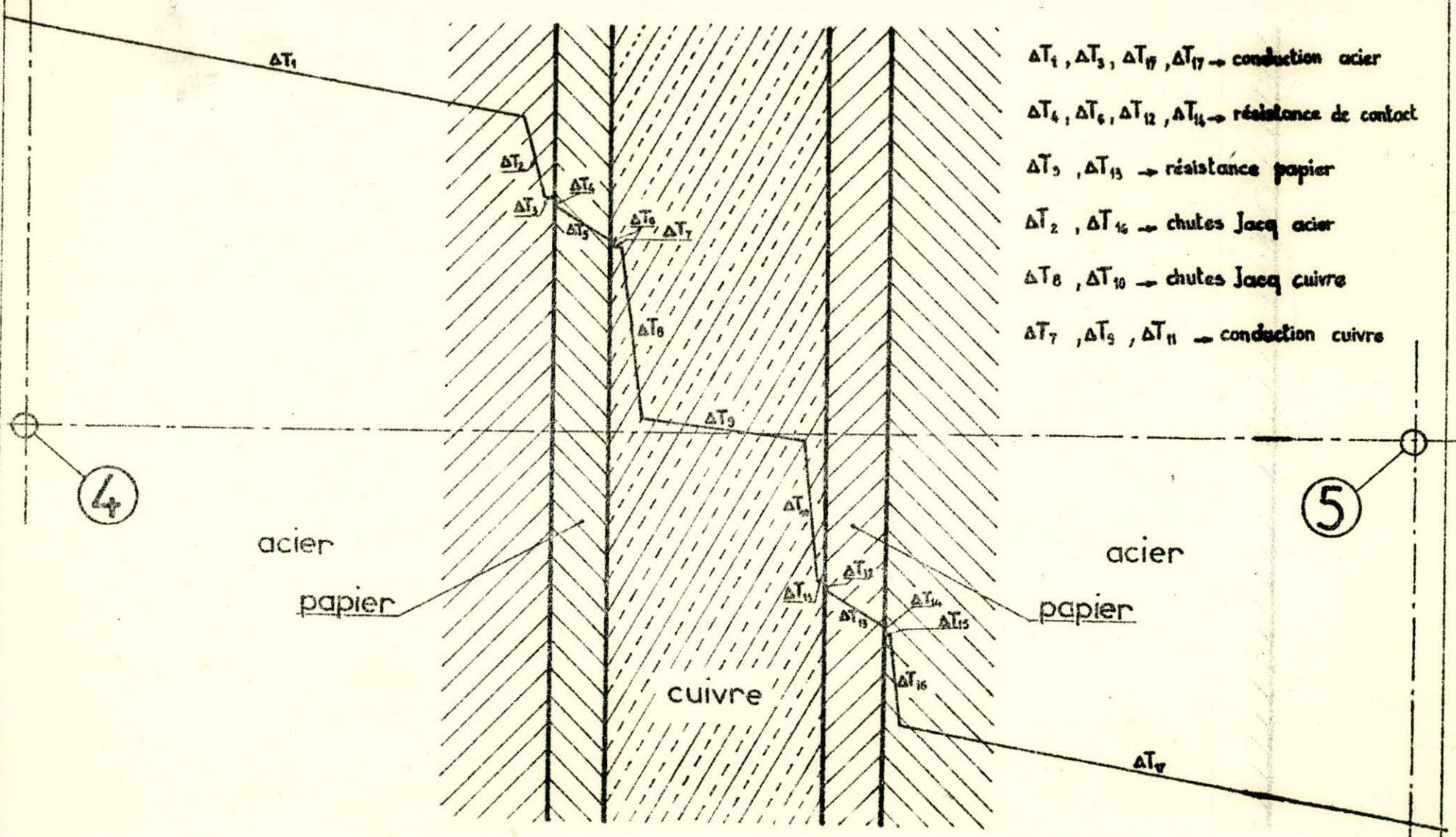
$$R = \frac{\Delta T_7 + \dots + \Delta T_{11}}{\varphi} = \frac{\Delta T}{\varphi} = R_c + R_j$$

Cependant,  $R_c$  est parfaitement négligeable vue la bonne conductibilité du cuivre ainsi que l'épaisseur traversée par le flux qui n'excède pas le millimètre dans notre cas . De la sorte, on peut assimiler sans erreur la résistance totale à la résistance Jacq et écrire  $R = R_{j1} + R_{j2}$  , et c'est ce que nous nous proposons de mesurer .

Il est d'ailleurs plus correct de parler de résistance thermique totale du clinquant, plutôt que de parler de (  $R_{j1} + R_{j2}$  ) .

Toutefois, il y a lieu de signaler certaines précisions relatives à la nature même de cette résistance . En effet,





BILAN DES CHUTES THERMIQUES  
 COMPRISES DANS  $\Delta T_{4-5}$



les travaux antérieurs de Monsieur Jacq ont permis d'estimer : l'épaisseur des couches d'anomalie à une centaine de microns et localisé celles-ci à une cinquantaine de microns à partir des faces d'entrée et de sortie du flux . Cela revient à dire que ces couches ne sont distinctes que pour des épaisseurs de clinquant supérieures à 200 microns ; or, il se trouve justement que la plupart de nos échantillons se situent dans des limites d'épaisseur inférieures à cette valeur . Cela fait que si l'on s'en tient à cette configuration, il est erroné de parler de couches Jacq à l'entrée et à la sortie car celles-ci se confondent et peuvent même s'annuler pour des épaisseurs inférieures à 50 microns . Dans ces conditions, la résistance thermique totale du clinquant serait due - au cas où elle serait élevée - à un cas particulier de l'effet Jacq relatif aux petites épaisseurs mais non à l'effet Jacq proprement dit comme il a l'habitude de se manifester ; elle peut même être due à un autre phénomène physique insoupçonné.

Toutefois, nous continuerons, par tradition, à appeler (  $R_{j1} + R_{j2}$  ) cette résistance dans la suite de notre texte .

5.1.2 - Déduction de la résistance du clinquant :

La planche 12 permet de tirer les relations suivantes :

$$\frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi} = \frac{\Delta T_1 + \dots + \Delta T_6}{\varphi} + \frac{\Delta T_7 + \dots + \Delta T_{11}}{\varphi}$$

$$+ \frac{\Delta T_{12} + \dots + \Delta T_{17}}{\varphi}$$

$$\frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi} = \frac{(\Delta T_1 + \dots + \Delta T_6) + (\Delta T_{12} + \dots + \Delta T_{17})}{\varphi}$$

$$+ \frac{\Delta T_7 + \dots + \Delta T_{11}}{\varphi} \quad \Longrightarrow$$

$$R_{4-5} = R_0 + (R_{j1} + R_{j2})$$



Cette relation exprime que la résistance thermique unitaire totale comprise entre les points 4 et 5 est la somme de la résistance initiale  $R_0$  de l'ensemble de l'appareil d'expérimentation, de la résistance des feuilles de papier et des résistances de contact .

$R_0$  est mesurée une fois pour toutes sur les données de la chute thermique  $(\Delta T_{4-5})_0$  introduite par la présence des deux feuilles de papier seules et du flux unitaire  $\varphi_0$  qui les traverse . On peut en déduire  $(R_{j1} + R_{j2})$  :

$$R_{j1} + R_{j2} = R_{4-5} - R_0 = \frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi} - R_0$$

## 5.2 - Bilan des erreurs de mesure :

### 5.2.1 - Considérations sur le flux et la conductibilité :

Le flux thermique peut être mesuré en relevant les indications de deux thermocouples quelconques situés à une distance déterminée, par exemple les thermocouples 5 & 8 .

$$\varphi = -\lambda \frac{\Delta T_{5-8}}{x_5 - x_8} = \lambda \frac{\Delta T_{5-8}}{L}$$

avec  $\lambda$  = conductibilité de l'acier

$L$  = distance entre les 2 thermocouples = 57 mm .

Cependant, les deux portions de droite représentant les distributions de température dans notre système expérimental, ont des pentes légèrement différentes quoiqu'elles soient parfaitement linéaires ( fig. 1 )

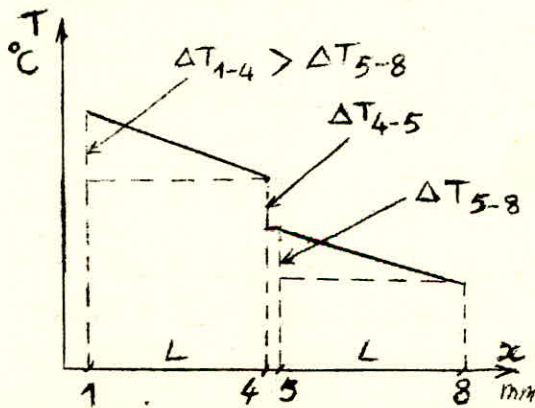


Fig. 1

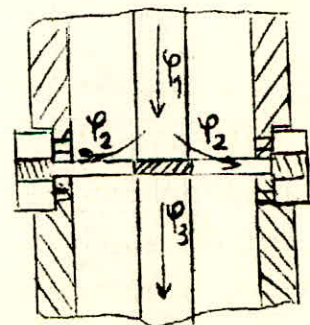


fig. 2



Ceci est quelque peu attendu car les petites rainures que comporte la bague de centrage provoquent irrémédiablement un léger flux de fuite  $\varphi_2$  ( voir fig. 2 ), ce qui explique que le flux traversant la partie supérieure de l'appareil est légèrement plus grand que celui qui traverse sa partie inférieure ( $\varphi_1 > \varphi_3$ ).

Le flux qui traverse le clinquant peut être pris comme étant le flux moyen entre  $\varphi_1$  &  $\varphi_3$ , mais il semble plus correct de le prendre comme étant  $\varphi_3$ , ce qui s'approche plus de la réalité ( fig. 2 ); d'autant plus que si une quelconque erreur affectait cette hypothèse, elle agirait de la même façon sur toutes les résistances mesurées en n'entachant que leurs valeurs absolues et non leurs écarts par rapport à une résistance de référence ce qui, en d'autres termes, n'affecte pas l'allure globale de la distribution des résistances des clinquants en fonction de leurs épaisseurs.

Il est à noter cependant que cette différence de pente n'est pas due uniquement au flux de fuite car il n'est pas le seul à entrer en ligne de compte, mais il y a aussi la longueur L et la conductibilité  $\lambda$ .

Pour ce qui est de la longueur, il est clair qu'elle n'est jamais identique pour les deux portions de droites qui nous intéressent; car l'erreur de positionnement au perçage, due à un éventuel décalage des coups de pointe de repérage, peut atteindre ou même dépasser le millimètre. ce qui fait que si  $(x_4 - x_1) < 57$  mm et si  $(x_8 - x_5) > 57$  mm, il se produit un rabattement des deux droites dans un sens qui amplifie la différence de leurs pentes ( à températures égales).

Quant à la conductibilité  $\lambda$ , elle varie linéairement avec la température pour les métaux et suit une loi de la forme :  $\lambda = \lambda_0(1+aT)$  avec  $a < 0$ . cela fait que:

$$\lambda_1 < \lambda_4 < \lambda_5 < \lambda_8$$

On peut toutefois proposer une étude du comportement du flux vis à vis de la variation de  $\lambda$  avec la température entre deux points quelconques 1 & 2.







Exemple : pour l'acier à 1 % de carbone, on donne pour  $T_1 = 18^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_1 = 39 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$ . et pour  $T_2 = 100^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_2 = 38,6 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$ . Ce qui donne :

$$a = \frac{38,6 - 39}{39 \cdot 100 - 38,6 \cdot 18} = - 1,247 \cdot 10^{-4} \text{ kcal/m.h}$$

$$\lambda_0 = \frac{39 \cdot 100 - 38,6 \cdot 18}{100 - 18} = 39,088 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$$

La connaissance des températures aux points 5 et 8 permet d'avoir les  $\lambda$  correspondants :

$$\begin{aligned} \lambda_5 &= \lambda_0 ( 1 + aT_5 ) \\ \lambda_8 &= \lambda_0 ( 1 + aT_8 ) \end{aligned} \quad \Rightarrow$$

$$\varphi = ( T_5 - T_8 ) \frac{\lambda_5 + \lambda_8}{2} \cdot \frac{1}{L} \dots$$

Cependant, dans notre cas,  $T_{5-8}$  et  $T_{1-4}$  n'excèdent jamais les  $20^\circ\text{C}$  dans la plupart des expériences; ce qui fait que la variation de  $\lambda$  est négligeable.

Pour  $\Delta T = 100 - 18 = 82^\circ\text{C}$ ,  $\Delta \lambda = 39 - 38,6 = 0,4 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$

Pour  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\Delta \lambda = \frac{0,4 \cdot 20}{82} = 0,1 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$

Mais il est un facteur dont l'influence sur le flux n'est pas négligeable, c'est la nature de l'acier qui ne peut être connue avec précision. Ce qui fait que pour notre acier on en a estimé la conductibilité moyenne à  $39,4 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ . Mais dans ce cas aussi, l'erreur commise n'affecte pas l'allure de la distribution des résistances thermiques des clinquants en fonction de leurs épaisseurs, comme cela a été expliqué plus haut.

#### 5.2.2- Erreurs dans la mesure de température:

Le pont de mesure, aussi perfectionné soit-il, admet quand-même une erreur sur son indication due à plusieurs



facteurs : la sensibilité de l'appareil, sa classe, l'étalonnage de la pile et l'appréciation de l'opérateur. Toutefois, cette erreur ne peut dans tous les cas excéder 0,02mV. Cela correspond à une erreur sur la température qui vaut :

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C}$$

avec C = constante d'étalonnage des thermocouples  
= 0,0512

$$\Delta T = \frac{0,02}{0,0512} = 0,39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Un moyen de réduire cette erreur est de mesurer directement les différences de températures qui entrent en considération dans les calculs, soit  $\Delta T_{4-5}$  et  $\Delta T_{5-8}$ , par une méthode différentielle (voir branchement des thermocouples à la planche 6).

$$\Delta (\Delta T_{4-5}) = \Delta (\Delta T_4) = \Delta (\Delta T_5) = 0,39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

L'erreur de lecture est ainsi réduite de moitié.

### 5.2.3 - Erreur due au clinquant et aux papiers :

C'est là l'erreur qui, si l'on n'y prend pas garde, risque d'être la plus grande. En effet, le positionnement du clinquant et l'état de surface de celui-ci ainsi que la propreté des feuilles de papier, doivent être entourés du plus grand soin, sinon les couches d'air interstitielles qui risqueraient de se développer, de même que la conductibilité du papier qui peut être affectée par la présence de taches quelconques font que la résistance mesurée peut s'écarter de sa valeur réelle. Pour notre part, nous n'avons pas manqué de porter à ce détail tout l'égart qui lui est dû en observant les règles suivantes :

- Erreur sur l'état de surface du clinquant inférieure à deux microns,
- Papiers protégés contre l'humidité et les taches dans un emballage spécial et changés à chaque nouvelle expérience,



- Clinquant nettoyé à l'alcool avant sa mise à l'essai,
- Vérification du bon positionnement avant chaque mesure .

L'observation de ces règles a permis d'obtenir des résultats qui, comparés statistiquement, ne laissent pas entrevoir d'erreur inquiétante . L'erreur totale ainsi estimée ne dépasse pas les 18 % pour 90 % des échantillons .

5.2.4.- Erreur due à la stabilité des sources :

Nous estimons de ce côté que l'erreur est insignifiante car nous n'avons pas eu à déplorer une quelconque défaillance dans la stabilité des températures des sources d'eau froide et d'eau chaude tout le long d'une même expérience . D'autant plus qu'avant chaque mesure, on prend la précaution de vérifier les indications des thermomètres de celles-ci .

5.2.5 - Calcul d'erreur :

$$R_{j1} + R_{j2} = \frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi} - R_0 = \frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi} - \frac{(\Delta T_{4-5})_0}{\varphi_0}$$

$$= \frac{L}{\lambda} \frac{\Delta T_{4-5}}{\Delta T_{5-8}} - \frac{L}{\lambda} \frac{(\Delta T_{4-5})_0}{(\Delta T_{5-8})_0}$$

Soit  $e_1 = \frac{\Delta (R_{j1} + R_{j2})}{R_{j1} + R_{j2}} =$  Erreur relative commise sur la mesure de la résistance du clinquant, établie par voie de calcul .

$$e_1 = 2 \left[ \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta (\Delta T_{4-5})}{\Delta T_{4-5}} + \frac{\Delta (\Delta T_{5-8})}{\Delta T_{5-8}} \right]$$

avec  $L = 57 \text{ mm}, \Delta L = 1 \text{ mm}$   
 $\lambda = 39,4 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}, \Delta \lambda = 0,1 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$   
 $\Delta T_{4-5} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta (\Delta T_{4-5}) = 0,39 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $\Delta T_{5-8} = 15 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta (\Delta T_{5-8}) = 0,39 \text{ }^\circ\text{C}$

$\Delta T_{4-5}$  et  $\Delta T_{5-8}$  sont des valeurs moyennes .

$$e_1 = 2 \left( \frac{1}{57} + \frac{0,1}{39,4} + \frac{0,39}{15} + \frac{0,39}{15} \right)$$

$$e_1 = 2 \cdot 0,072 \approx 0,15$$



En réalité, cette erreur est moindre que cela car la résistance  $R_0$  a été mesurée par une moyenne statistique, ce qui réduit son erreur. toutefois, nous admettrons un intervalle de confiance de 10% sur l'erreur. due à  $R_0$ .

$$e_1 = 0,072 + \frac{0,072 \cdot 10}{100} = 0,08$$

Tout ce calcul a été mené pour dégager les parts d'erreur introduites par la méthode de mesure, soit  $e_1$ , et par le clinquant, soit  $e_2$ . Leur somme forme l'erreur relative totale commise sur la valeur de la résistance thermique du clinquant et qui est estimée statistiquement à 18 %.

$$e_2 = 0,18 - 0,08 = 0,1 = 10 \%$$

= erreur introduite par les défauts de pose du clinquant.

$$e = \frac{\Delta(R_{j1} + R_{j2})}{R_{j1} + R_{j2}} = 0,18$$

### 5.3 - Notice de calcul :

Les résultats des mesures se présentent sous forme de tableaux contenant les indications des thermocouples en mV et la température ambiante  $T_a$  en °C ( voir les feuilles de résultats jointes avec le texte ).

1 - Compensation des indications des thermocouples :

Soit  $E_T$  la lecture compensée,  $E$  celle mesurée et  $E_c$  la valeur en mV correspondante à la température ambiante  $T_a$ .

$$\begin{aligned} E_T &= E + E_c \\ E_c &= 0,0512 \cdot T_a \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad E_T = E + 0,0512 \cdot T_a$$

2 - Conversion des mV en °C :

$$T = \frac{E_T}{0,0512} = \frac{100 \cdot E_T}{5,12}$$

3 - Noter les valeurs en °C de  $\Delta T_{4-5}$  et  $\Delta T_{5-8}$  obtenues par mesure directe.



4 - Calcul du flux thermique unitaire :

$$\varphi = \lambda \frac{\Delta T_{5-8}}{L} = \frac{39,4 \cdot 10^3}{57} \cdot \Delta T_{5-8}$$

$$\varphi = 0,6912 \cdot 10^3 \cdot \Delta T_{5-8} \text{ kcal/h.m}^2$$

5 - Calcul de la résistance totale :

$$R_t = \frac{\Delta T_{4-5}}{\varphi}$$

6 - Calcul de la résistance du clinquant :

$$R_{j1} + R_{j2} = R_t - R_0$$

$R_0$  étant la résistance initiale de l'ensemble de l'appareil expérimental que l'on va déterminer un fois pour toutes.

#### 5.4 - Détermination de $R_0$ :

La résistance  $R_0$  se détermine en menant une expérience normalement mais avec deux papiers à cigarette uniquement. L'importance du résultat nous a incité à refaire l'expérience plusieurs fois pour pouvoir prendre une moyenne statistique.

Nous donnons ci-après les résultats des expériences faites et nous rappelons que les calculs ont été menés suivant les directives de la notice de calcul mais avec  $R_t = R_0$ .

Il est à noter cependant que nous ne prendrons en considération pour le calcul de la moyenne que les trois premières expériences parmi les quatre présentées, car la dernière donne un résultat un peu à l'écart. Celle-ci a d'ailleurs été faite exprès avec deux papiers réutilisés pour plusieurs essais de clinquants et donc salis à force de manipulations. Cela nous permet de tirer une conclusion pratique importante, c'est de prendre la précaution de changer les papiers à chaque nouvelle expérience.

$$R_0 = \frac{(1 + 1,06 + 1,06)}{3} \cdot 10^{-3} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C/Kcal.}$$

L'erreur commise est très petite car ces expériences ont été menées en observant les critères de fiabilité qui seront explicités plus loin.

$$e = \frac{1,04 - 1}{1,04} = 0,038 = 4 \%$$



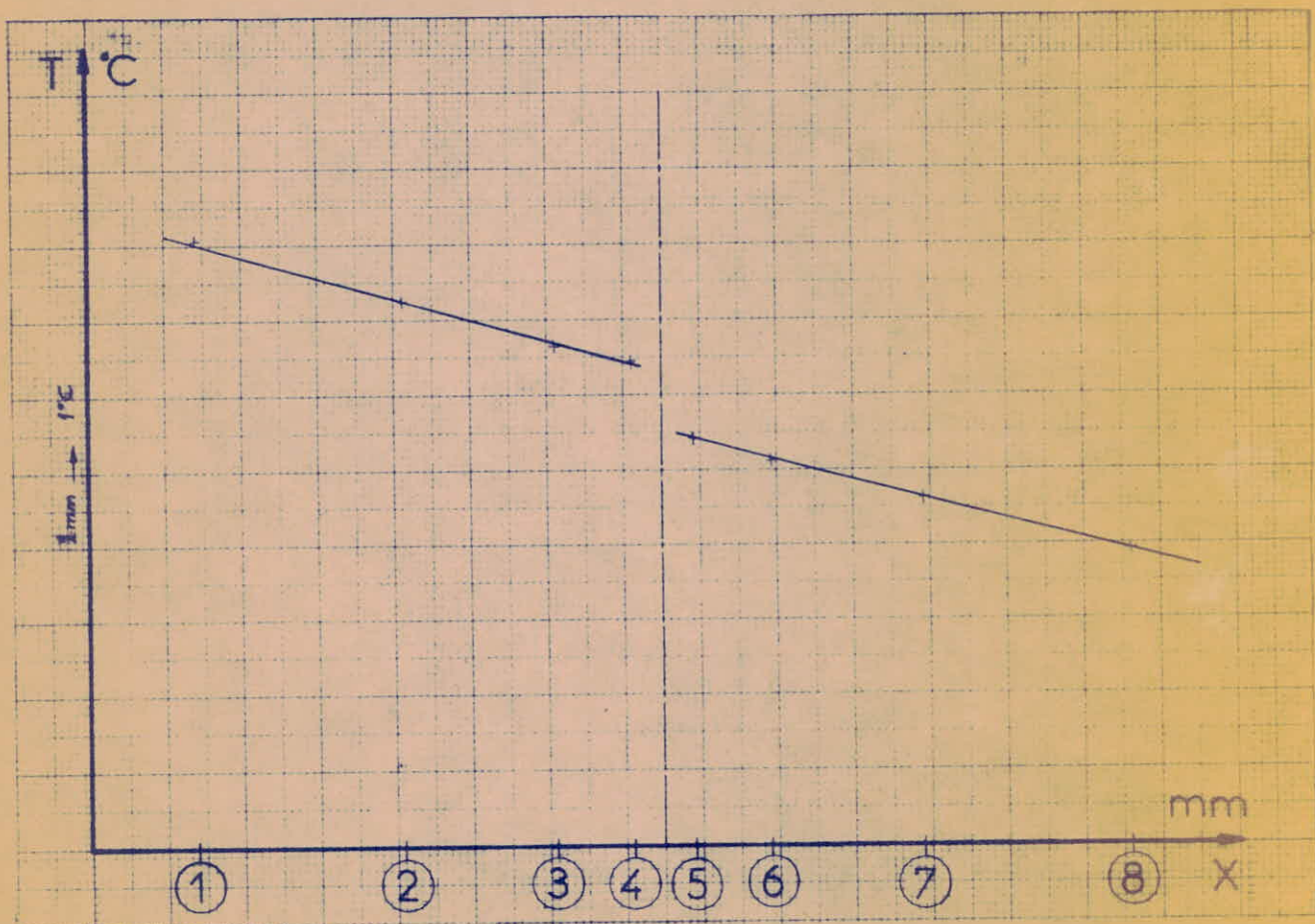
## 2 FEUILLES DE PAPIER

$e = 25 \mu$

$T_a = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$

$E_c = 0,97 \text{ mV}$

E (mV) Temps (mn)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,14	3,68	3,41	3,80	2,80	2,63	2,41	2,03	1,50	1,78
35	4,13	3,68	3,41	3,32	2,75	2,62	2,38	2,01	1,55	1,73
115	4,14	3,72	3,41	3,32	2,78	2,64	2,39	2,03	1,53	1,73
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	80,85	72,66	66,60	64,84	54,30	51,56	46,68	39,65	10,94	14,84



$$(\Delta T_{4-5})_0 = 10,94 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\Delta T_{5-8})_0 = 14,84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi|_0 = 10,26 \cdot 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$R_0 = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C/kcal}$

