

N° d'ordre 462

50376
1974
80

50376
1974
80

THESE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES
ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ

par

FUSEY François-Xavier

*

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ECHANGES
OCEAN-ATMOSPHERE : MESURE DE LA TEMPERATURE
DE SURFACE DE L'OCEAN PAR RADIOMETRIE
INFRA-ROUGE POLARISEE



Soutenue le

devant la Commission d'examen

Membres du Jury

M. J. SCHILTZ *Président*
Mme J. LENOBLE *Rapporteur*
M. M. HERMAN *Examineur*
M. Le Capitaine de Vaisseau P. DE LA COCHETIERE *Membre invité*
M. J. ROMER *Ingénieur en chef de la météorologie* *Membre invité*

A ma Femme.

A mon Fils.

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille, sous la direction de Madame LENOBLE, Professeur, à qui je tiens à exprimer mes sentiments de vive gratitude.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur SCHILTZ qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury, ainsi que Monsieur HERMAN et Monsieur le Capitaine de Vaisseau P.-DE LA COCHETIERE qui ont accepté de juger mon travail.

Je tiens à remercier particulièrement P. LECOMTE, P.Y. DESCHAMPS, et J.C. VANHOUTTE pour leur précieuse collaboration, ainsi que le personnel technique du Département de Physique qui a participé à la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier le Commandant CASTRO, le Commandant LE BARS, les Météorologistes, Monsieur VINCENT et l'équipage du Navire Météorologique FRANCE II qui m'ont aidé lors des expériences réalisées au point KILO.

Que Messieurs FAVRE et COANTIC, qui ont permis de mener à bien nos expériences en soufflerie, trouvent ici l'expression de mes remerciements.

Chapitre I : PRINCIPE DU RADIOMETRE INFRAROUGE

I - PRINCIPE DE LA MESURE RADIOMETRIQUE

II - DESCRIPTION SOMMAIRE DU RADIOMETRE REALISE A LILLE

- a/ Le détecteur
- b/ Le modulateur
- c/ Le corps noir de référence
- d/ Le filtre
- e/ Le polariseur

Chapitre II : PRINCIPE DE LA MESURE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU AVEC UN RADIOMETRE POLARISE

I - MISE EN EVIDENCE DE L'ERREUR DE REFLEXION

II - AMELIORATION APPORTEE POUR LA POLARISATION

III - RESULTATS THEORIQUES

IV - COMPARAISON DES RESULTATS THEORIQUES EN RADIOMETRIE POLARISEE ET NON POLARISEE

Chapitre III : EXPERIENCES EN LABORATOIRE

I - EXPERIENCE VISANT A VERIFIER LES CALCULS

- a/ Dispositif expérimental
- b/ Résultats expérimentaux
- c/ Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

II - MESURE DE L'ERREUR DE REFLEXION POUR UN CIEL REEL

- a/ Dispositif expérimental
- b/ Résultats expérimentaux
- c/ Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques

Chapitre IV : APPLICATION DU RADIOMETRE POLARISE A LA DETECTION DE NAPPES D'HYDROCARBURES

I - INTRODUCTION

II - ETUDE THEORIQUE

- a/ Ciel rayonnant comme un corps noir
- b/ Modèle de ciel réel

III - EXPERIENCES EN LABORATOIRE

- a/ Présentation
- b/ Résultats
- c/ Conclusions

IV - MISE AU POINT D'UN MODE OPERATOIRE POUR LA DETECTION DES HYDROCARBURES

- a/ Calculs
- b/ Comparaison de la théorie et de l'expérience
- c/ Mode opératoire proposé

Chapitre V : MESURES EN MER

I - INTRODUCTION

II - INFLUENCE DE LA NON PLANEITE DE LA SURFACE VISEE

III - EXPERIENCE EFFECTUEE A BORD DU NAVIRE METEOROLOGIQUE STATIONNAIRE

FRANCE II

- a/ Présentation
- b/ Dispositif expérimental
- c/ Résultats

Chapitre VI : ETUDE DE L'INFLUENCE DU VENT ET DU FLUX PERDU PAR LA SURFACE DE L'EAU SUR LE REFROIDISSEMENT SUPERFICIEL

I - INTRODUCTION

II - RAPPELS

- a/ Variation du refroidissement superficiel en fonction du flux perdu par la surface d'une nappe d'eau
- b/ Variation du refroidissement superficiel en fonction de la vitesse du vent

III - EXPERIENCE EN SOUFFLERIE

- a/ Présentation
- b/ Dispositif expérimental
- c/ Calculs préliminaires
- d/ Expérience réalisée
- e/ Résultats

IV - CONCLUSION

INTRODUCTION

La mesure de la température de surface de l'océan est une donnée importante, que ce soit pour les océanographes, les physiciens et les météorologistes qui veulent étudier les échanges océan atmosphère (ref.1) ou pour les pêcheurs (ref.2).

La température d'une masse d'eau, qui cède de l'énergie à l'air ambiant (évaporation, chaleur sensible et rayonnement), présente un gradient vertical; La température des quelques microns du sommet de la couche peut être sensiblement plus froide que celle de la masse, c'est cette température de surface qui intervient dans les échanges océan atmosphère, c'est donc cette température que nous voulons mesurer.

Les différentes méthodes couramment utilisées (thermomètre dans un seau calorifugé ou dans la prise d'eau du condenseur des machines) permettent de mesurer la température de l'océan à une profondeur comprise entre 0,5 m et 3 m environ, nous n'aurons donc pas la température superficielle; En outre les mesures par ces moyens nécessitent la présence d'un navire, ce qui rend difficile le traçage de cartes thermiques.

Ces deux inconvénients ont contribué au développement, au cours des dix dernières années, des levés aériens de température par radiométrie infrarouge; Cette méthode donne la température superficielle et permet d'obtenir des cartes thermiques couvrant de larges zones. Elle présente par contre des inconvénients spécifiques :

- La transmission imparfaite de l'atmosphère, pour le rayonnement infrarouge, introduit une erreur qui est d'autant plus importante que la distance entre la source visée et le radiomètre est plus grande. Une équipe du laboratoire travaille, en collaboration avec le Centre d'Etude de Météorologie Spatiale, à la mise au point d'un programme de calcul permettant la correction de cette erreur. Nous nous sommes placé, pour ce travail, dans des conditions où l'erreur de transmission peut être négligée, le trajet entre la source, dont nous cherchons à mesurer la température, et le radiomètre étant faible (quelques mètres au maximum).

- La reflexion sur la surface de l'océan, d'une partie du rayonnement émis par le ciel et l'atmosphère, rend les mesures imprécises (ref. 4,5 et 6). La mise au point d'une méthode permettant de corriger cette erreur forme l'essentiel de ce travail; Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un radiomètre infrarouge polarisé (RALI).

Dans le premier chapitre nous rappellerons le principe de la mesure radiométrique de la température, nous étudierons ensuite (chapitre II) la possibilité de corriger l'erreur de reflexion en adjoignant un polariseur au radiomètre; Une fois les calculs faits nous avons vérifié en laboratoire les résultats obtenus, ceci fera l'objet du chapitre III. Le chapitre IV traite de la détection des