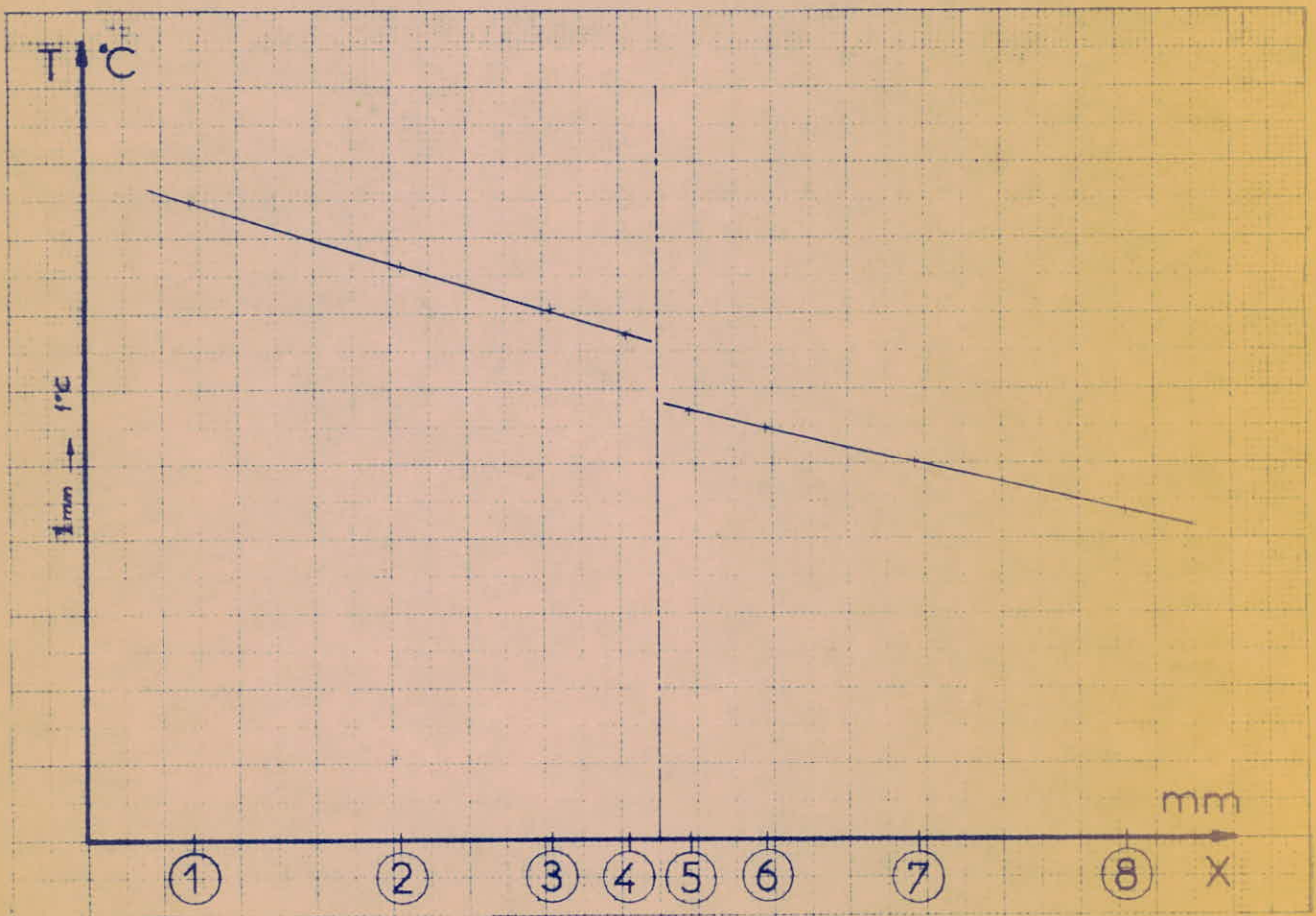
# 2 FEUILLES DE PAPIER

$$e = 25 \mu$$

$$T_a = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,41 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,46	3,91	3,61	3,50	2,97	2,84	2,57	2,23	0,52	0,73
35	4,44	3,90	3,60	3,49	2,96	2,82	2,56	2,22	0,52	0,73
140	4,34	3,90	3,60	3,47	2,95	2,82	2,56	2,22	0,53	0,72
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,76	76,17	70,31	67,77	57,62	55,08	50,02	43,36	10,35	14,06



$$(\Delta T_{4-5})_0 = 10,35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\Delta T_{5-8})_0 = 14,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi|_0 = 9,72 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_0 = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C/kcal}$$



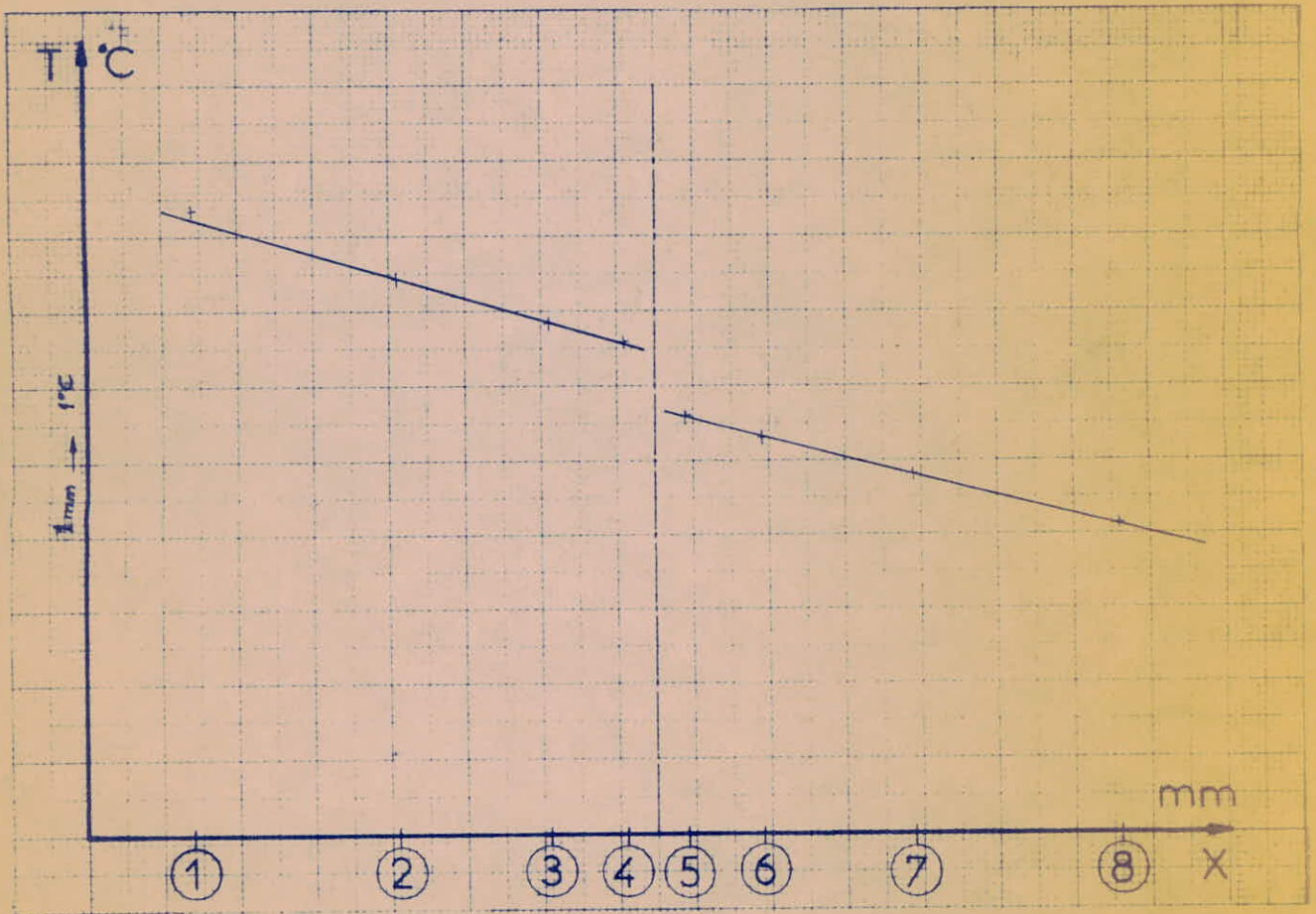
2 FEUILLES DE PAPIER

$e = 25 \mu$

$T_a = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$E_c = 1,19 \text{ mV}$

$E(\text{mV})$ Temps (mn)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,26	3,87	3,51	3,40	2,87	2,73	2,45	2,11	0,52	0,75
30	4,24	3,79	3,49	3,39	2,87	2,73	2,46	2,12	0,52	0,75
105	4,26	3,81	3,50	3,39	2,87	2,73	2,46	2,12	0,52	0,75
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	83,20	74,41	68,36	66,21	56,05	53,32	48,10	41,41	10,16	14,65



$(\Delta T_{4-5})_0 = 10,16 \text{ } ^\circ\text{C}$  ;  $(\Delta T_{5-8})_0 = 14,65 \text{ } ^\circ\text{C}$

$|\varphi|_0 = 10,126 \cdot 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

$R_0 = 1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C/kcal}$

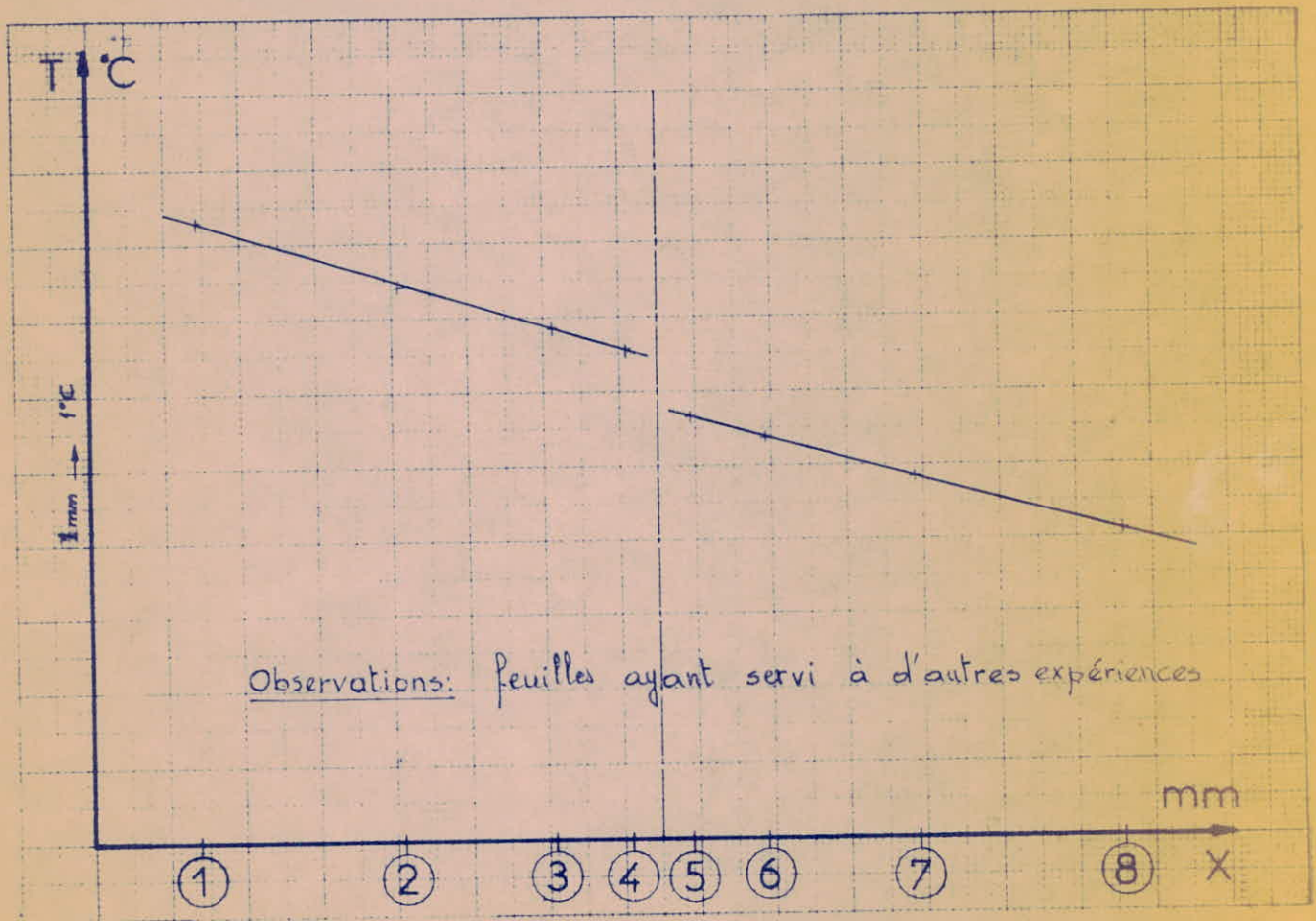
## 2 FEUILLES DE PAPIER

$$e = 25 \mu$$

$$T_a = 24,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,26 \text{ mV}$$

E (mV) Temps (min)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,27	3,81	3,50	3,38	2,91	2,76	2,50	2,13	0,48	0,77
37	4,28	3,80	3,48	3,36	2,91	2,76	2,50	2,14	0,48	0,77
98	4,26	3,80	3,48	3,36	2,89	2,75	2,50	2,12	0,47	0,77
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	83,20	74,22	67,97	65,63	56,45	53,71	48,8	41,41	9,18	15,04



$$(\Delta T_{4-5})_0 = 9,18 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\Delta T_{5-8})_0 = 15,04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi|_0 = 10,39 \cdot 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_0 = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C/kcal}$$



## Chapitre 6

### PRESENTATION DES RESULTATS

Une grande variété de clinquants de cuivre d'épaisseurs s'échelonnant entre 0 & 400 microns ont été étudiés . Mais la distribution de leurs résistances thermiques en fonction de leurs épaisseurs ( présentée à la planche 13 ) ne donne pas suffisamment d'informations aptes à en donner une allure globale . Ce manque d'informations n'est pas dû à une carence de données expérimentales puisque le nombre de points explorés est de beaucoup supérieur à ceux retenus, malgré qu'il ne soit possible d'effectuer que trois à quatre expériences par jour, en moyenne. Toujours est-il que nous avons préféré restreindre notre présentation aux expériences qui nous paraissent les meilleures, c'est-à-dire qui ont été menées avec un minimum de soin et dont le résultat ne paraît pas présenter de singularités aberrantes ; s'il y a une singularité ou un doute, l'expérience est refaite deux ou trois fois et le résultat présenté est un résultat moyen . Le tableau A résume l'essentiel de ceux-ci .

Par la suite, nous avons voulu pousser plus loin encore la précision de nos mesures . Pour ce faire, nous avons choisi un domaine restreint ( entre 150 & 200 microns ) dans l'intention de l'explorer de près pour en tirer le maximum d'informations . Il a fallu pour cela observer des critères d'expérimentation très sévères pour être à la hauteur de la précision requise :

- Dans ce contexte , nous avons refait encore une nouvelle bague de centrage avec des tolérances d'exécution très serrées . En outre, la longue pratique acquise lors des précédentes expériences nous permet d'affirmer que la pose du clinquant peut être considérée comme parfaite .

- Les clinquants eux-mêmes sont triés ~~parmi ceux~~ qui ont la meilleure planéité et qui sont fabriqués de la même manière pour être de même structure interne . Ils sont en outre

mesurés à plusieurs reprises avec toute la précision demandée et comparés entre eux pour enlever les doutes sur leur distribution . En plus, ils sont brillés et nettoyés à l'alcool avant chaque expérience pour enlever les taches sujettes à affecter leur résistance thermique .

- Les papiers à cigarette sont changés à chaque nouvelle expérience et manipulés avec soin pour ne pas les salir .

- Le régime stationnaire est longuement attendu ( 1h 30 à 2h ) pour être sûrs de l'établissement de celui-ci . La stabilité des sources est contrôlée avant chaque mesure .

- Les lectures elles-mêmes sont effectuées avec un soin très particulier . La longue pratique acquise nous permet d'apprécier sans erreurs 0,005 mV .

- Enfin, chaque expérience est répétée au moins deux fois et le résultat mentionné est un résultat moyen .

Ce n'est que par l'observation de ces règles draconniennes, que l'on est arrivé à prospecter le domaine choisi . L'erreur sur chaque résultat est très petite au vu des fiches de résultats présentées avec le présent texte .

Exemple : pour 158 microns, nous avons 3 valeurs qui sont 0,19 - 0,20 - 0,24 .

$$R = \frac{0,19 + 0,20 + 0,24}{3} = 0,21 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}/\text{Kcal} .$$

$$\text{erreur} = \frac{0,24 - 0,21}{0,21} = 0,14$$

Il est à noter que les résultats du même intervalle faits auparavant ( tableau A ) donnent des résistances plus grandes . Ceci , parce qu'on n'observait pas autant de rigueur dans notre méthodologie d'expérimentation et notamment en ce qui concerne la pose du clinquant car la bague de centrage n'était pas aussi bonne que celle exécutée en dernier lieu, ce qui fait qu'il y a risque d'introduction de résistance parasite due à des couches d'air intersticielles.

Toutefois, nous avons préféré donner les anciens résultats aussi tout en sachant, en toute franchise, qu'ils ne



sont pas représentatifs à notre échelle .

Les seuls résultats valables sont ceux du tableau B .  
Ce tableau est issu des fiches de résultats jointes ci-après  
et les valeurs qu'il comporte sont des valeurs moyennes, ar-  
rondies au chiffre des centièmes . En réalité , pour une  
même épaisseur , le résultat le plus bas est le meilleur  
puisque les autres traduisent certainement un supplément de  
résistance due à une pose de l'échantillon non correcte  
encore .

Ces résultats sont ensuite consignés dans des courbes  
pour se faire une idée sur leur distribution ( voir planches  
13 & 14 ) . Un chapitre sera consacré à leur interprétation.

T A B L E A U - (T) =

-----

e = épaisseur du clinquant de cuivre, en microns .

R = résistance thermique du clinquant, en  $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / Kcal$ ,  
à multiplier par  $10^{-3}$  .

e	R	e	R	e	R	e	R
37	0,44	85	0,55	160	0,55	255	0,82
45	0,55	87	0,60	163	0,53	263	0,98
48	0,58	90	0,70	170	0,72	271	1,21
50	0,66	100	0,70	175	0,81	275	1,18
55	0,58	108	0,36	180	0,92	294	1,24
60	0,48	113	0,58	190	0,81	304	1,33
61	0,44	123	0,67	200	1,00	310	1,31
63	0,43	130	0,78	210	0,90	320	1,45
70	0,68	140	0,60	228	0,84	337	1,38
72	0,58	150	0,81	235	1,20	350	1,45
73	0,40	152	0,74	239	0,80	370	1,50
76	0,48	155	0,74	242	1,21	390	1,60

N.B. - Ces résultats ne sont pas très fiables, car ils ont été obtenus avec l'ancienne bague de centrage .



**T** A B L E A U - **B** -

e = épaisseur du clinquant de cuivre, en microns .  
R = résistance thermique du clinquant, en m<sup>2</sup>.h.°C/Kcal,  
à multiplier par 10<sup>-3</sup> .

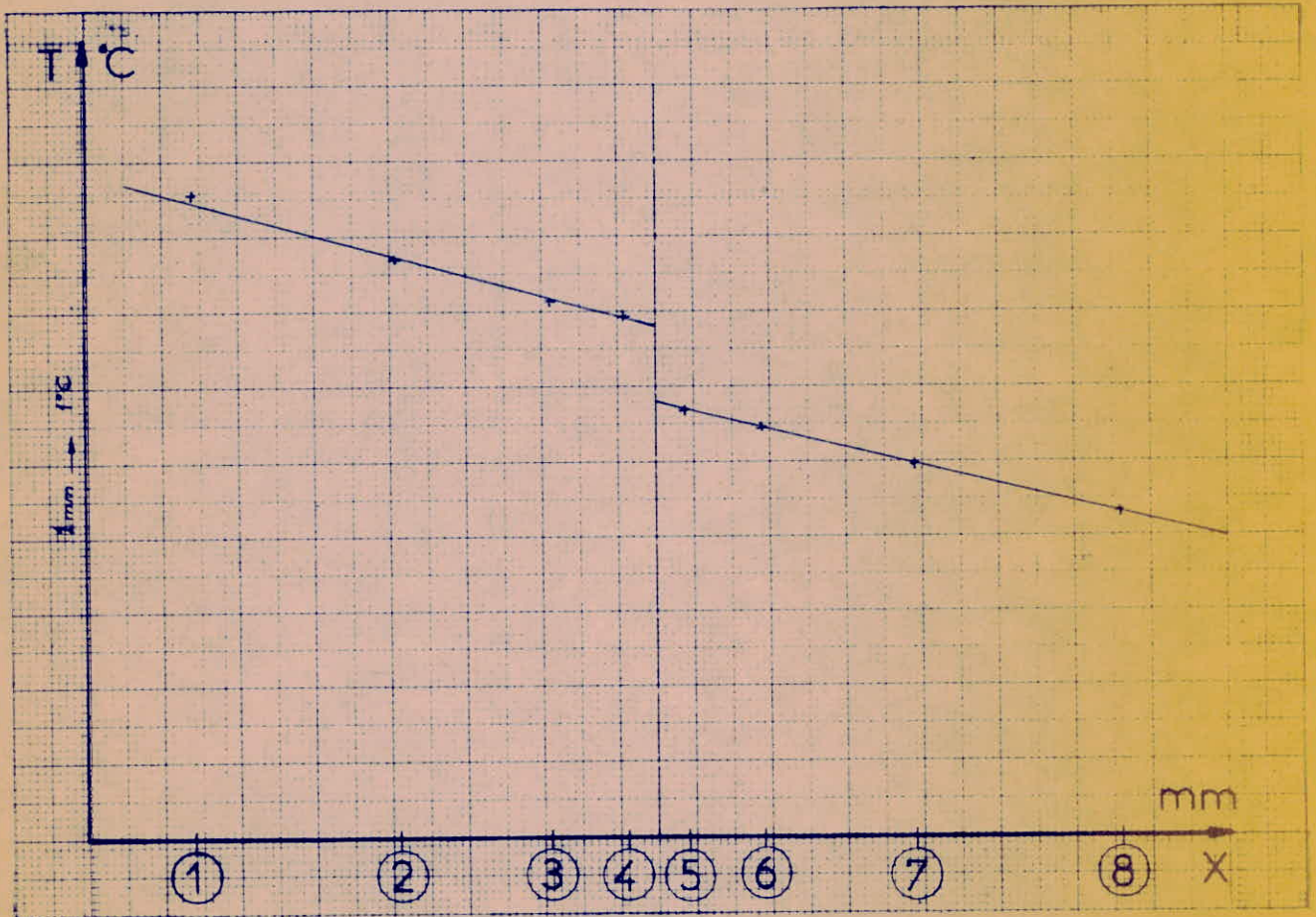
e	R
147	0,27
149	0,28
150	0,29
158	0,21
162	0,32
163	0,29
167	0,34
168	0,28
170	0,18
173	0,22
174	0,32
178	0,28
180	0,32
185	0,32
187	0,29
200	0,25
205	0,29

$$e = 147 \mu$$

T<sub>a</sub> = 28 °C

E<sub>c</sub> = 143 mV

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	ΔE 4-5 mesure directe	ΔE 5-8 mesure directe
0	4,41	3,98	3,69	3,59	2,96	2,83	2,55	2,30	0,635	0,66
45	4,40	3,98	3,70	3,62	2,99	2,86	2,57	2,31	0,635	0,69
70	4,38	3,94	3,65	3,56	2,91	2,78	2,54	2,22	0,635	0,70
°C (régime stationnaire)	85,55	76,95	71,29	69,53	56,84	54,30	49,66	43,36	12,40	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,40 \text{ °C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ °C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

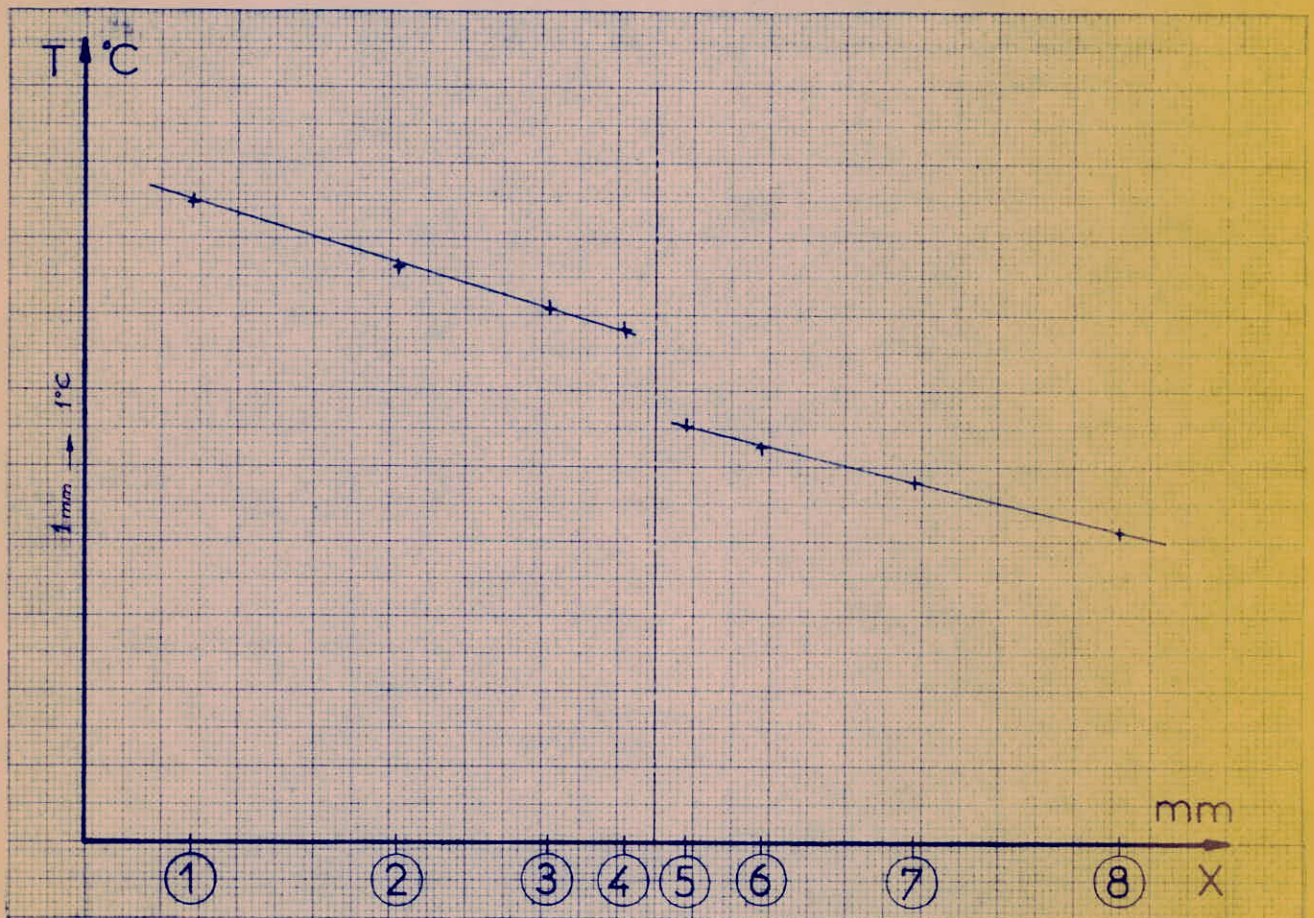


$$e = 149 \mu$$

$$T_a = 26,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 13,6 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,35	3,91	3,61	3,49	2,84	2,71	2,46	2,13	0,65	0,71
30	4,34	3,92	3,62	3,50	2,85	2,72	2,45	2,12	0,65	0,71
75	4,34	3,90	3,60	3,49	2,83	2,70	2,46	2,12	0,65	0,71
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	84,76	76,19	70,71	68,16	55,27	52,73	48,04	41,41	12,69	13,87



$$\Delta T_{4-5} = 12,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,587 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

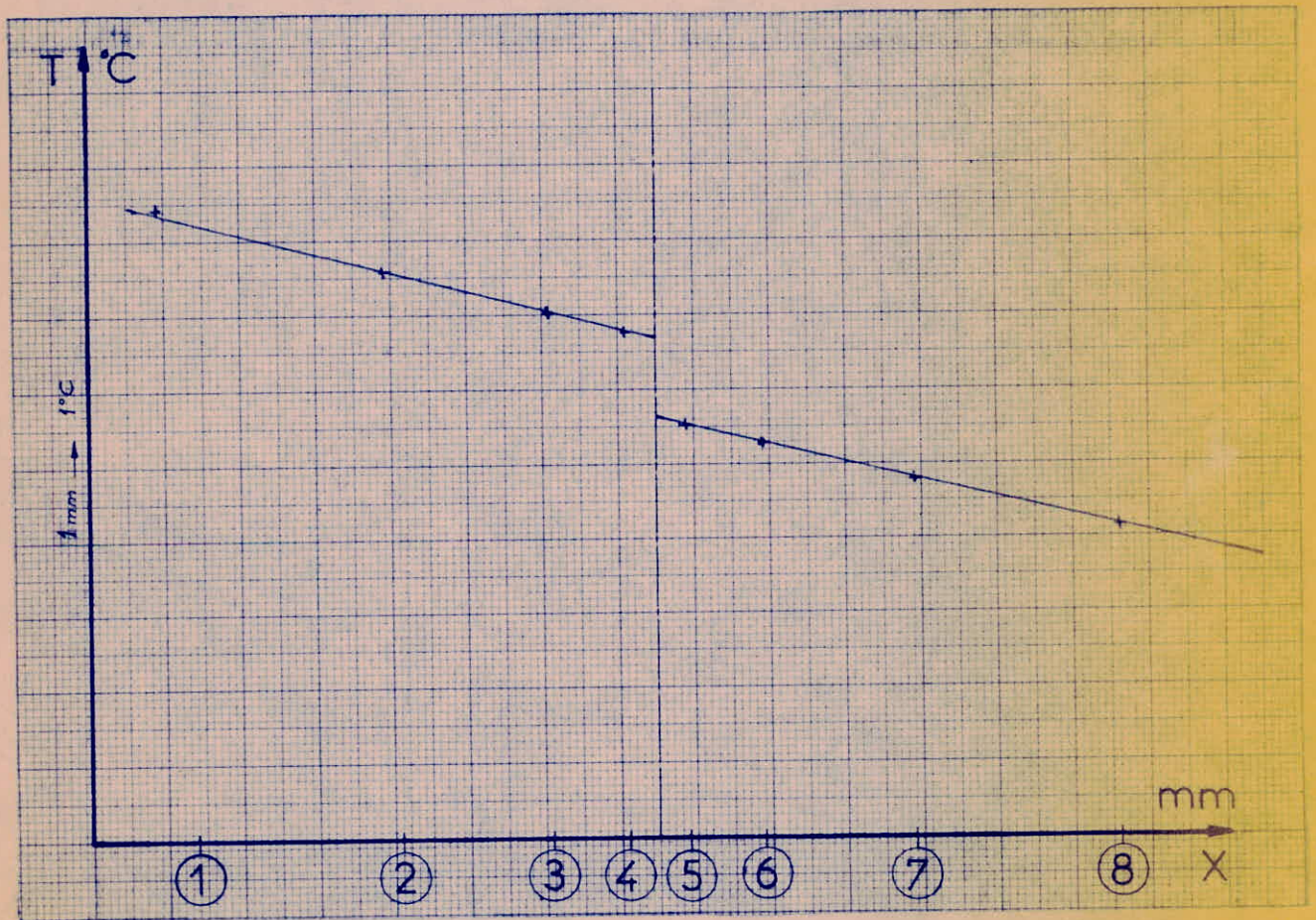


$$e = 150 \mu$$

$$T_a = 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,31 \text{ mV}$$

Temps (min) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,31	3,88	3,58	3,46	2,82	2,70	2,44	2,11	0,64	0,70
60	4,31	3,87	3,57	3,47	2,82	2,71	2,45	2,12	0,63	0,70
95	4,31	3,87	3,58	3,47	2,82	2,70	2,45	2,12	0,63	0,70
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	84,18	75,59	69,92	67,77	55,08	52,73	47,85	41,41	12,40	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

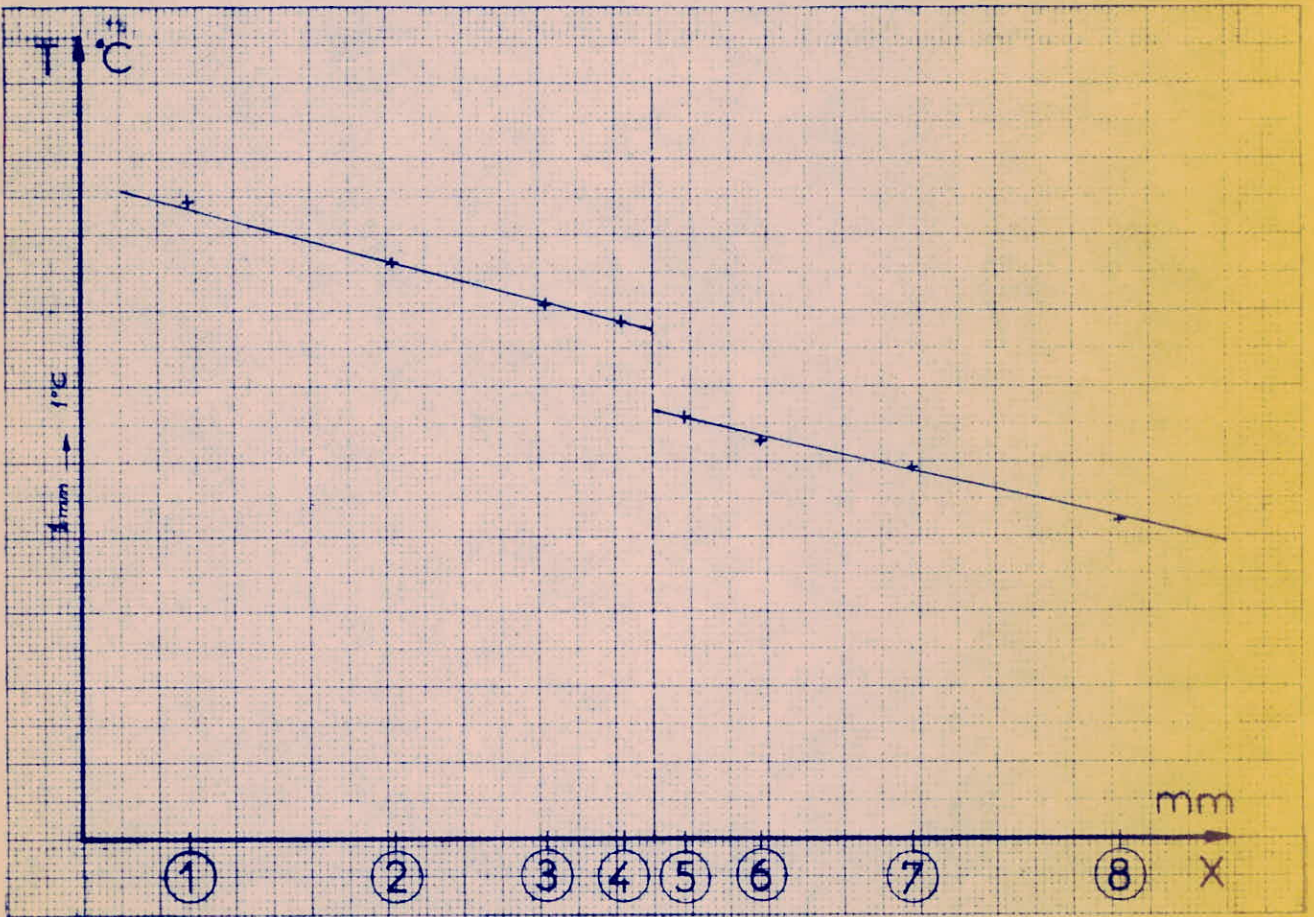


$$e = 150 \mu$$

$$T_a = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,41 \text{ mV}$$

Temps (min) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,38	3,95	3,66	3,56	2,90	2,77	2,53	2,19	0,65	0,69
30	4,35	3,93	3,64	3,53	2,07	2,75	2,52	2,17	0,65	0,69
65	4,33	3,90	3,62	3,51	2,86	2,74	2,51	2,16	0,65	0,69
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,57	76,17	70,70	68,55	55,86	53,52	49,02	42,18	12,70	13,48



$$\Delta T_{4-5} = 12,70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,313 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

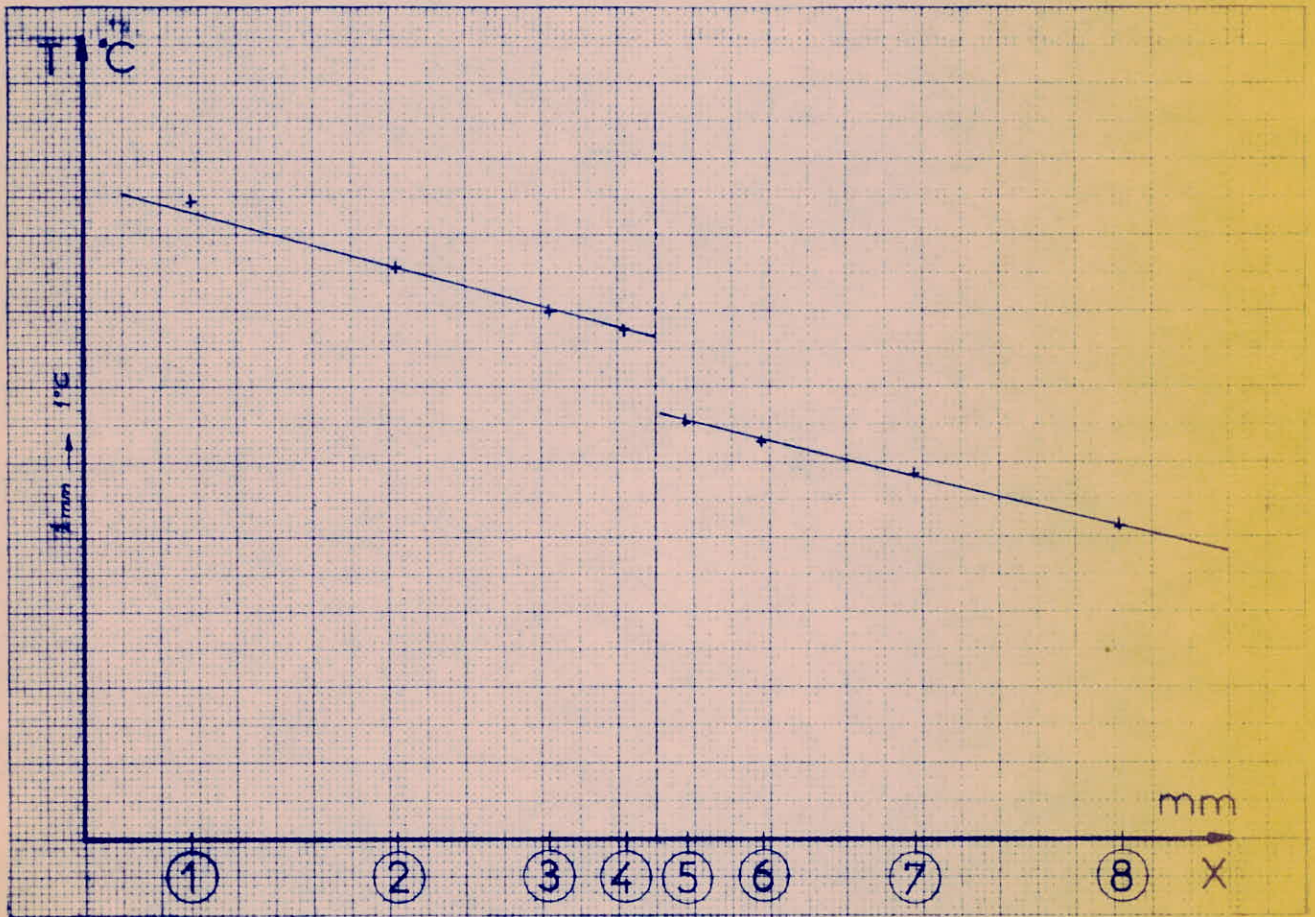


$$e = 158 \mu$$

$$T_a = 24,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,25 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,34	3,88	3,58	3,46	2,82	2,69	2,47	2,09	0,63	0,73
15	4,34	3,89	3,58	3,49	2,84	2,71	2,48	2,11	0,61	0,71
40	4,33	3,88	3,58	3,46	2,84	2,71	2,48	2,12	0,61	0,72
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,57	75,78	69,92	67,77	55,66	52,93	48,44	41,41	11,91	14,06



$$\Delta T_{4-5} = 11,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,718 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

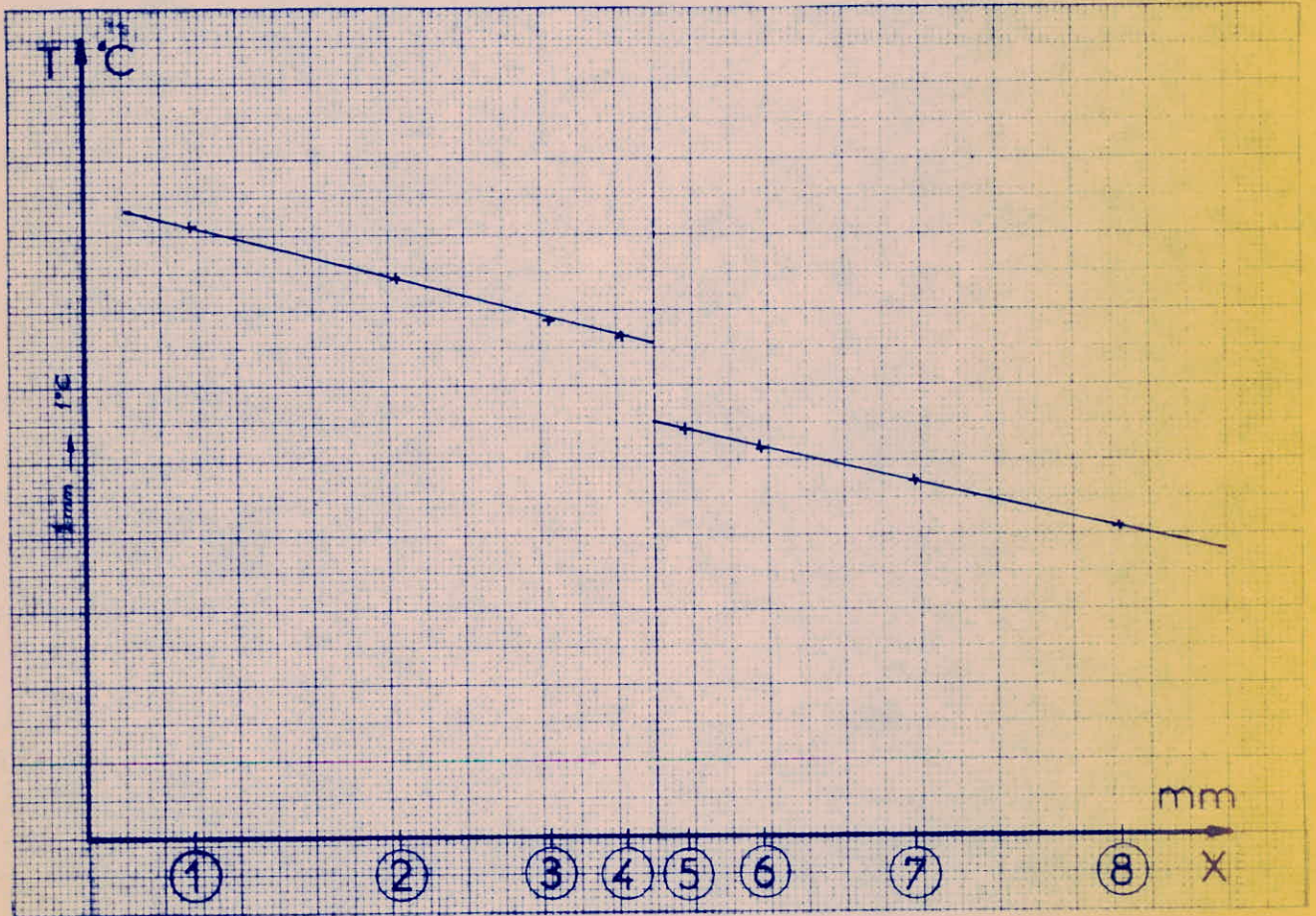


$$e = 158 \mu$$

$$T_a = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,33 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,14	3,81	3,52	3,40	2,76	2,64	2,42	2,06	0,61	0,67
25	4,16	3,81	3,52	3,42	2,77	2,65	2,43	2,07	0,60	0,68
75	4,16	3,82	3,52	3,42	2,77	2,65	2,43	2,07	0,60	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	81,25	74,61	68,75	66,80	54,10	51,76	47,46	40,43	11,72	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 11,72 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

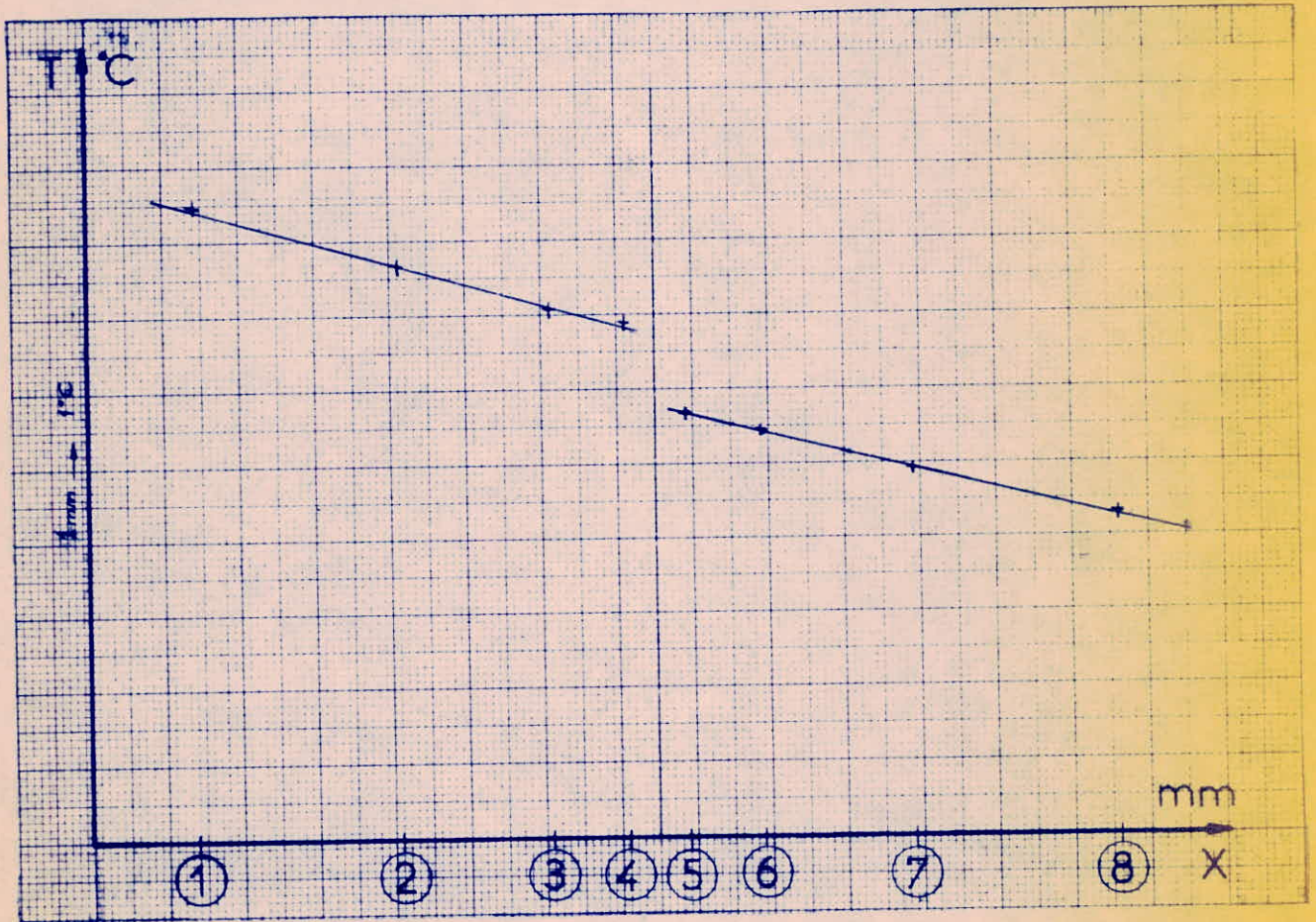


$$e = 158 \mu$$

$$T_a = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 136 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,36	3,93	3,63	3,53	2,91	2,78	2,53	2,20	0,62	0,71
25	4,36	3,93	3,63	3,53	2,91	2,78	2,53	2,20	0,61	0,71
75	4,35	3,93	3,63	3,53	2,91	2,79	2,53	2,21	0,62	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,96	76,76	70,90	68,95	56,84	54,49	49,41	43,16	12,10	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

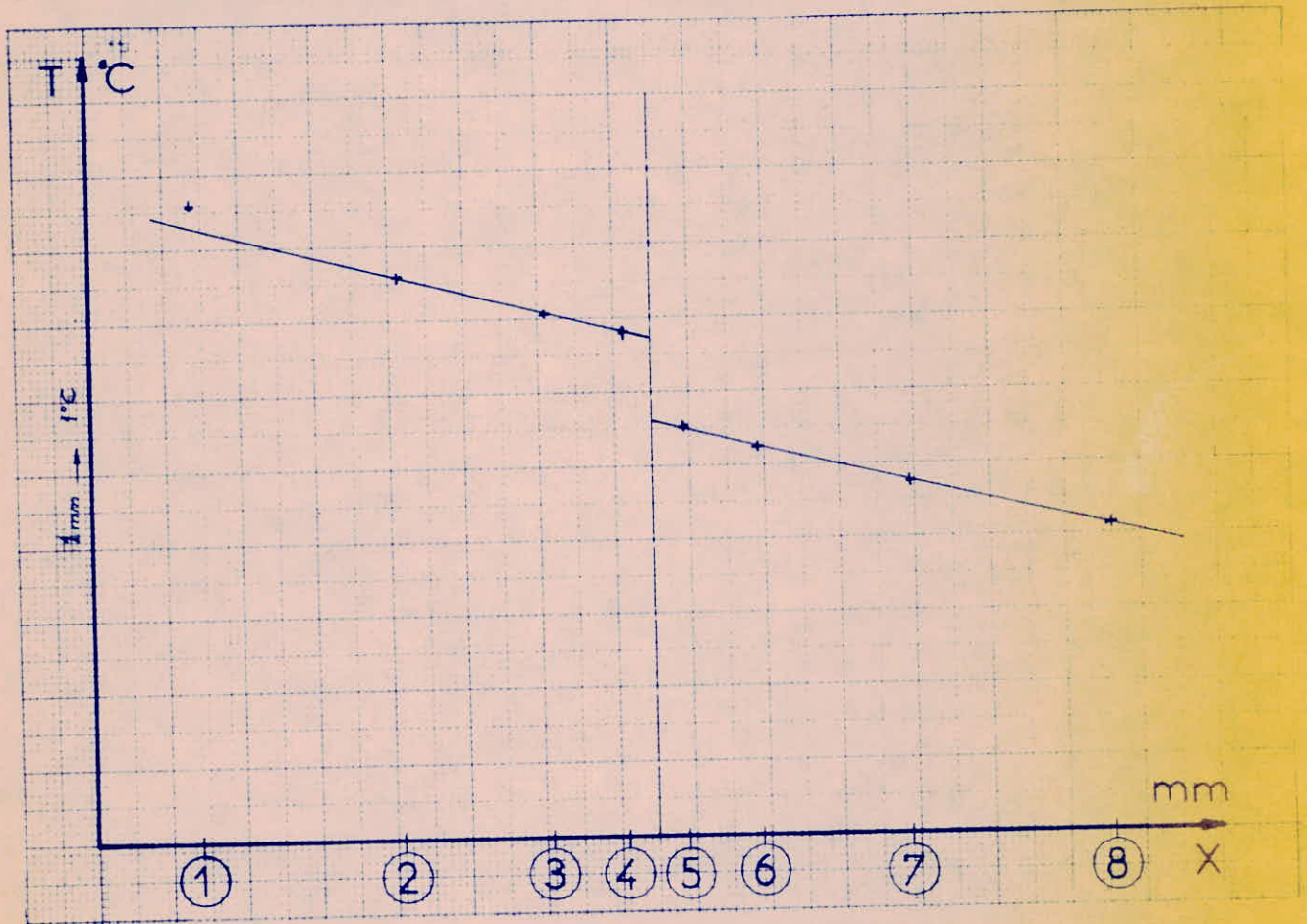


$$e = 162 \mu$$

$$T_a = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,38 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,36	3,93	3,62	3,51	2,83	2,71	2,44	2,13	0,67	0,70
25	4,36	3,92	3,62	3,50	2,83	2,71	2,44	2,13	0,66	0,70
105	4,33	3,89	3,60	3,49	2,83	2,70	2,45	2,12	0,66	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	85,57	75,98	70,31	68,16	55,27	52,73	47,85	41,41	12,89	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

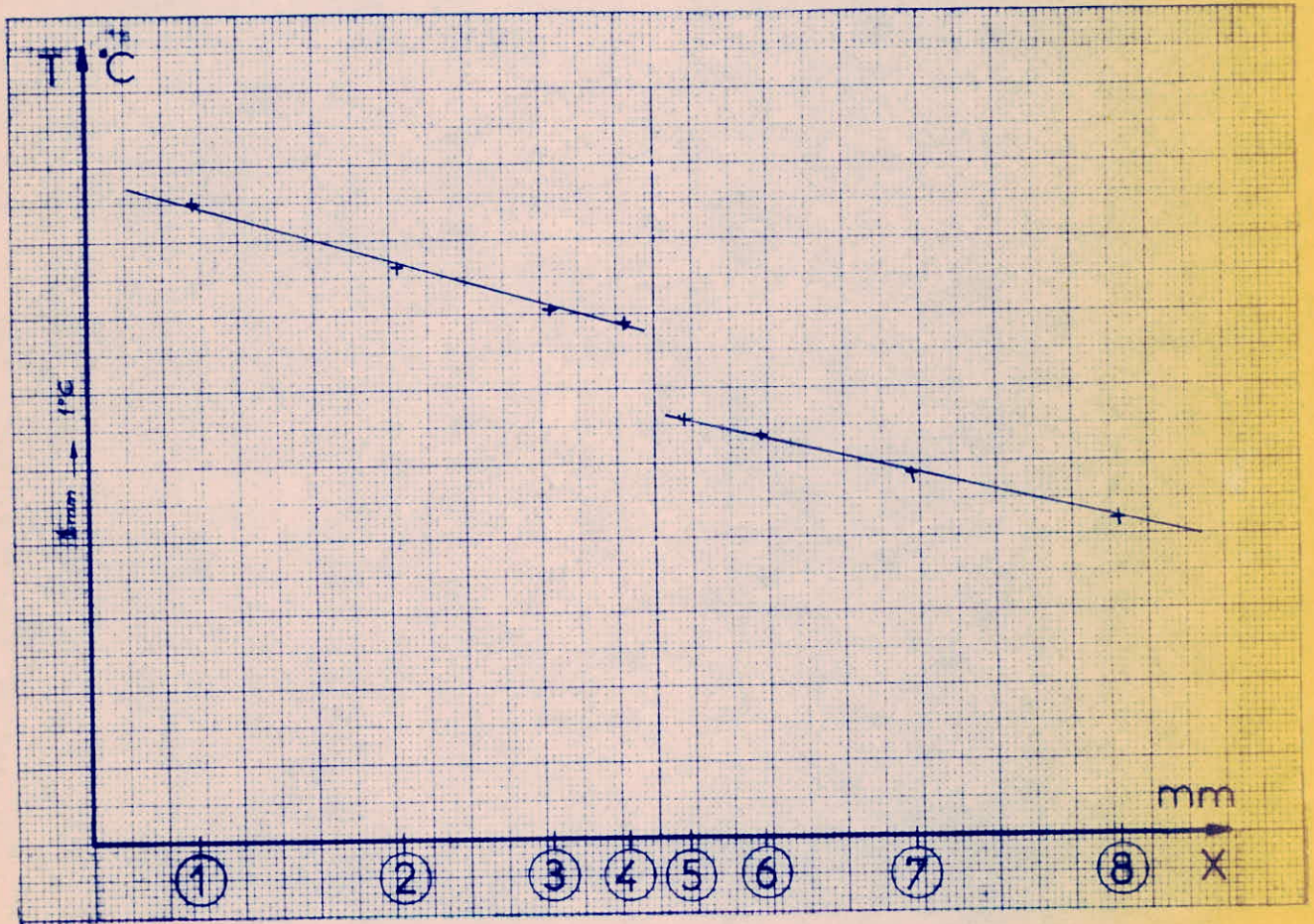


$$e = 163 \mu$$

Ta = 28 °C

Ec = 1,43 mV

E (mV) / Temps (mn)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,46	3,91	3,61	3,51	2,87	2,74	2,47	2,15	0,64	0,70
35	4,41	3,92	3,62	3,51	2,87	2,74	2,47	2,16	0,64	0,70
97	4,36	3,92	3,62	3,52	2,88	2,75	2,49	2,16	0,64	0,70
°C (régime stationnaire)	85,16	76,56	70,70	68,15	56,25	53,71	48,63	42,19	12,50	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,50 \text{ °C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ °C}$$

$$|\varphi| = 9,459 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$$

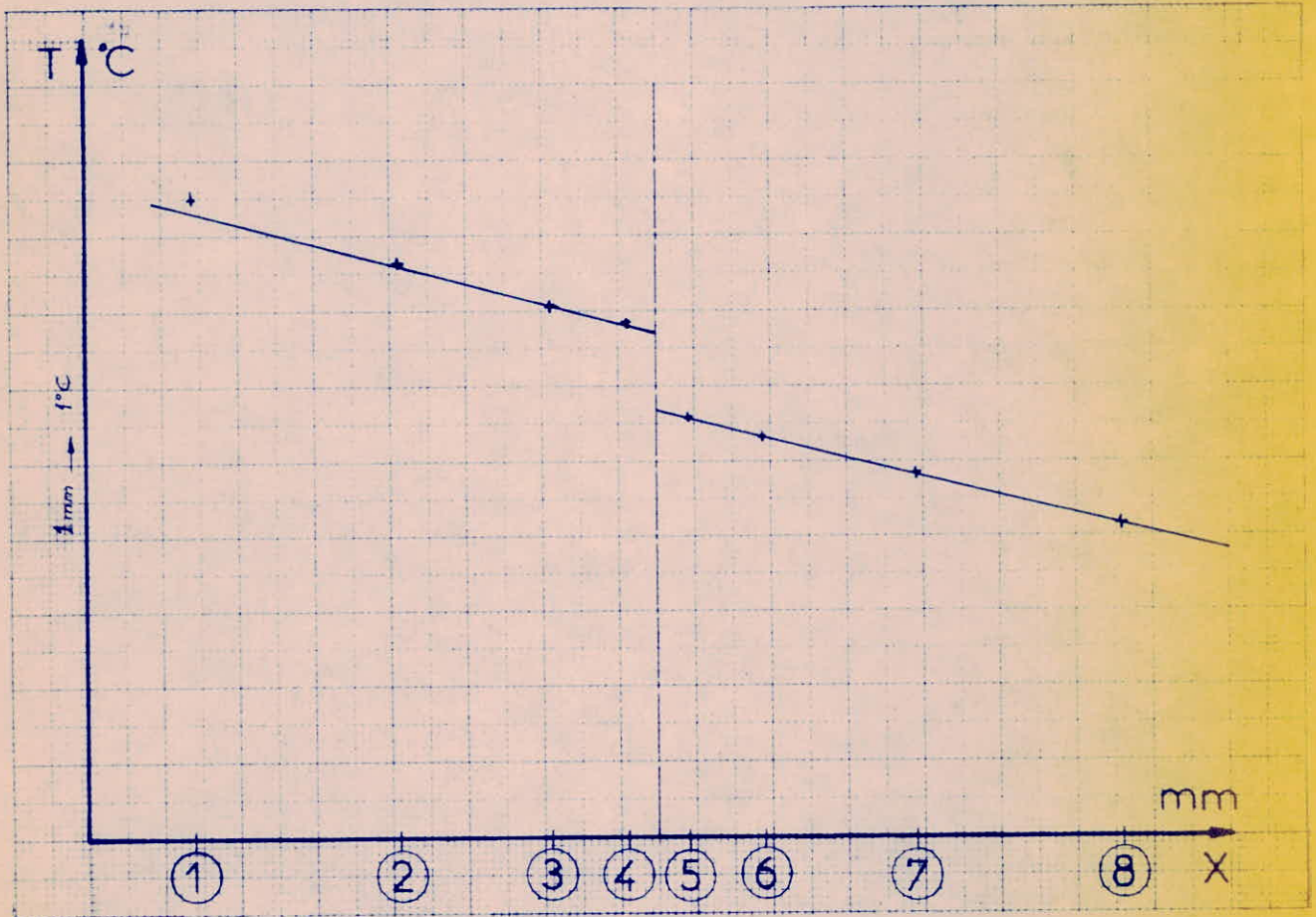


$$e = 163 \mu$$

$$T_a = 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,30 \text{ mV}$$

Temps (min) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,34	3,90	3,61	3,50	2,84	2,72	2,46	2,13	0,66	0,70
30	4,35	3,91	3,61	3,51	2,845	2,72	2,46	2,13	0,65	0,705
55	4,35	3,91	3,61	3,51	2,845	2,72	2,46	2,13	0,65	0,705
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,96	76,37	70,51	68,55	55,57	53,13	48,04	41,60	12,69	13,77



$$\Delta T_{4-5} = 12,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,518 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

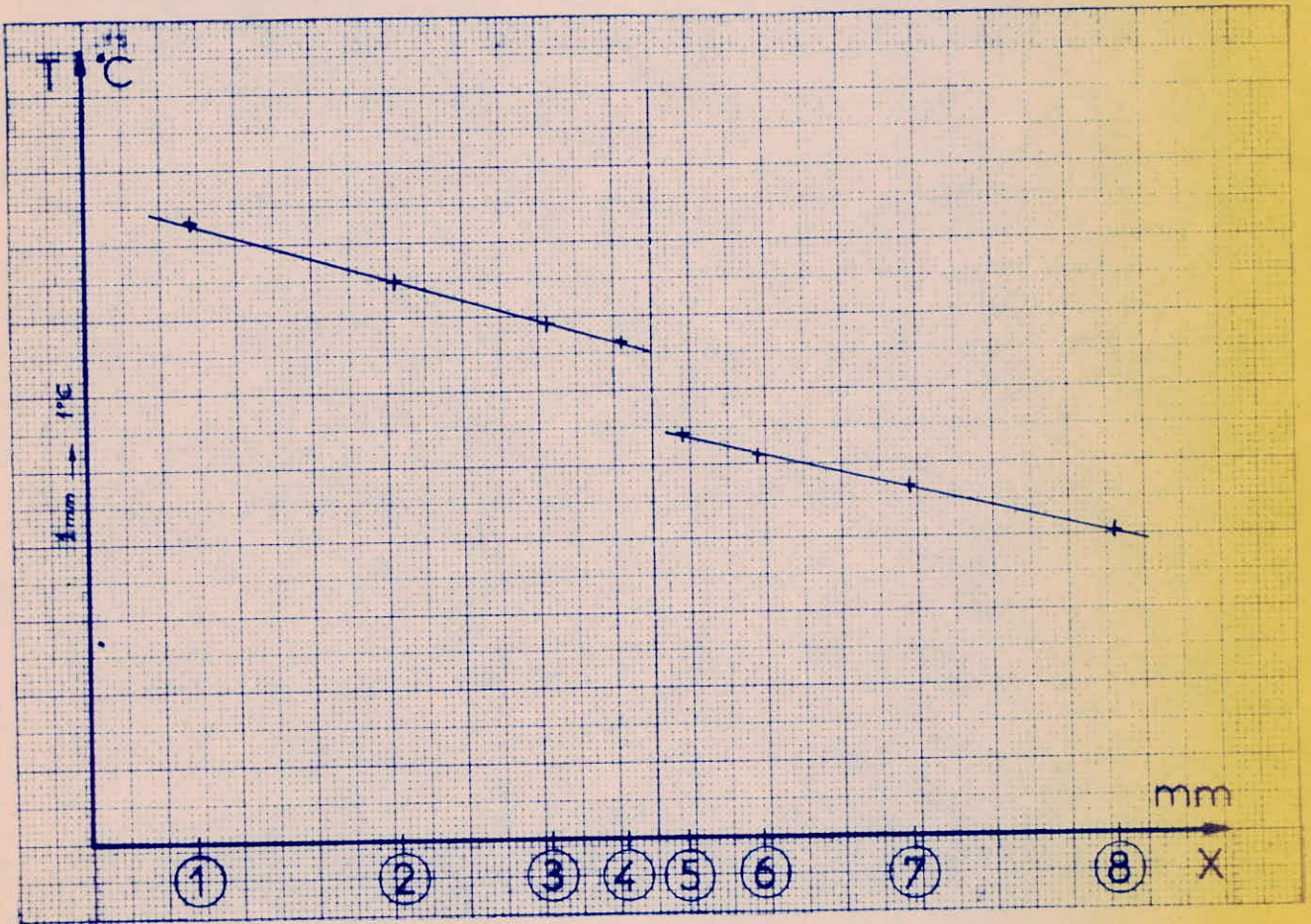


$$e = 163 \mu$$

Ta = 25 °C

Ec = 1,28 mV

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,32	3,88	3,59	3,48	2,78	2,66	2,42	2,08	0,68	0,70
30	4,30	3,87	3,57	3,47	2,78	2,66	2,41	2,07	0,68	0,70
90	4,27	3,83	3,53	3,43	2,75	2,63	2,40	2,07	0,68	0,70
°C (régime stationnaire)	83,20	74,80	68,95	66,99	53,71	51,37	46,87	40,42	13,28	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 13,28 \text{ °C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ °C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$$

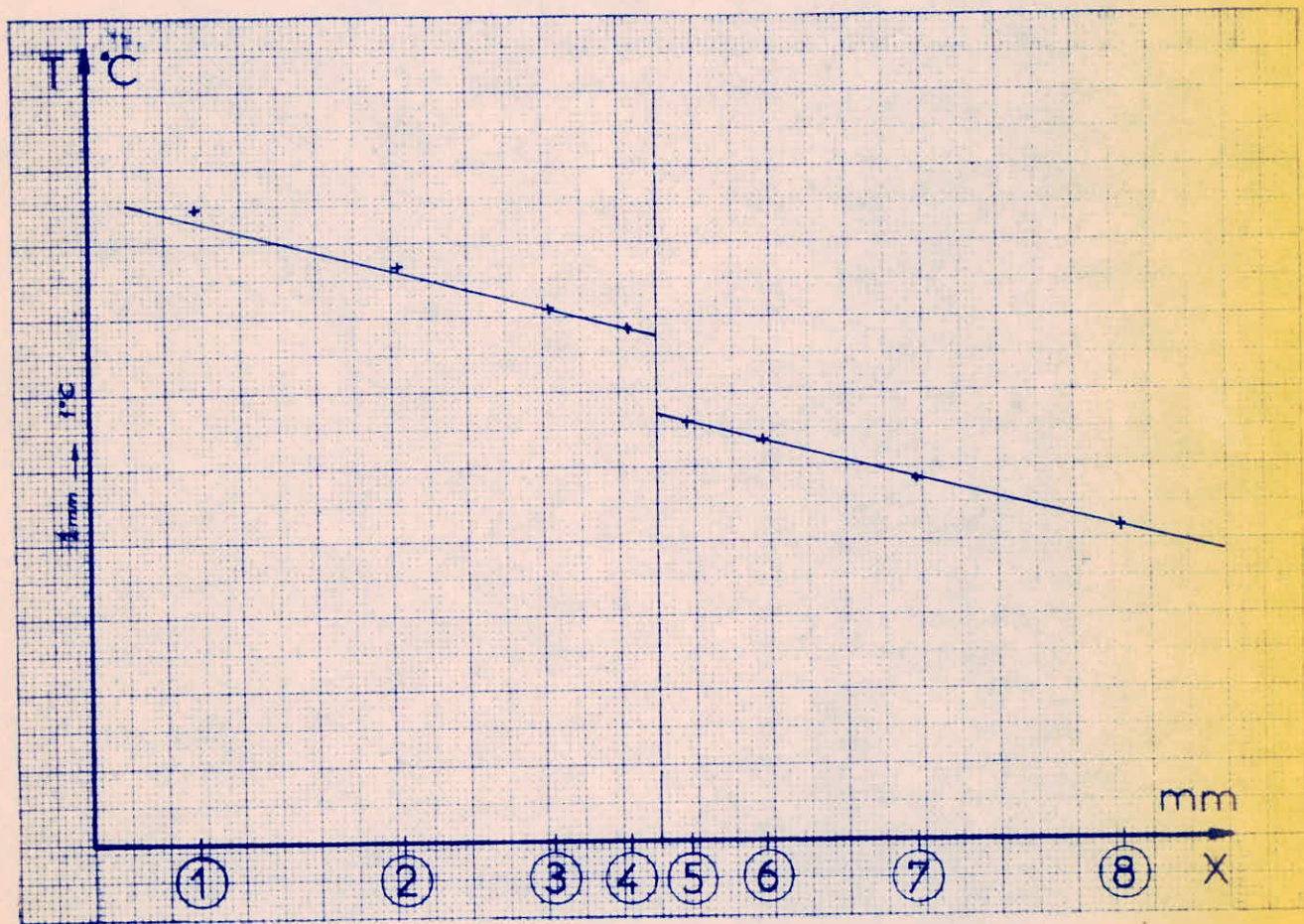


$$e = 167 \mu$$

$$T_a = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,35 \text{ mV}$$

Temp (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,39	3,95	3,64	3,54	2,87	2,74	2,47	2,16	0,66	0,71
25	4,37	3,95	3,65	3,54	2,87	2,75	2,48	2,16	0,66	0,71
75	4,33	3,93	3,64	3,52	2,85	2,74	2,46	2,15	0,67	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,57	76,76	71,09	68,75	55,66	53,52	48,04	41,99	13,08	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 13,08 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

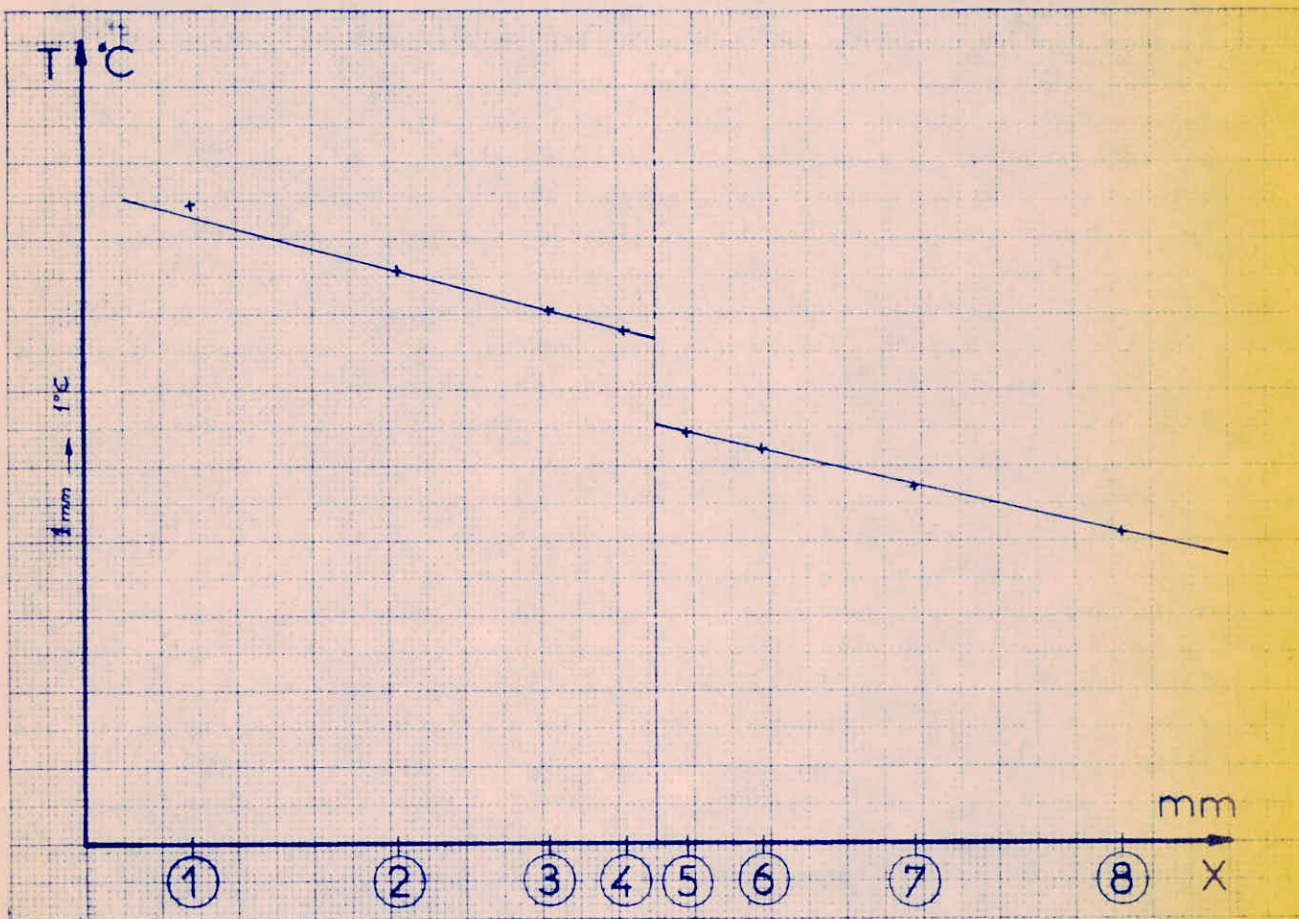


$$e = 168 \mu$$

$$T_a = 25,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,30 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,33	3,89	3,60	3,45	2,80	2,68	2,40	2,10	0,65	0,70
25	4,32	3,89	3,59	3,47	2,81	2,68	2,41	2,105	0,65	0,71
70	4,32	3,89	3,59	3,47	2,81	2,68	2,41	2,105	0,65	0,71
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,37	75,98	70,12	67,77	54,88	52,34	47,07	41,11	12,69	13,87



$$\Delta T_{4-5} = 12,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,587 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

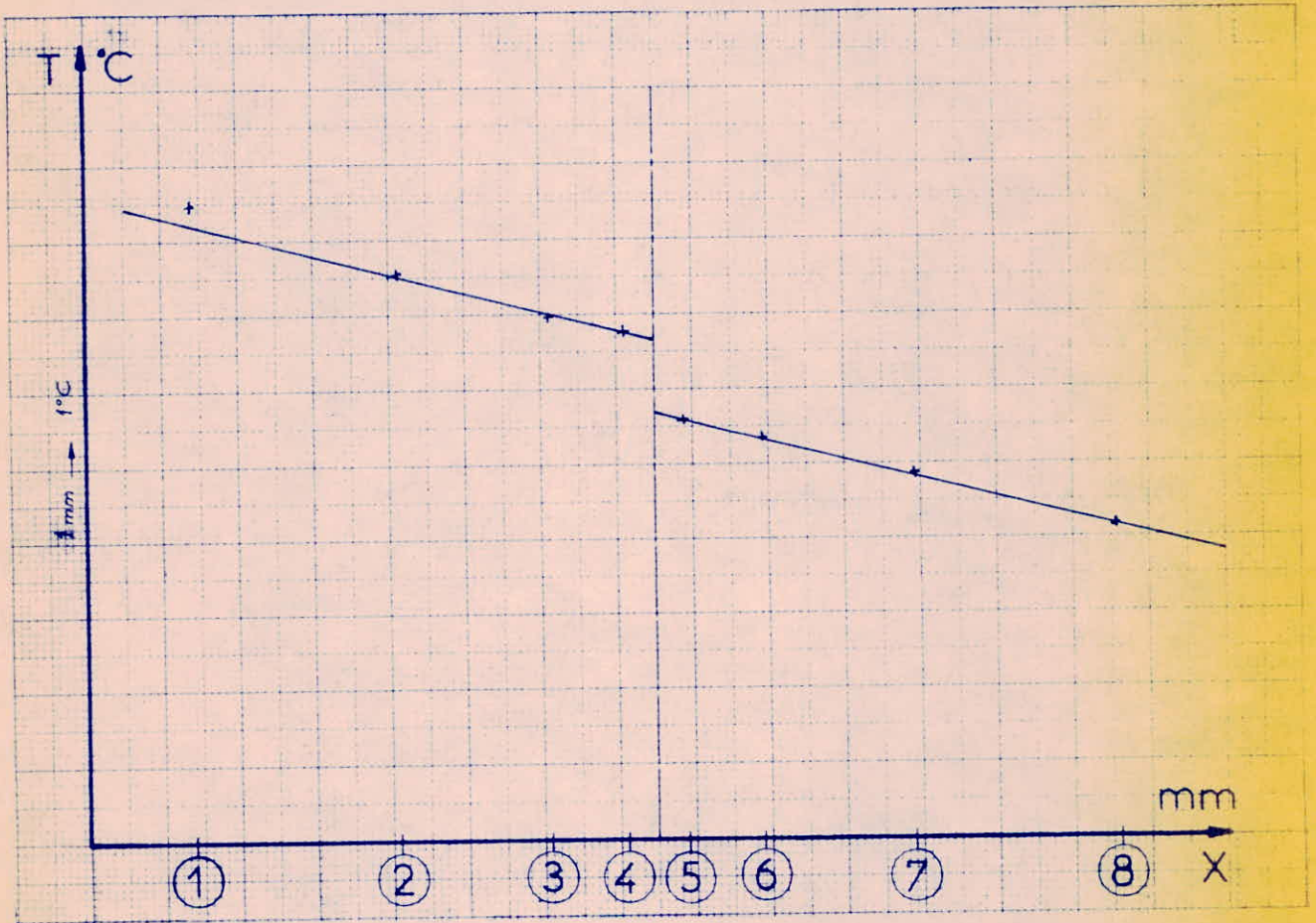


$$e = 170 \mu$$

$$T_a = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,29 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,31	3,68	3,57	3,46	2,85	2,73	2,49	2,13	0,61	0,73
35	4,32	3,68	3,57	3,46	2,85	2,73	2,49	2,13	0,61	0,73
115	4,32	3,87	3,57	3,46	2,85	2,72	2,48	2,12	0,61	0,73
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,38	75,59	69,73	67,58	55,66	53,13	48,44	41,41	11,91	14,26



$$\Delta T_{4-5} = 11,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,857 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,208 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

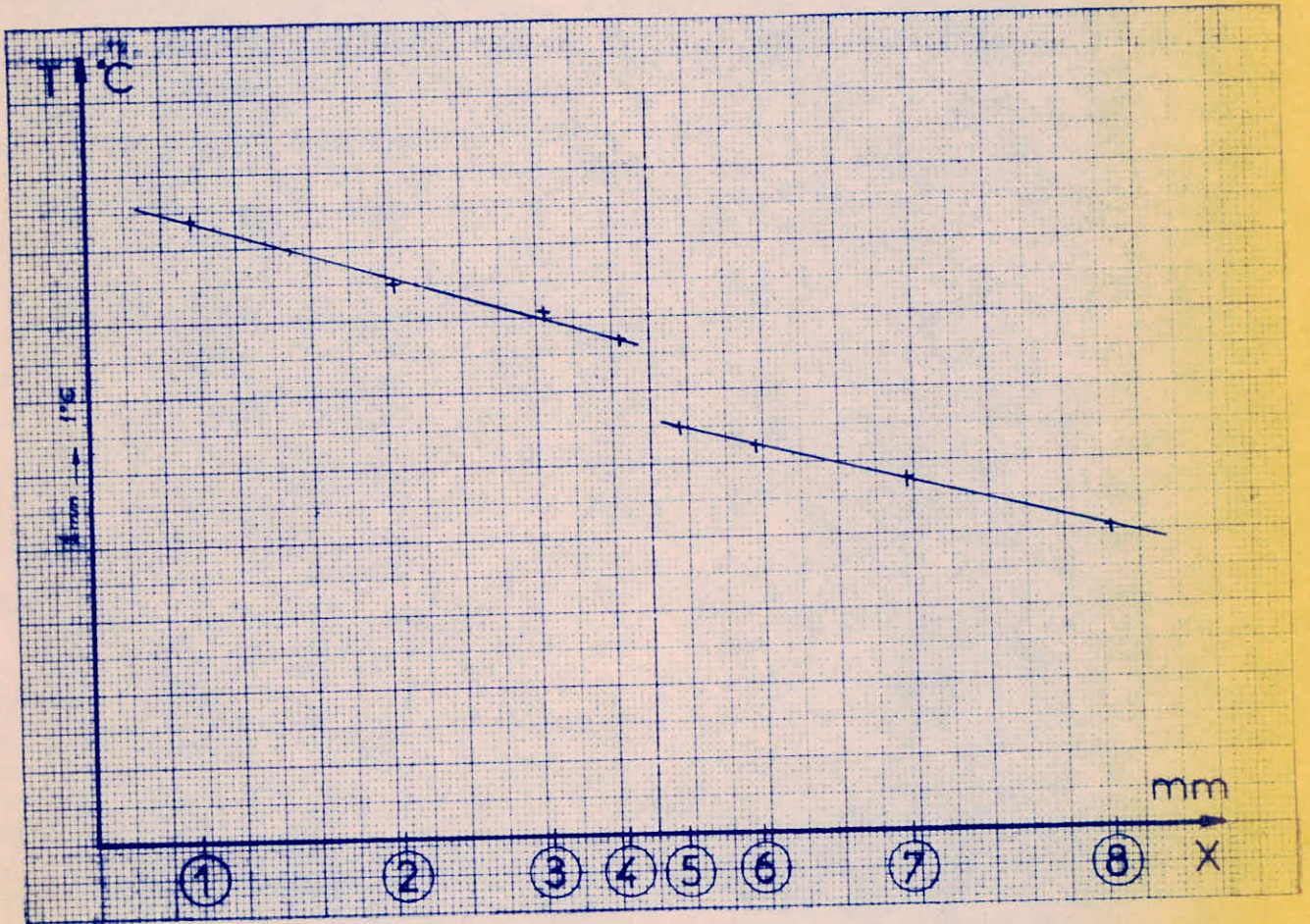


$$e = 170 \mu$$

Ta = 25 °C

Ec = 1,28 mV

E(mV) Temps (min)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	ΔE 4-5 mesure directe	ΔE 5-8 mesure directe
0	4,28	3,86	3,66	3,45	2,82	2,69	2,45	2,11	0,61	0,71
30	4,28	3,85	3,65	3,43	2,82	2,69	2,45	2,10	0,61	0,72
74	4,29	3,84	3,64	3,43	2,82	2,68	2,44	2,09	0,61	0,72
°C (régime stationnaire)	83,79	75,00	71,09	66,99	55,08	52,34	47,70	40,82	11,91	14,06



$$\Delta T_{4-5} = 11,91 \text{ °C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,06 \text{ °C}$$

$$|\varphi| = 9,718 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$$

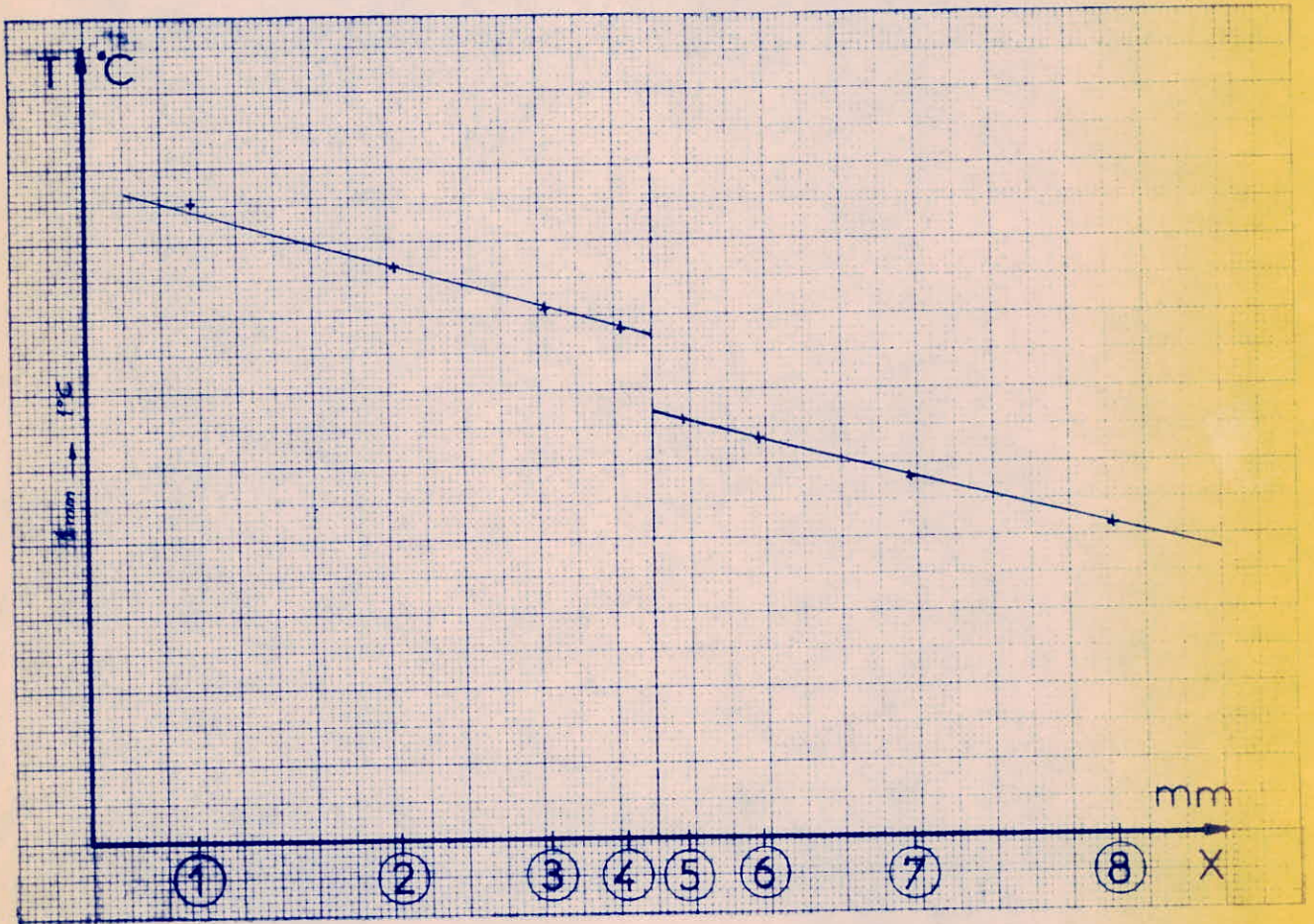


$$e = 170 \mu$$

$$T_a = 26,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,36 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,39	3,95	2,65	3,53	2,90	2,78	2,47	2,17	0,63	0,73
30	4,37	3,95	2,64	3,53	2,90	2,78	2,44	2,18	0,63	0,72
110	4,36	3,91	3,60	3,49	2,87	2,74	2,44	2,14	0,62	0,73
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	85,16	76,37	70,31	68,16	56,05	53,52	47,66	41,80	12,11	14,26



$$\Delta T_{4-5} = 12,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,857 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

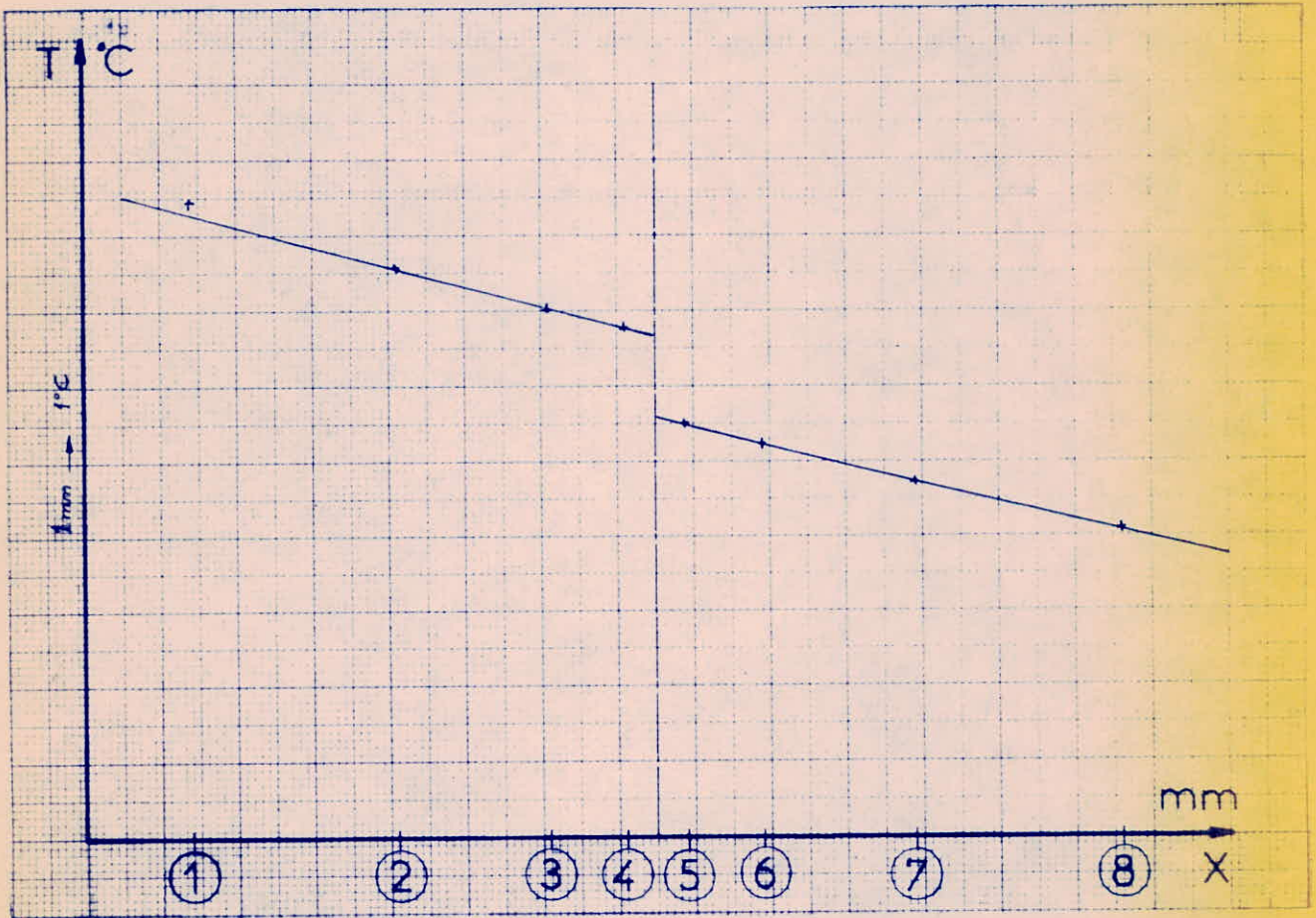


$$e = 173 \mu$$

$$T_a = 25,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,30 \text{ mV}$$

Temp (min) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,30	3,89	3,61	3,46	2,80	2,69	2,40	2,09	0,66	0,70
30	4,30	3,89	3,60	3,45	2,80	2,68	2,40	2,10	0,65	0,71
75	4,31	3,89	3,59	3,47	2,81	2,68	2,41	2,10	0,65	0,71
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,18	75,98	70,12	67,77	54,88	52,34	47,07	41,02	12,69	13,87



$$\Delta T_{4-5} = 12,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,587 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

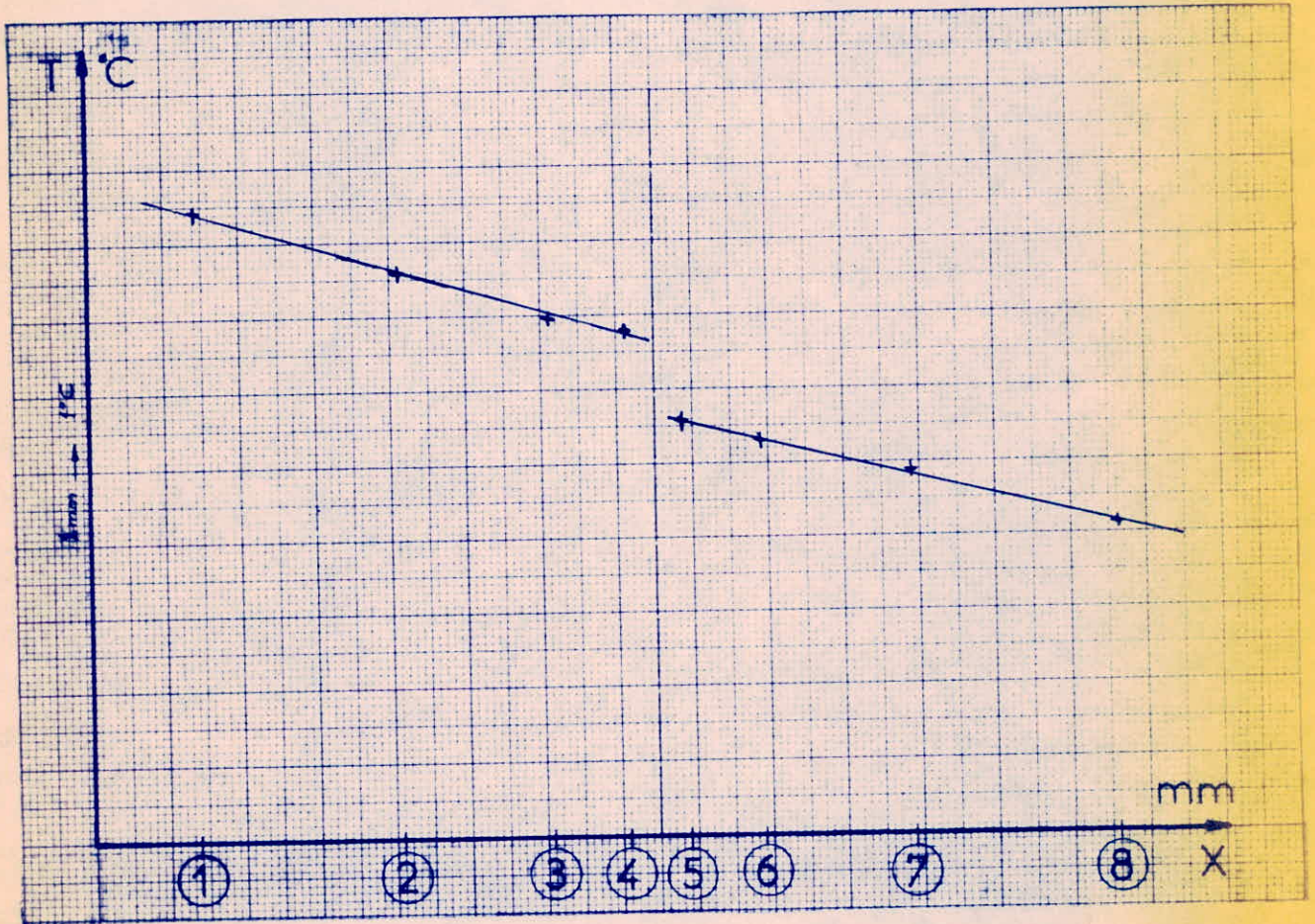


$$e = 173 \mu$$

$$T_a = 25,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,29 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,32	3,88	3,58	3,47	2,85	2,73	2,51	2,13	0,63	0,72
50	4,32	3,88	3,57	3,46	2,85	2,73	2,50	2,13	0,61	0,73
87	4,32	3,87	3,57	3,46	2,85	2,72	2,50	2,12	0,61	0,73
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	84,38	75,59	69,73	67,58	55,66	53,13	48,83	41,41	11,91	14,26



$$\Delta T_{4-5} = 11,91 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,26 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,857 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

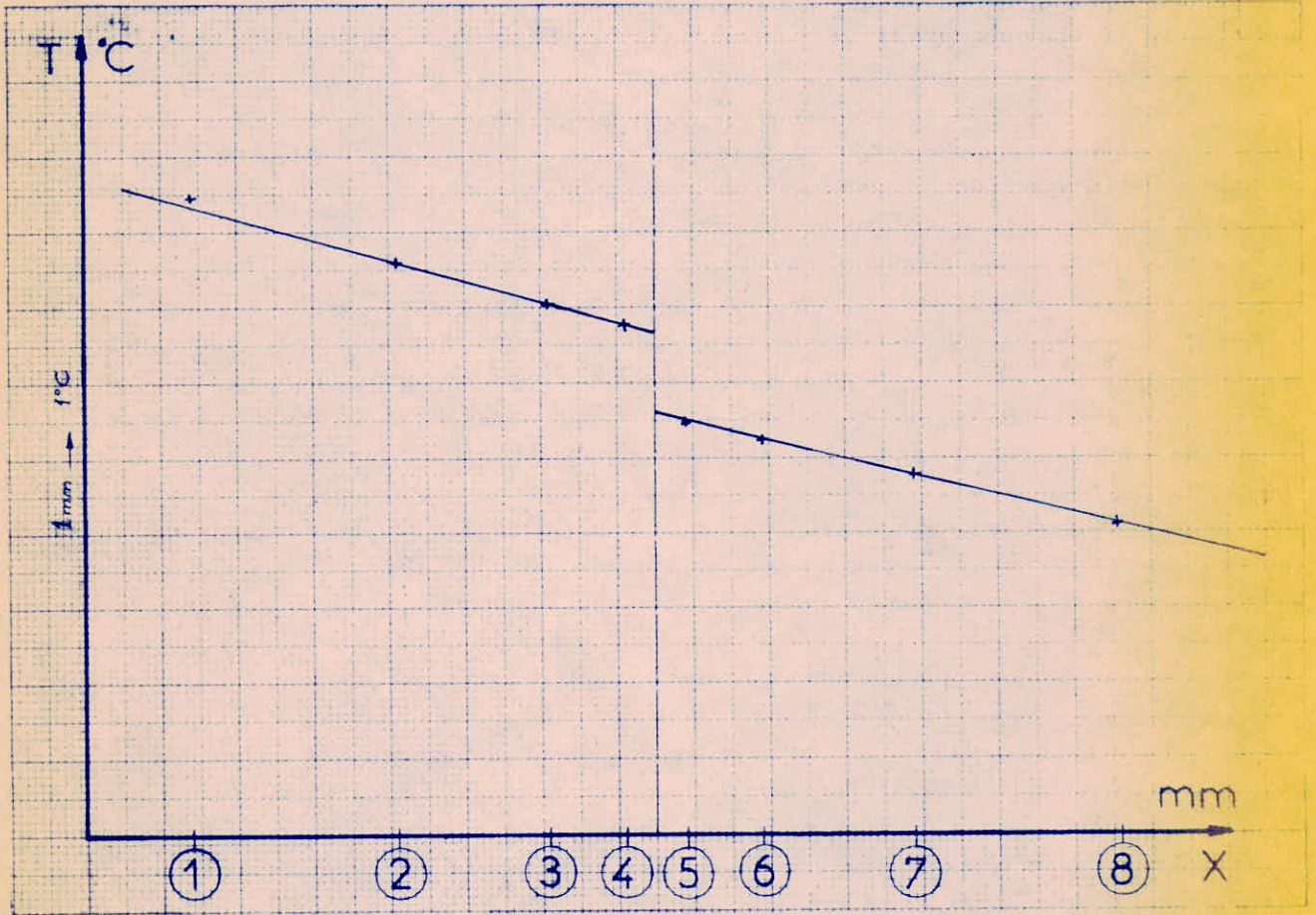


$$e = 174 \mu$$

$$T_a = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,38 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,31	3,875	3,59	3,48	2,80	2,68	2,46	2,00	0,67	0,70
35	4,31	3,88	3,585	3,48	2,81	2,68	2,46	2,11	0,66	0,70
95	4,31	3,88	3,585	3,48	2,81	2,68	2,46	2,11	0,66	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	84,18	75,78	70,02	67,97	54,88	52,34	48,04	41,21	12,89	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

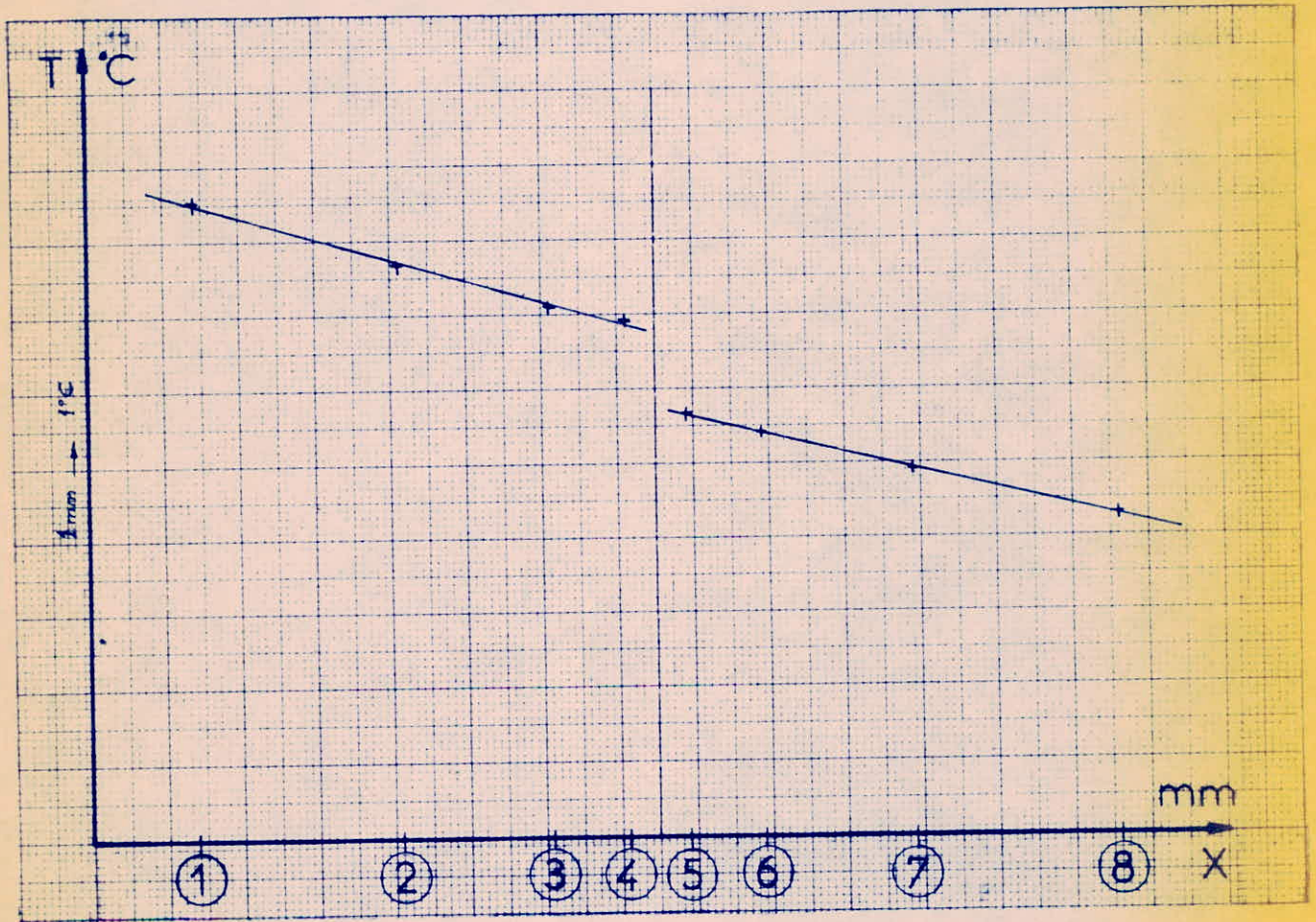


$$e = 178 \mu$$

T<sub>a</sub> = 28 °C

E<sub>c</sub> = 1,43 mV

E (mV) Temps (min)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	ΔE 4-5 mesure directe	ΔE 5-8 mesure directe
0	4,43	3,98	3,67	3,57	2,89	2,78	2,52	2,20	0,63	0,70
35	4,35	3,92	3,63	3,52	2,89	2,77	2,52	2,21	0,63	0,68
90	4,37	3,94	3,65	3,55	2,91	2,78	2,53	2,21	0,64	0,70
°C (régime stationnaire)	85,35	76,95	71,29	69,34	56,84	54,30	49,41	43,16	12,50	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,50 \text{ °C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ °C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C/kcal}$$

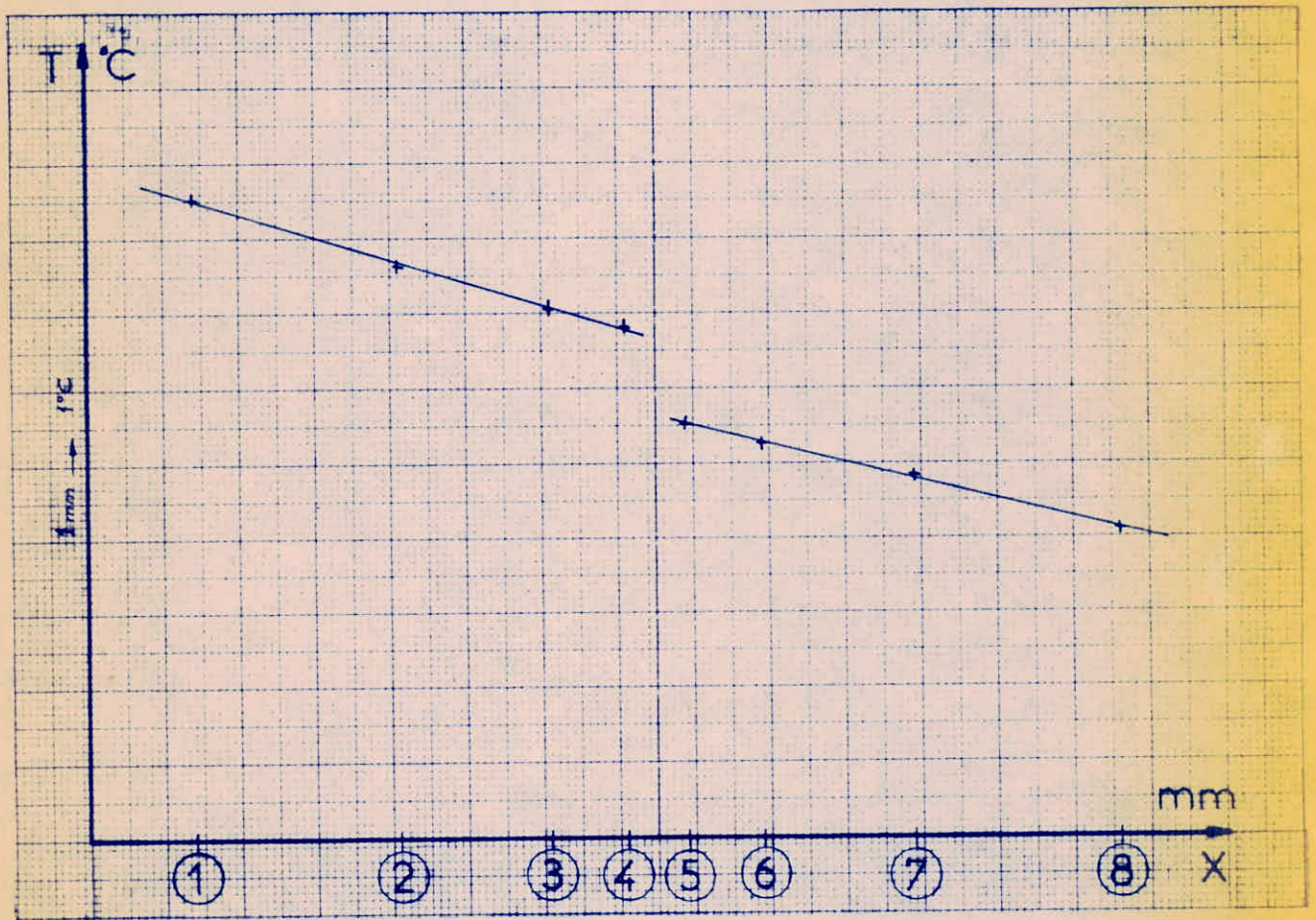


$$e = 180 \mu$$

$$T_a = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,33 \text{ mV}$$

E (mV) Temps (mn)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,35	3,90	3,60	3,50	2,83	2,70	2,48	2,12	0,66	0,70
40	4,35	3,91	3,61	3,50	2,83	2,70	2,48	2,12	0,66	0,70
95	4,36	3,91	3,61	3,50	2,83	2,70	2,48	2,11	0,66	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	85,15	76,37	70,51	68,36	55,27	52,73	48,44	41,21	12,89	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,36 \cdot 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,32 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

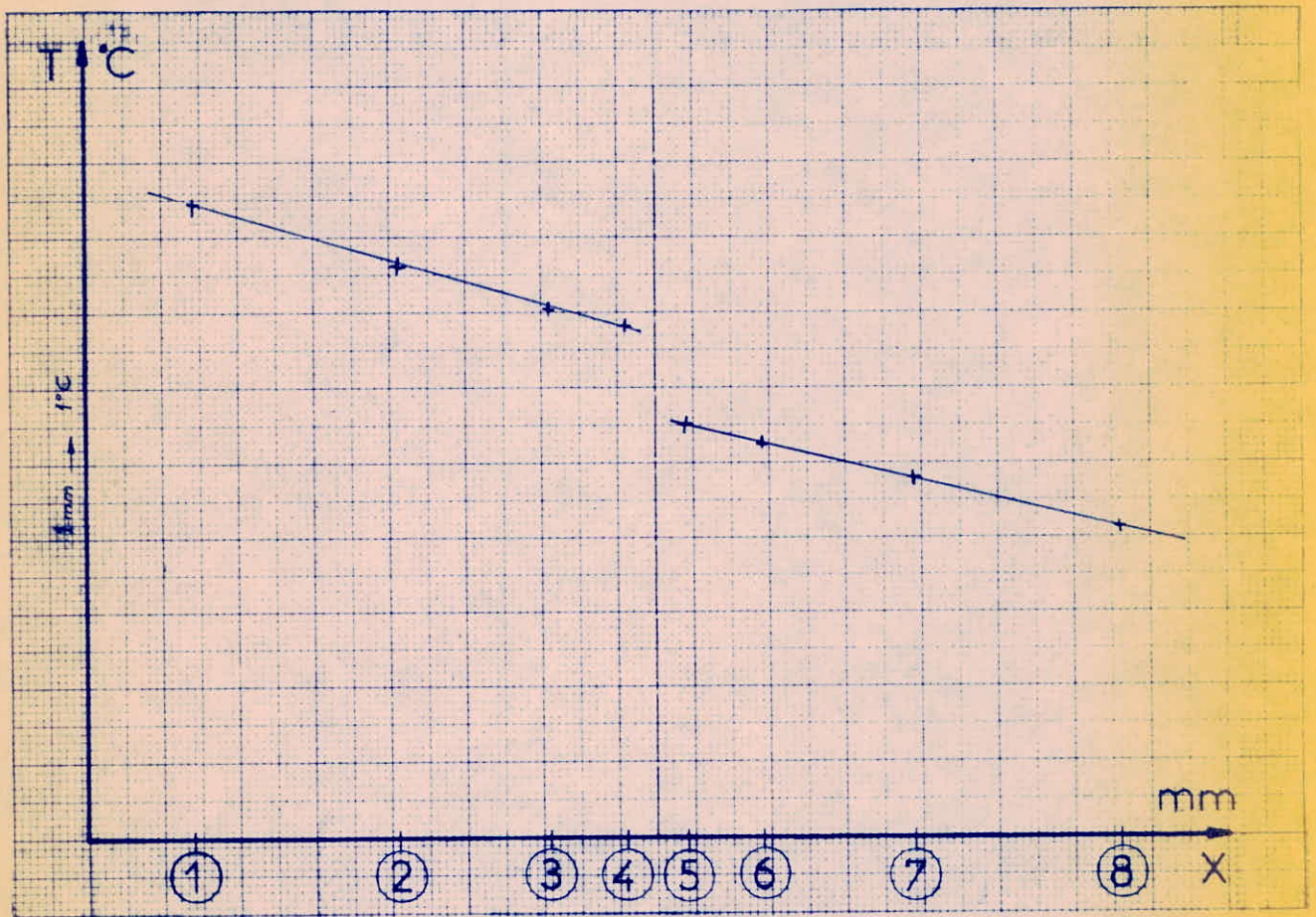


$$e = 180 \mu$$

$$T_a = 27,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,39 \text{ mV}$$

E (mV) Temps (min)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,32	3,92	3,61	2,50	2,84	2,70	2,47	2,13	0,66	0,70
30	4,32	3,92	2,62	2,51	2,84	2,71	2,48	2,14	0,66	0,70
75	4,33	3,90	3,60	3,49	2,82	2,69	2,46	2,125	0,66	0,695
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	84,57	76,17	70,31	68,16	55,08	52,54	48,24	41,50	12,89	13,57



$$\Delta T_{4-5} = 12,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,57 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,380 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

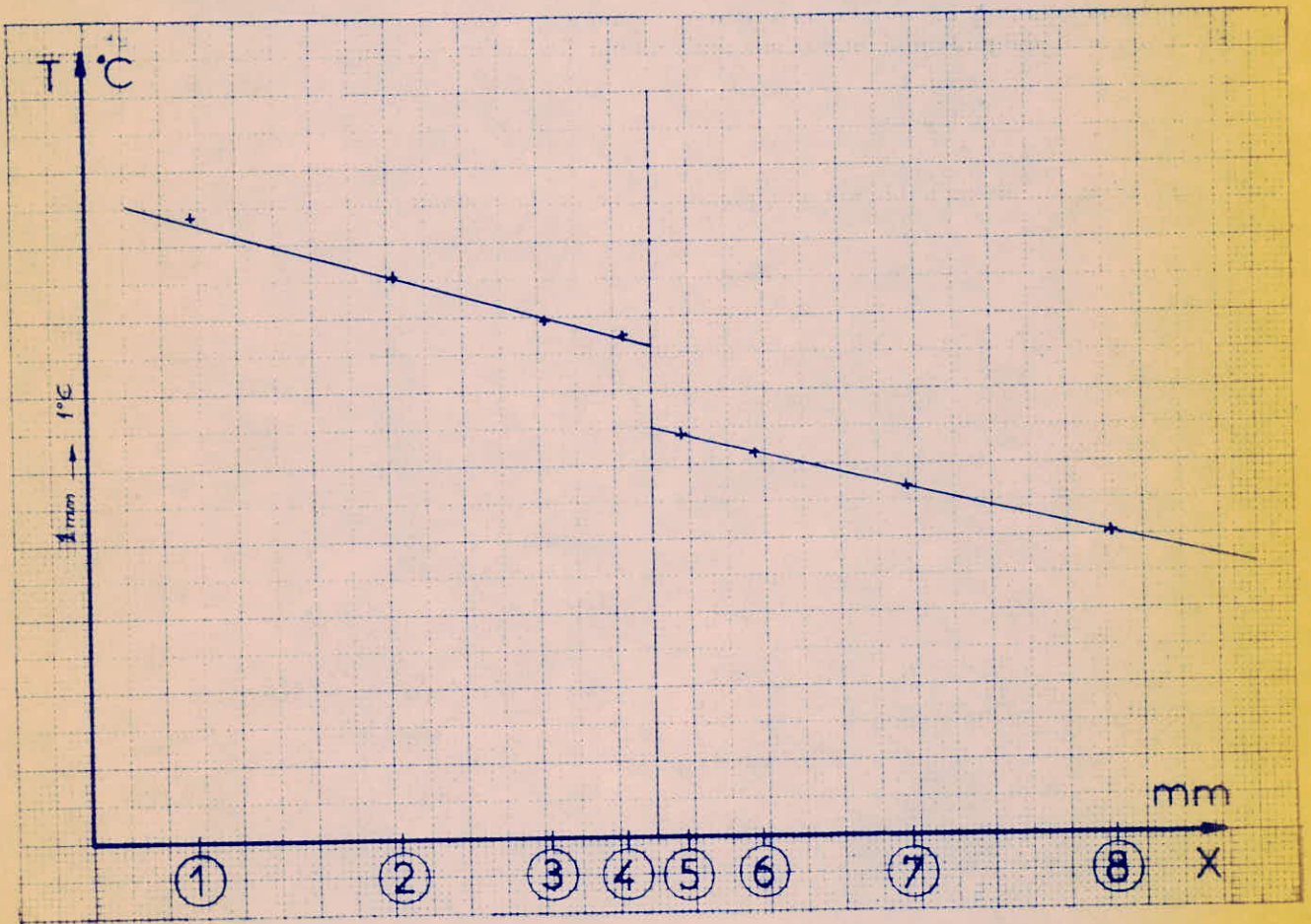


$$e = 185 \mu$$

$$T_a = 24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,27 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,31	3,87	3,57	3,45	2,78	2,65	2,39	2,06	0,67	0,72
35	4,31	3,87	3,57	3,46	2,78	2,65	2,38	2,06	0,67	0,71
105	4,30	3,86	3,55	3,45	2,77	2,64	2,38	2,05	0,67	0,71
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	83,98	75,39	69,34	67,38	54,10	51,56	46,48	40,04	13,09	13,87



$$\Delta T_{4-5} = 13,09 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,587 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

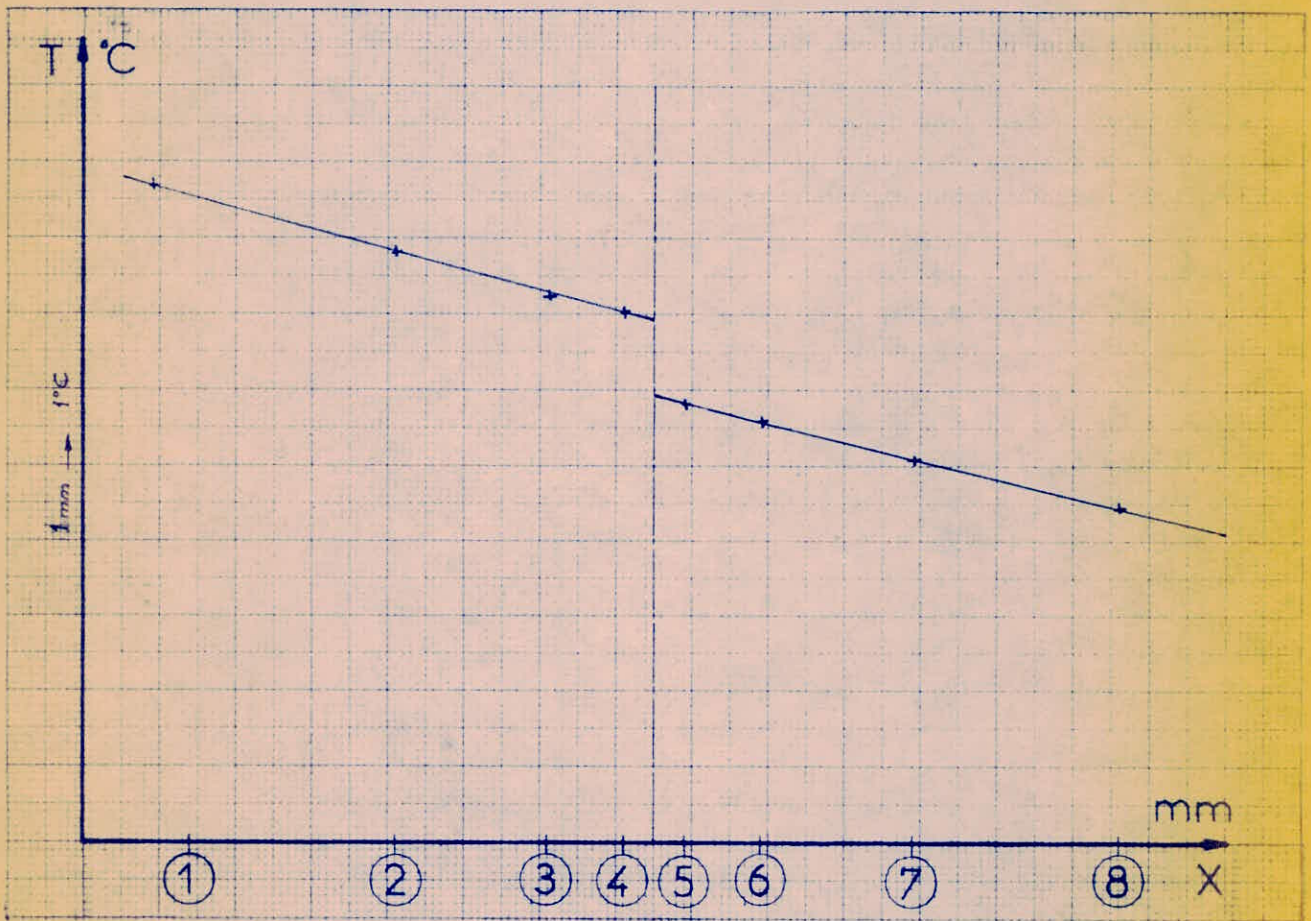


$$e = 187 \mu$$

$$T_a = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,59 \text{ mV}$$

Temp (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,42	3,98	3,70	3,59	3,04	2,81	2,57	2,27	0,65	0,66
35	4,44	4,02	3,73	3,62	2,99	2,85	2,58	2,29	0,65	0,69
75	4,44	4,00	3,71	3,61	2,97	2,86	2,58	2,29	0,62	0,68
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	86,72	78,13	72,46	70,51	58,00	55,86	50,39	44,53	12,11	13,28



$$\Delta T_{4-5} = 12,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,179 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

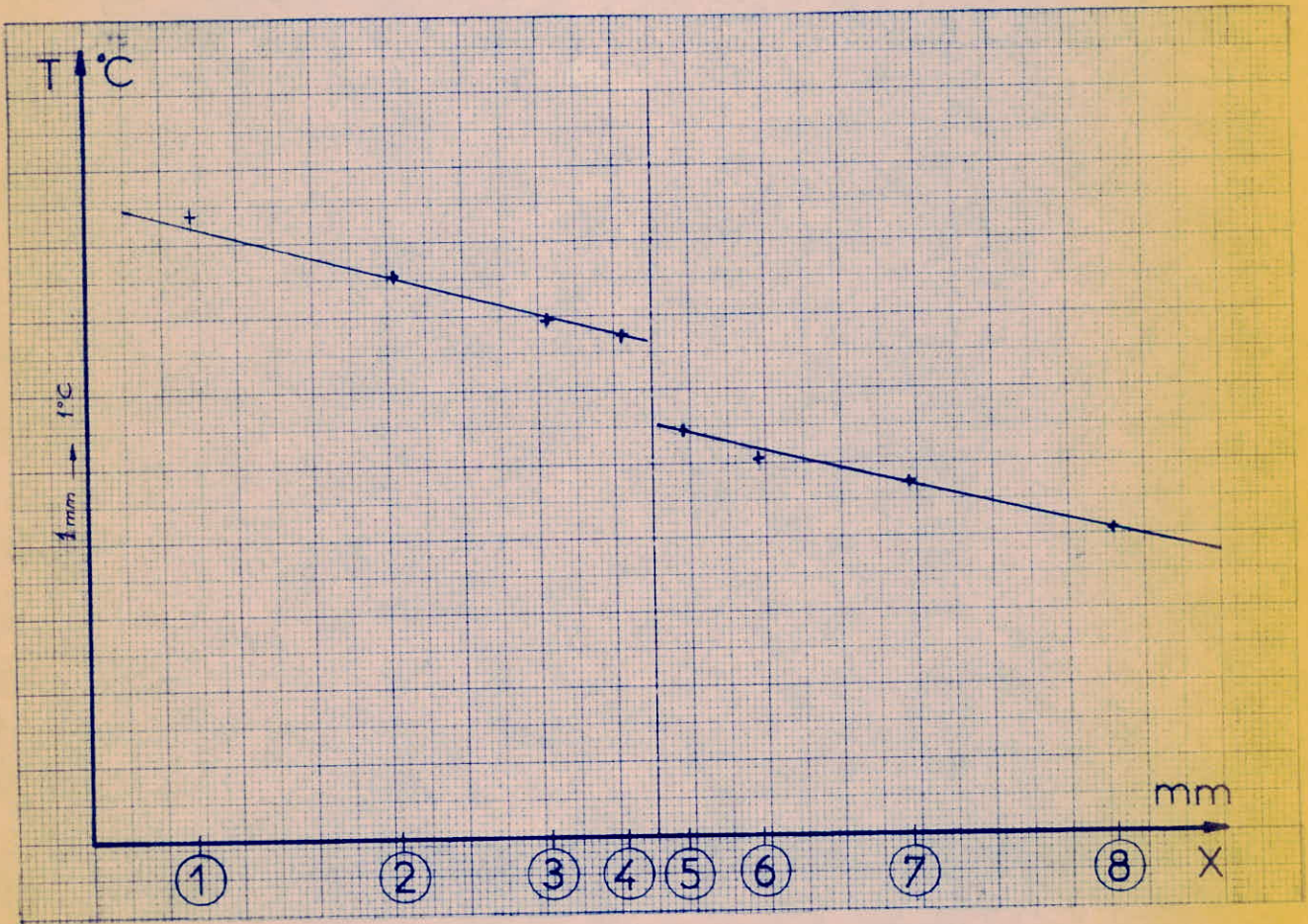


$$e = 187 \mu$$

$$T_a = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,29 \text{ mV}$$

E (mV) Temps (mn)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,32	3,88	3,55	3,44	2,77	2,47	2,41	2,07	0,67	0,70
25	4,30	3,87	3,56	3,45	2,79	2,59	2,43	2,09	0,65	0,70
90	4,30	3,86	3,56	3,45	2,79	2,59	2,43	2,09	0,65	0,70
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	83,98	75,39	69,53	67,38	54,49	50,59	47,46	40,82	12,69	13,67



$$\Delta T_{4-5} = 12,69 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,67 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,449 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

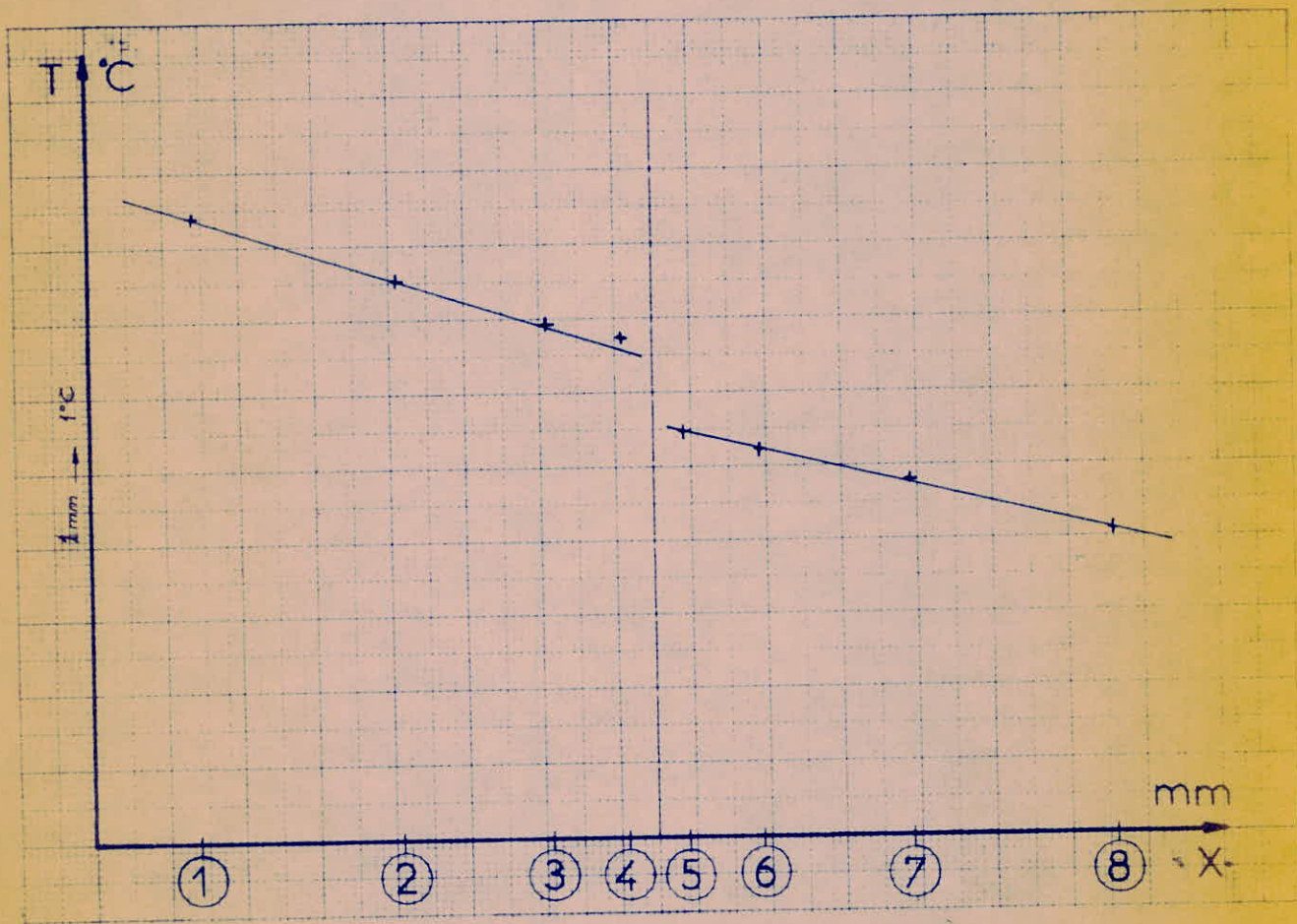


$$e = 200 \mu$$

$$T_a = 24,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,25 \text{ mV}$$

E (mV) Temps (min)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,31	3,87	3,56	2,45	2,85	2,69	2,47	2,10	0,62	0,71
35	4,31	3,87	3,55	3,45	2,84	2,68	2,47	2,10	0,62	0,71
90	4,30	3,85	3,55	3,44	2,81	2,68	2,46	2,09	0,62	0,71
$^{\circ}\text{C}$ (régime stationnaire)	83,98	75,20	69,34	67,19	54,88	52,34	48,04	40,82	12,11	13,87



$$\Delta T_{4-5} = 12,11 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,587 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,26 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

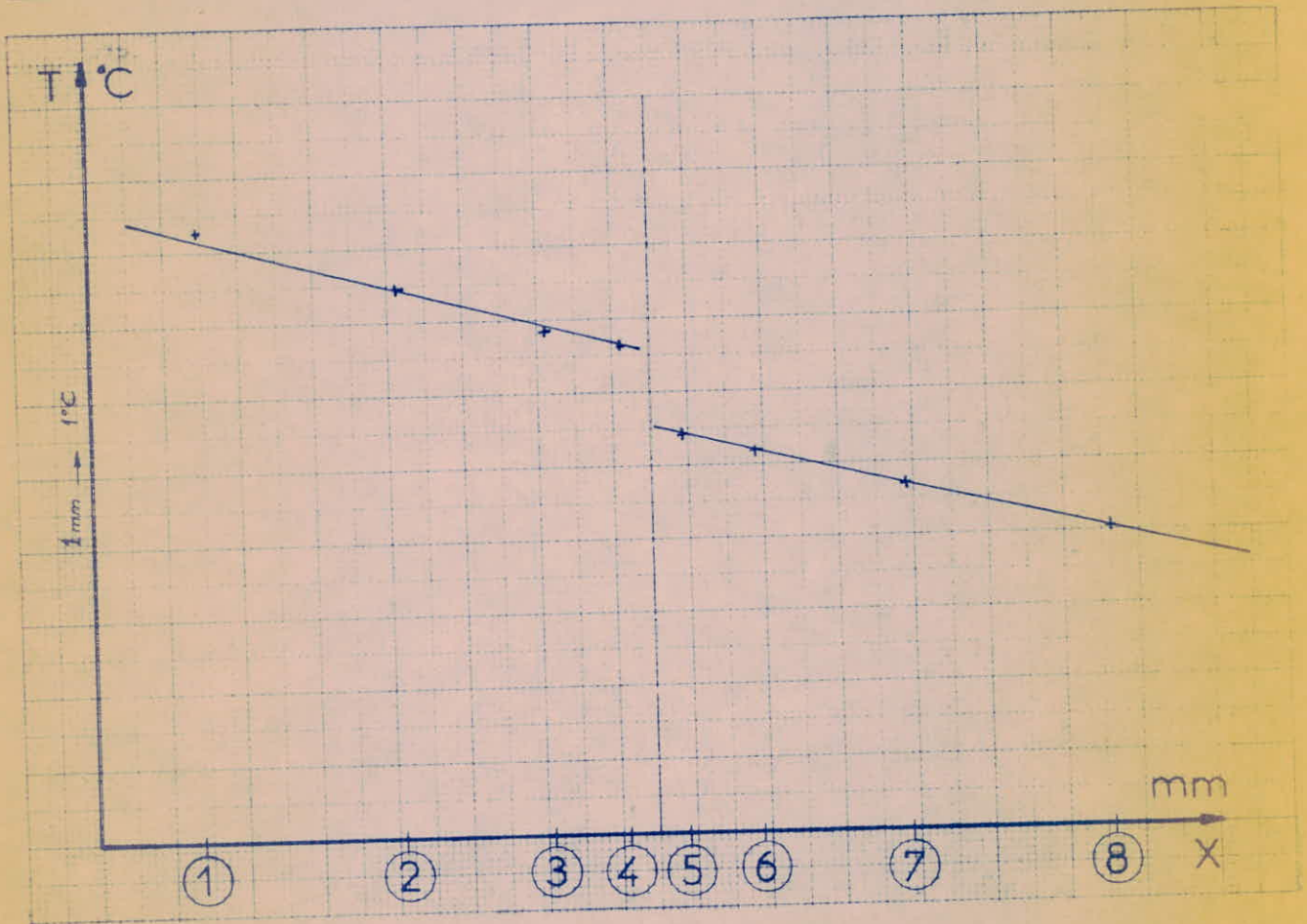


$$e = 200 \mu$$

$$T_a = 23,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,21 \text{ mV}$$

Temps (min) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,24	3,82	3,53	3,42	2,78	2,67	2,22	2,08	0,63	0,70
40	4,24	3,81	3,52	3,42	2,78	2,67	2,41	2,08	0,63	0,69
115	4,24	3,81	3,51	3,41	2,78	2,66	2,41	2,07	0,63	0,69
$T$ (régime stationnaire)	92,81	74,41	68,55	66,60	54,30	51,95	43,07	40,43	12,30	13,48



$$\Delta T_{4-5} = 12,30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 13,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,318 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,320 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$$

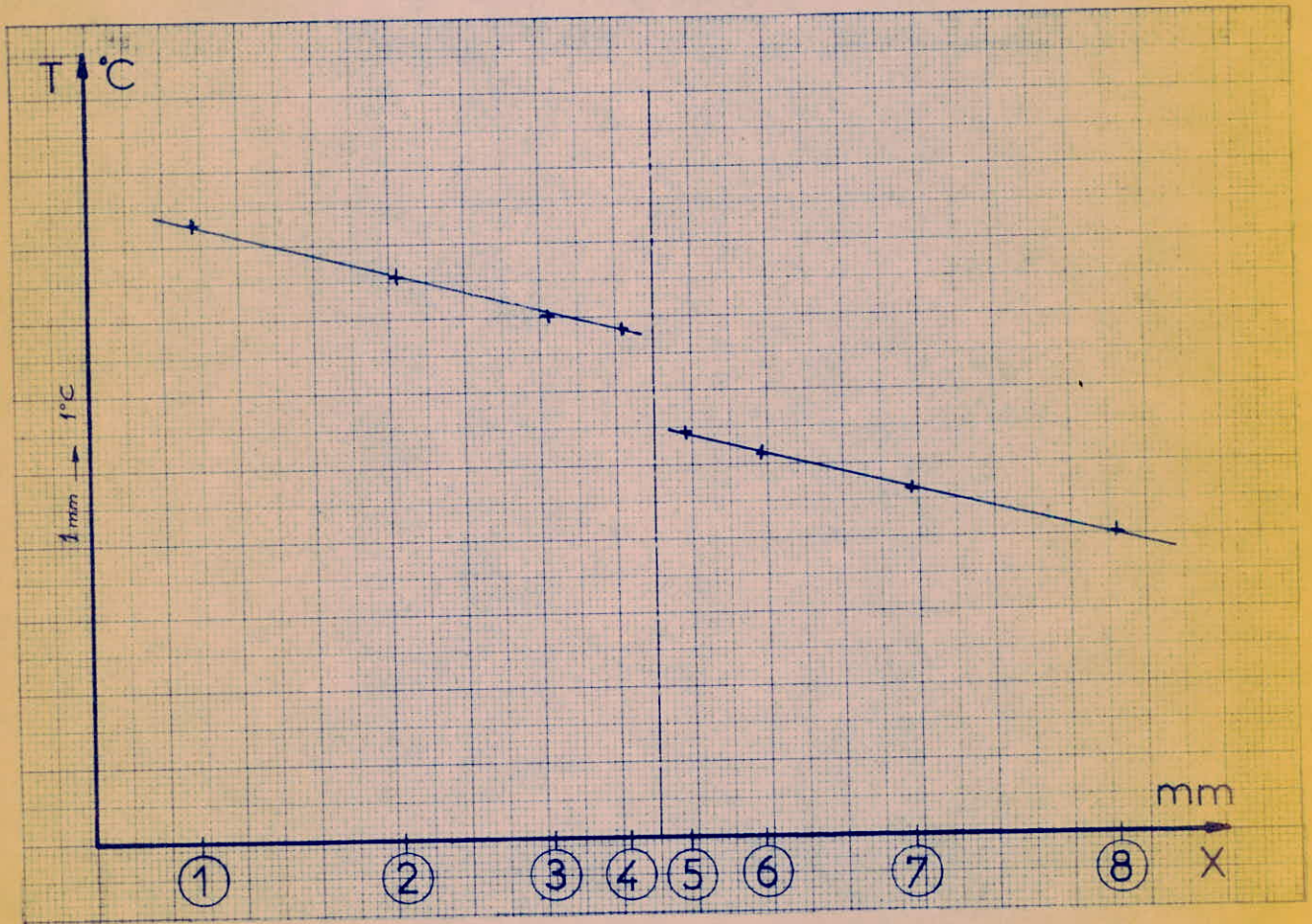


$$e = 205 \mu$$

$$T_a = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_c = 1,12 \text{ mV}$$

Temps (mn) \ E (mV)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	$\Delta E_{4-5}$ mesure directe	$\Delta E_{5-8}$ mesure directe
0	4,26	3,88	3,59	3,49	2,75	2,63	2,37	2,05	0,73	0,71
35	4,24	3,87	3,59	3,50	2,78	2,63	2,38	2,06	0,72	0,72
90	4,25	3,87	3,59	3,51	2,79	2,63	2,38	2,07	0,72	0,72
$^\circ\text{C}$ (régime stationnaire)	83,01	75,59	70,12	68,55	54,49	51,37	46,48	40,43	14,06	14,06



$$\Delta T_{4-5} = 14,06 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_{5-8} = 14,06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$|\varphi| = 9,718 \cdot 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$R_t = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$

$$R_{j_1} + R_{j_2} = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C/kcal}$$



## Chapitre 7

### INTERPRETATION DES RESULTATS

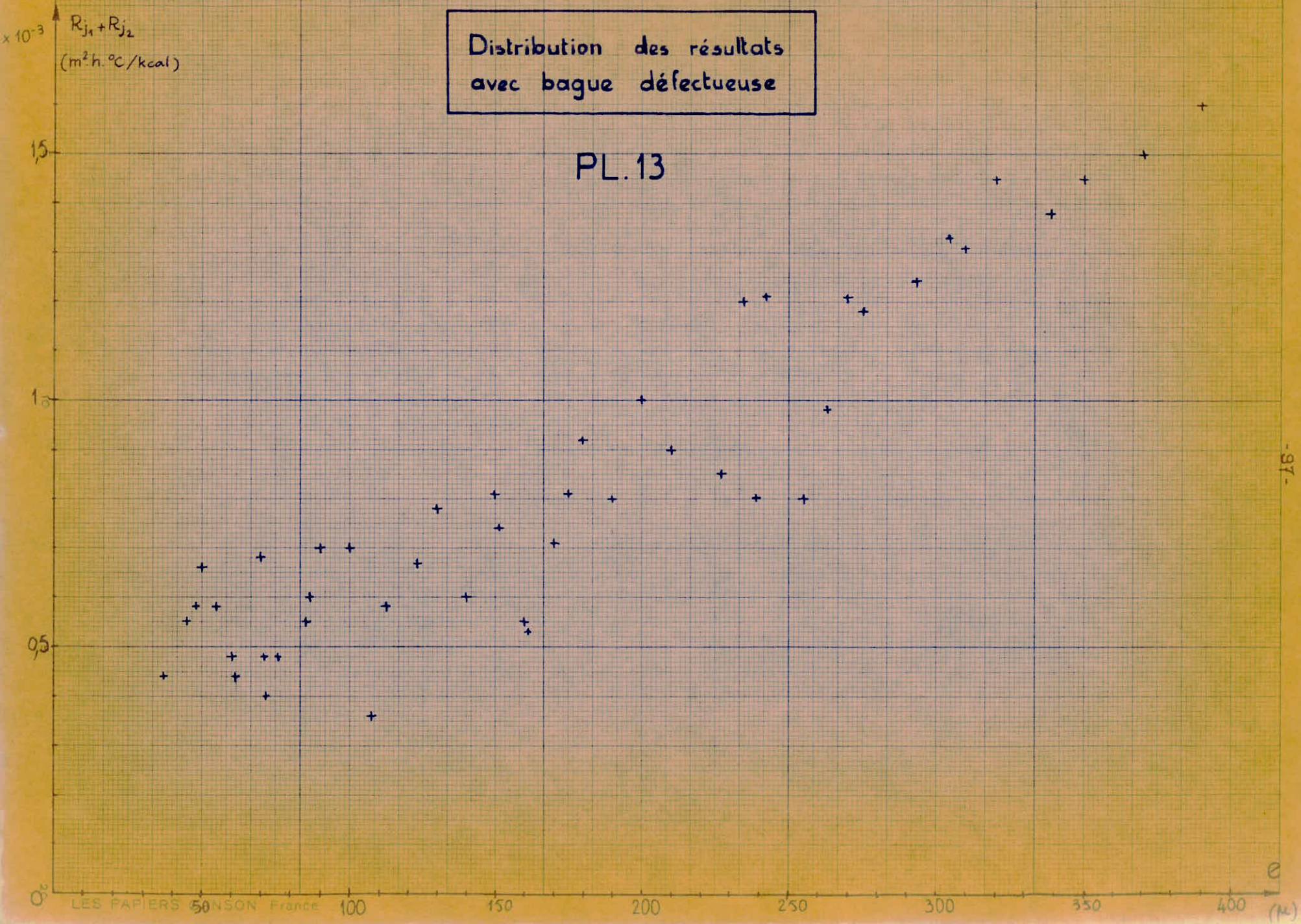
Les résultats obtenus sont consignés sur les planches 13 & 14 . Mais c'est la planche 14 qui présente le plus d'intérêt car elle se rapproche le plus de la réalité . Elle est le fruit d'une succession d'améliorations dans la méthode de mesure , poussées jusqu'à la limite de nos moyens existants . Dans ce contexte , il est recommandé de faire une comparaison entre les mêmes résultats obtenus pour le même domaine d'épaisseurs représentés aux planches 4a , 13 & 14 , pour se faire une idée sur les étapes franchies jusqu'à l'aboutissement aux résultats finaux ( cette comparaison est mentionnée à la planche 15 ) . Il a fallu pour cela vaincre une par une toutes les causes d'erreurs dans la méthodologie d'expérimentation proposée ; Parmi toutes les intrusions parasites auxquelles nous avons fait face , il en est une qui s'est particulièrement distinguée par sa coriacité et nous ne passerons pas sans en dénoncer l'apport néfaste à la bonne marche des expériences . Nous visons par cela l'erreur due à une mauvaise pose de l'échantillon à examiner qui ne peut , si l'on s'en tient au système de bague de centrage , être définitivement éliminée . Or , il se trouve justement que c'est ce facteur là qui fait que les résultats des planches citées plus haut accusent des variations importantes lorsqu'on les compare entre eux . Ce que nous disons là n'est pas une affirmation sans fondement vu que nous n'avons pas manqué de la vérifier . Pour ce faire , il suffirait de mettre un peu de " mauvaise volonté " lors de la pose du clinquant en imprimant un léger basculement au boîtier supérieur de façon à être dans les conditions d'une mauvaise manipulation . Il s'en suit que la résistance mesurée augmente dans des proportions dont l'ordre de grandeur est celui de la planche 13 ou légèrement supérieur .

Certes , en ce qui concerne nos dernières mesures , nous n'avons pas manqué d'accorder à ce détail tout l'égard qui



Distribution des résultats  
avec bague défectueuse

PL.13

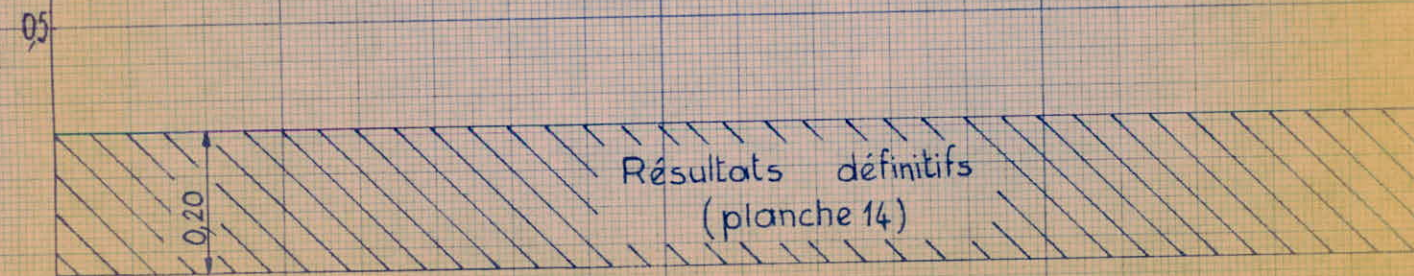
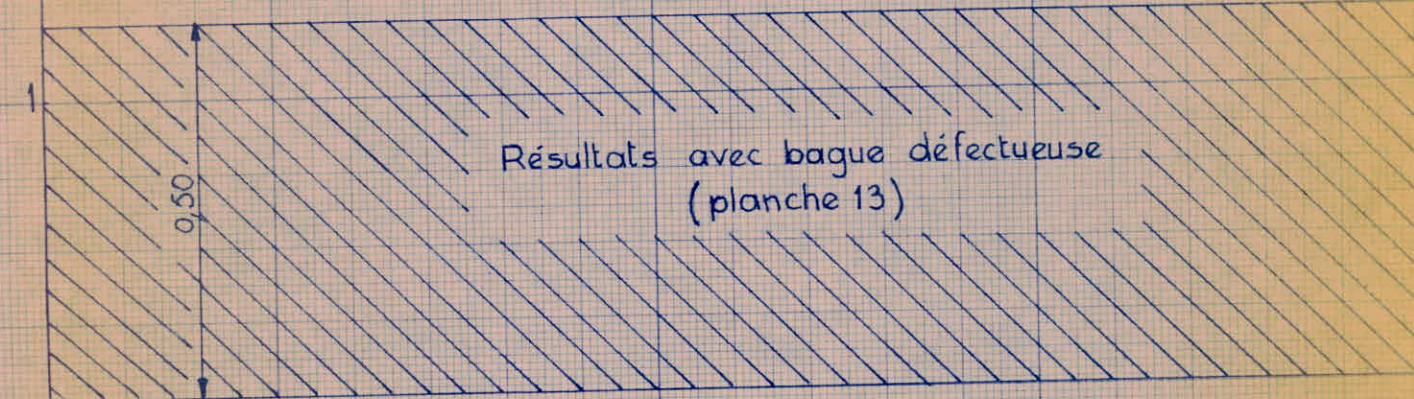
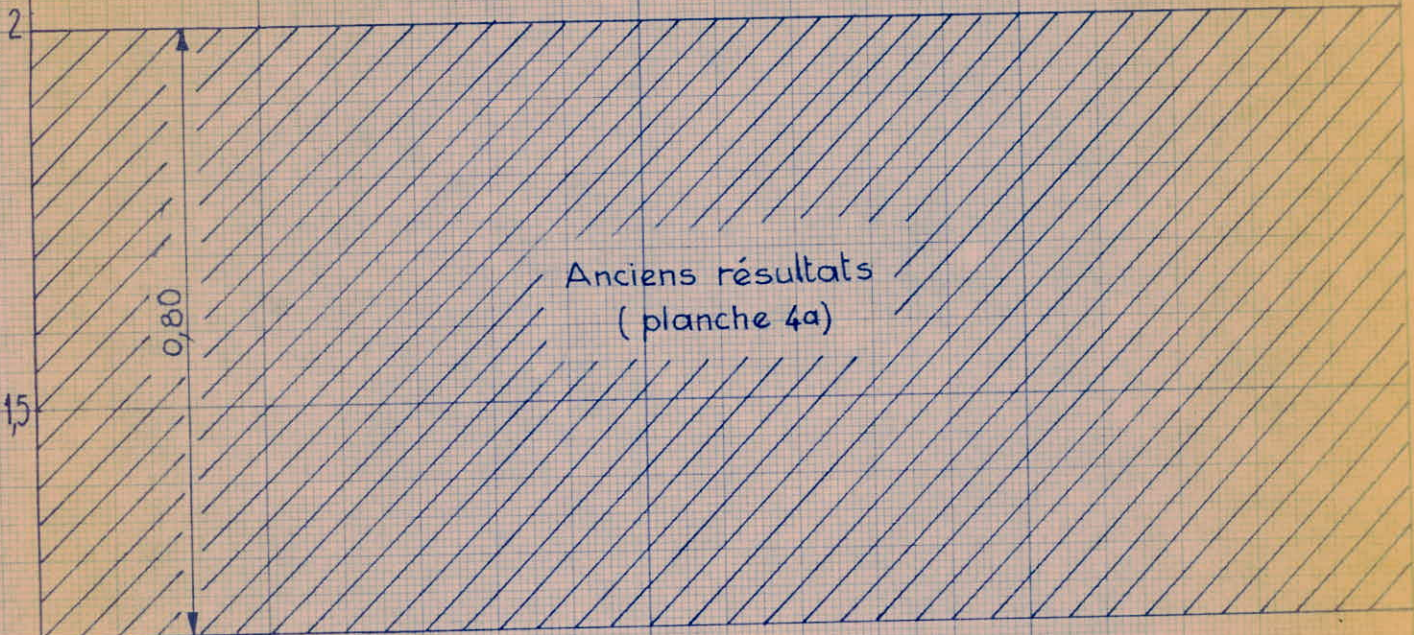




Evolution comparative de la méthode de mesure

PL.15

$R_{j_1} + R_{j_2}$   
 $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C} / \text{kcal}$



150

160

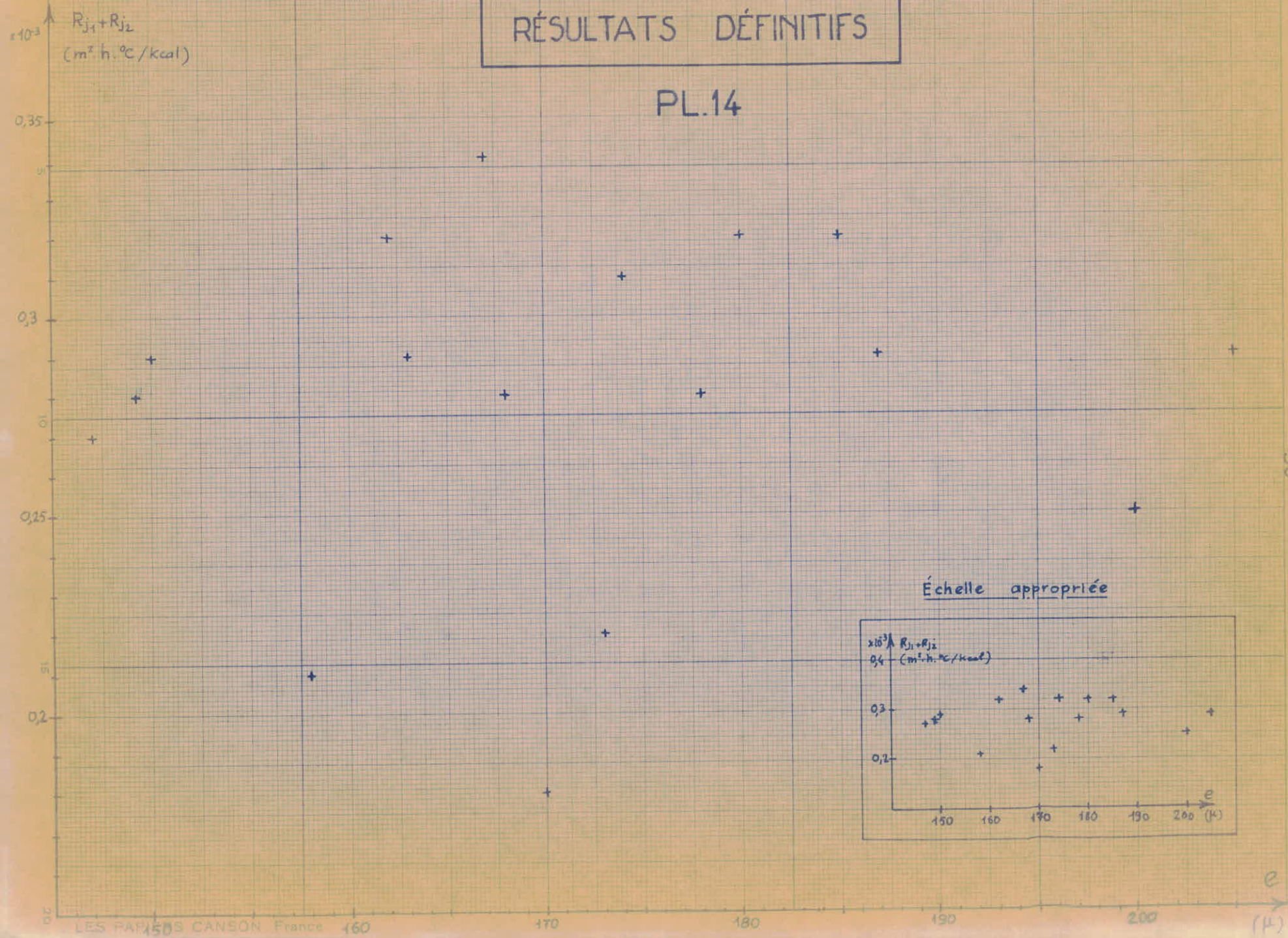
170

$e$   
 $(\mu)^{\circ}$



# RÉSULTATS DÉFINITIFS

PL.14



-99-



lui est dû , mais nous n'irons pas jusqu'à affirmer que la perfection a été atteinte . Il faut avouer toutefois que l'observation des critères de fiabilité des expériences que nous nous sommes assignés malgré leur sévérité ( p. 63 ) , est un garant de taille pour la véracité de nos résultats finaux .

A ce niveau , il est dès lors possible de répondre en partie à la question qui nous préoccupait dès le début de notre projet ( voir p. 14 ) , et dont l'élucidation est la véritable finalité de celui-ci . Il s'agissait de savoir si l'allure tourmentée prise par la distribution des résultats de la planche 4a , était due à des erreurs systématiques dans la méthode de mesure ou à l'existence d'un phénomène physique réel insoupçonné jusqu'à lors . Ce phénomène, s'il existe, peut à ses débuts être sujet à toutes sortes d'hypothèses plus ou moins spéculatives jusqu'à ce qu'une lumière finale mette en évidence sa véritable nature . On pourrait par exemple avancer l'hypothèse d'un phénomène de résonance ayant lieu pour les faibles épaisseurs où l'agitation thermique des électrons entre les deux faces du clinquant mince prend des proportions capables de faire varier notablement sa résistance pour une faible variation de l'épaisseur de celui-ci . Cependant, nous ne nous lancerons pas dans des spéculations non fondées car nous ne devons pas perdre de vue, en ces circonstances, la responsabilité scientifique qui nous incomberait, et toute réponse de notre part doit être donnée avec partialité . Or justement, celle-ci tend à ramener les choses à leur juste valeur .

Nous affirmons que les résultats de la planche 4a sont dépourvus de toute valeur, du moins en ce qui concerne l'amplitude des variations de résistance observées . Nous sommes sûrs que les valeurs données sont affectées de beaucoup par des erreurs de mesure, notamment celles dues à une mauvaise pose des échantillons examinés et peut-être aussi aux tolérances de fabrication de ceux-ci .



Nous accusons également les résultats de la planche 13 de garder encore des séquelles de ce facteur d'erreur malgré qu'ils soient déjà mieux élaborés . Nous rappelons qu'ils ont été obtenus avec une bague de centrage dont les tolérances de fabrication n'étaient pas très serrées .

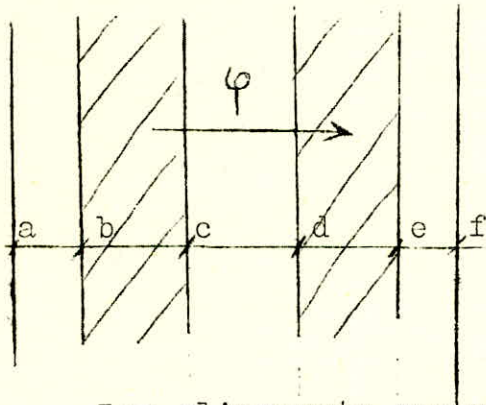
Quant aux résultats de la planche 14 qui constituent en quelque sorte notre référence , ils semblent être, eux aussi, affectés par ce facteur d'erreur malgré le soin particulier apporté à leur élaboration . Mais il faut remarquer avant tout que l'échelle de représentation utilisée n'est pas appropriée, car le chiffre des centièmes n'étant pas sûr , il aurait été plus correct de disposer d'une échelle qui ne puisse permettre d'apprécier au delà , et ce pour ne pas amplifier les défauts de configuration . C'est comme qui représenterait l'état de surface d'une pièce avec un agrandissement de mille , alors qu'avec son appareil de mesure il ne peut même pas apprécier le dixième . Pour revenir à l'erreur introduite par une mauvaise pose des échantillons à examiner , nous sommes rassurés par le fait que certains points , répétés plusieurs fois , admettent toujours des résultats voisins , ce qui réduit de beaucoup l'influence de cette erreur . Mais comment expliquer alors que pour deux épaisseurs voisines , la résistance thermique varie , là aussi , dans de grandes proportions , alors que les domaines d'erreur estimés pour chaque point pris à part n'arrivent pas toujours à couvrir le domaine de variation de la résistance entre les deux points ? Nous ne pensons pas , en toute sincérité, que cela soit dû à un phénomène physique réel , mais à une autre cause d'erreur que nous n'avons pas évoquée jusque là . Nous disons cela par intuition faute de ne pouvoir le vérifier par nos moyens , quoiqu'il n'a pas souvent été inutile dans la recherche scientifique . Mais il est clair que cette erreur dont nous allons parler y est certainement pour quelque chose , c'est celle due à la nature même des échantillons examinés . Celle-ci n'a pas été mentionnée clairement jusque là car elle n'est entrée à aucun



moment dans les calculs , puisque tout ce que l'on faisait c'était de déterminer la résistance thermique d'un clinquant donné , en lui affectant par la suite un nombre susceptible de désigner son épaisseur avec la précision de nos moyens ; Or , que se passerait-il s'il s'avérait que les épaisseurs mesurées ne remplissent pas les conditions requises ? Et c'est justement ce que nous craignons . De ce fait, il se peut que deux épaisseurs prises comme voisines ne désignent qu'un même clinquant , ou que les résultats qu'elles donnent soient intervertis . Il se peut aussi que deux clinquants voisins ne soient pas de structure métallographique identique **alors** que celle-ci est peut-être influente . Il est de même possible que les **résistances** des cliquants soient fonctions des valeurs absolues des températures et du flux entrant en jeu , lesquels ne peuvent être maintenus constants pour tous les clinquants puisqu'ils dépendent de leurs résistances . Tout cela met en jeu autant d'indéterminations qui augmentent le domaine d'incertitude , de sorte que nous avouons ne pas être en mesure , vus les moyens dont nous disposons , de décider de l'allure exacte prise par la distribution des résistances des clinquants en fonction de leurs épaisseurs . En revanche , nous avons pu localiser la zone qu'elle recouvre , et cela n'est pas de moindre importance .

Nous pouvons alors dire , dès à présent , que les résistances thermiques des clinquants de cuivre , d'épaisseurs allant de 147 à 205 microns , se situent dans une bande comprise entre  $0,18$  &  $0,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C} / \text{kcal}$  . Cela s'entend avec une conductibilité de l'acier , entrant dans les calculs , prise arbitrairement égale à  $39,4 \text{ kcal} / \text{m.h.}^\circ \text{C}$  . Nous pensons également que la résistance est constante à l'intérieur de cette bande et prend une valeur moyenne de  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ h}^\circ \text{C} / \text{kcal}$  environ . Cela est fondé sur le modèle de couche d'anomalie que nous allons proposer . Nous rappelons d'abord la localisation donnée par Mr. Jacq des couches d'anomalie se manifestant pour un bloc épais ( fig. 1 ) ;





Ordres de grandeur :

ab = 50 microns

bc = 100 "

de = 100 "

ef = 50 "

fig. 1

Les clinquants que nous avons testés ont des épaisseurs allant de 150 à 200 microns environ ; c'est-à-dire que leurs épaisseurs sont supérieures à ac et inférieures à (ac+ef) . En supposant qu'ils continuent à se comporter comme un bloc épais sans qu'un autre phénomène insoupçonné soit superposé à l'effet Jacq pour ces épaisseurs critiques , nous pouvons les englober sous un modèle unique n'ayant qu'une seule couche d'anomalie . Il s'en suit que tous ces clinquants ont une résistance thermique constante , les résistances de conduction en dehors de la couche d'anomalie étant parfaitement négligeables .

Cela peut servir pour la détermination de  $R_{j1}$  ou  $R_{j2}$  dans les couches Jacq d'entrée et de sortie pour un métal quelconque , ce que nous croyions au début impossibles à déterminer séparément . Par exemple , pour le cuivre nous avons déterminé  $R_{j1} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C} / \text{kcal}$  environ ; il serait intéressant de se faire une idée sur l'ordre de grandeur de la chute thermique que cela entraîne , le flux moyen qui traversait les clinquants étant de  $9,5 \cdot 10^3 \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$  .

$$\Delta T = \varphi \cdot R = 9,5 \cdot 0,25 = 2,375 \text{ °C}$$

Cela est appréciable vue l'épaisseur traversée par le flux . Mais s'il n'y avait pas de couche d'anomalie , la résistance du clinquant serait une résistance de conduction uniquement qui entraînerait , pour une épaisseur moyenne de 175 microns et une conductibilité moyenné du cuivre de



340 kcal/m.h.°C , la chute thermique suivante :

$$\Delta T = \frac{e}{\lambda} \cdot \varphi = \frac{175 \cdot 10^{-6}}{340} \cdot 9,5 \cdot 10^3$$
$$= 0,00488 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cette chute est infiniment plus petite que celle introduite par la couche d'anomalie . Le rapport en est  $\frac{2,375}{0,00488} = 486,68 \approx 500$  , ce qui est notable .

Si l'on considère  $R_{j1}$  et  $R_{j2}$  égales pour un bloc épais de cuivre , la résistance supplémentaire introduite par les couches d'anomalie Jacq est alors de  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h} ; ^\circ\text{C} / \text{kcal}$  . Cela équivaut à une surépaisseur égale à  $(R_{j1} + R_{j2}) \lambda = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 340 = 0,170 \text{ m} = 170 \text{ mm}$  . Ceci étant issu de notre modèle de clinquant , bien entendu .

Nous terminons ici notre interprétation des résultats dans l'espoir que nos conclusions personnelles puissent trouver une vérification par des moyens plus perfectionnés que ceux dont nous disposions . Dans ce sens , nous formulons dans le chapitre suivant des suggestions susceptibles d'améliorer notablement la méthodologie d'expérimentation .



## Chapitre 8

### S U G G E S T I O N S

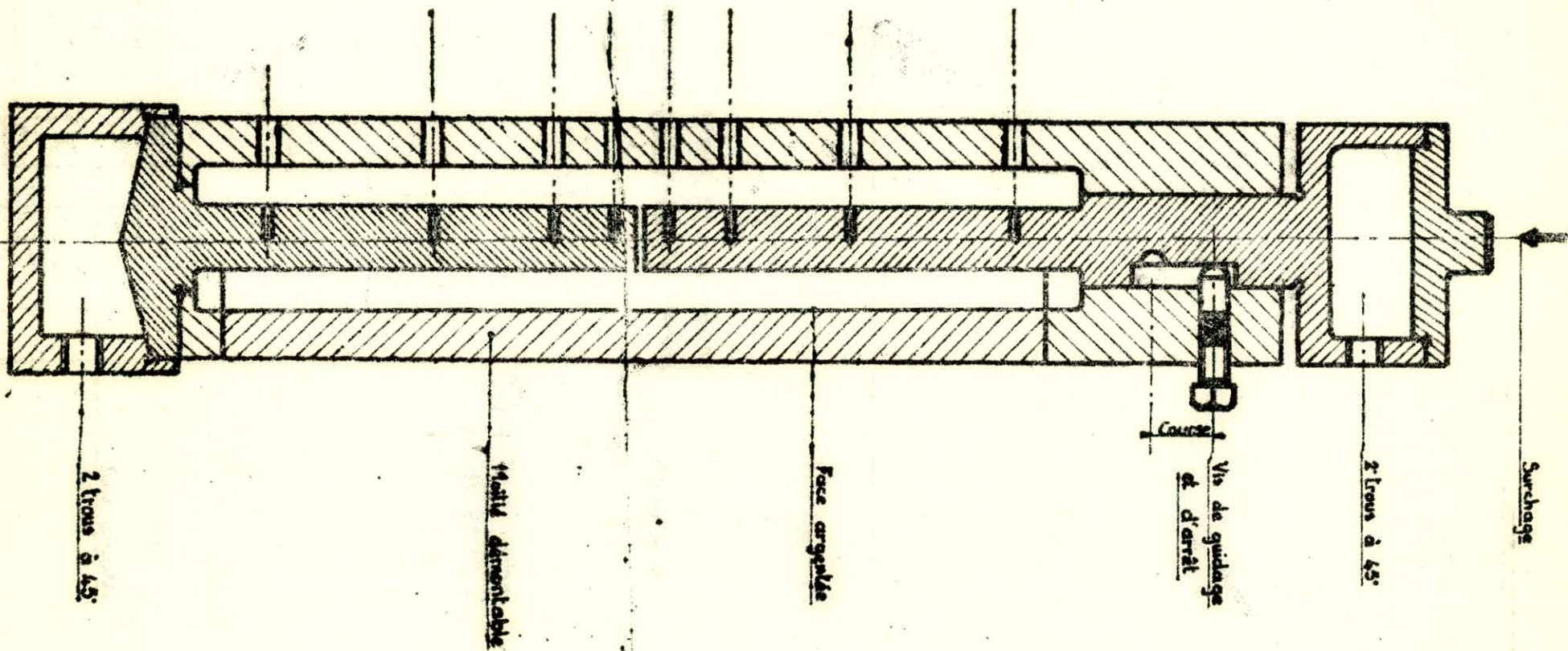
Au vu de tout ce qui précède, nous pouvons dire que l'installation utilisée est apte à remplir parfaitement les services qui lui sont demandés, notamment en ce qui concerne l'alimentation en eau chaude et en eau froide qui n'a plus besoin d'être retouchée . Il reste cependant une lacune technologique qui mérite d'être examinée de près ; c'est le problème de la bague de centrage dont il est inutile de rappeler la répercussion directe sur la bonne marche des expériences, et toute solution envisagée dans ce sens n'en sera que plus bénéfique .

A ce point de vue là, nous avons examiné sommairement ce problème, faute de temps, et nous proposons à la planche 16 un appareil expérimental qui fait totalement abstraction de cette bague . Cela permet d'éliminer les inconvénients que celle-ci entraînait, à savoir le mauvais positionnement et le flux de fuite . Cependant nous n'entrerons pas dans les détails de fabrication et de montage mais nous nous contenterons d'en donner les lignes directrices .

L'appareil comporte un guidage assez long à sa partie supérieure qui permet au conducteur central de remonter, laissant place au montage du clinquant . Il est prévu un système de limitation de course et de liaison en rotation pour la sécurité des thermocouples qui doivent être montés laches . Quant-à l'échantillon à examiner, il est introduit latéralement après démontage d'une moitié de l'anneau de garde, qui doit être étudiée dans ce sens . Il reste aussi à étudier le problème du calorifugeage .

En ce qui concerne les clinquants, nous suggérons que ceux-ci soient commandés chez les spécialistes qui s'en occupent car l'homogénéité de leur surface et la précision de leurs cotes sont influentes sur les résultats . Il est





DISPOSITIF EXPERIMENTAL PROPOSE

PL.16



souhaitable aussi d'établir des formules de corrections tenant compte de la dilatation subie par le clinquant soumis au flux thermique pendant l'expérience .

Nous signalons enfin quelques applications de l'effet Jacq qu'il serait souhaitable que des projets soient entrepris pour leur étude . Il est en effet certain que ce phénomène a des répercussions sur divers problèmes qui doivent être revus de près . Entre autres nous citons :

- Les problèmes basés sur la mesure des températures superficielles, ce qui inclut les relations de convection et de rayonnement et certaines constantes physiques .

- Les problèmes industriels concernant les échangeurs de chaleur .

- Les problèmes d'isolation thermique où l'on peut proposer une isolation par clinquants minces et résistants isolés par papiers .

- Les problèmes de frottement concernant les paliers, les freins, les embrayages, la lubrification ...

- Les problèmes de métallurgie en général .

- Les problèmes d'aérospatiale concernant l'entrée d'ogives dans l'atmosphère et le mur de chaleur .

- Etc ...







## II O N C L U S I O N

-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-

La réalisation de l'installation nécessitée par notre présente étude ayant pris la plus grande partie du temps alloué, nous voudrions nous excuser de mettre prématurément terme à notre intervention .

Moutefois, nous demeurons convaincus que la modeste contribution que nous venons d'apporter à une meilleure compréhension de l'effet Jacq, trouvera un écho positif au sein des promotions futures qui ne manqueront pas de poursuivre le perfectionnement et des idées et des outils permettant une juste appréhension de ce phénomène .



# O M M A I R E

-----

## Introduction

- 1 - Rappel sur la loi de Fourier en régime permanent ..... 4
- 2 - Effet Jacq ..... 5
  - Expérience du Pr. G. d'Albon ..... 7

## Chapitre 1 : CONTENU DES RECHERCHES PRESENTÉES

- 1.1 - Projet initial ..... 10
- 1.2 - Appareil proposé ..... 10
- 1.3 - Recherches faites l'année passée ..... 12
- 1.4 - Contenu des recherches présentées cette année ..... 14

## Chapitre 2 : INSTALLATION UTILISEE

- 2.1 - Améliorations apportées à l'ancienne installation ..... 18
  - 2.1.1 - Thermocouples ..... 18
    - Etalonnage des thermocouples ..... 21
  - 2.1.2 - Calorifugeage de l'appareil d'expérimentation ..... 24
  - 2.1.3 - Bague de centrage ..... 27
  - 2.1.4 - Pression de contact ..... 28
  - 2.1.5 - Support de l'ensemble expérimental .... 29
  - 2.1.6 - Ecran thermique ..... 29
- 2.2 - Installation utilisée ..... 31
  - 2.2.1 - Source d'eau froide ..... 31
  - 2.2.2 - Source d'eau chaude ..... 33

## Chapitre 3 : PROCÉDES TECHNOLOGIQUES UTILISES

POUR LA POSE DES THERMOCOUPLES ET LA  
FABRICATION DES CLINQUANTS DE CUIVRE

- 3.1 - Thermocouples ..... 39
  - 3.1.1 - Considérations sur la forme de la boule d'étain et de l'outil servant à son introduction ..... 39



3.1.2 - Soudage de la boule d'étain sur le fil de Constantan .....	40
3.1.3 - Introduction de la boule d'étain .....	41
3.1.4 - Isolation du fil de Constantan et fer- meture du boîtier .....	41
3.2 - Fabrication des clinquants de cuivre ..	42
3.2.1 - Méthodes essayées .....	43
3.2.1.1 - La Polisseuse .....	43
3.2.1.2 - La presse hydraulique .....	43
3.2.1.3 - L'électrolyse .....	44
3.2.2 - Méthode définitive .....	44
3.2.3 - Contrôle et tri des clinquants .....	45
<u>Chapitre 4</u> : METHODOLOGIE D'EXPERIMENTATION	
4.1 - Mise en place du clinquant .....	46
4.2 - Mise en marche de l'installation .....	46
4.3 - Mesures effectuées .....	47
<u>Chapitre 5</u> : METHODOLOGIE DE CALCUL	
5.1 - Analyse de la planche 12 .....	48
5.1.1 - Considérations sur la résistance ther- mique du clinquant .....	48
5.1.2 - Déduction de la résistance du clinquant	50
5.2 - Bilan des erreurs de mesure .....	51
5.2.1 - Considérations sur le flux thermique et sur la conductibilité .....	51
5.2.2 - Erreurs sur la mesure des températures.	54
5.2.3 - Erreurs dues au clinquant et aux papiers	55
5.2.4 - Erreurs dues à la stabilité des sources	56
5.3 - Notice de calcul .....	57
<u>Chapitre 6</u> : PRESENTATION DES RESULTATS .....	63
- Tableau A .....	66
- Tableau B .....	67
<u>Chapitre 7</u> : INTERPRETATION DES RESULTATS .....	96
<u>Chapitre 8</u> : SUGGESTIONS .....	105
<u>Conclusion</u> : .....	109







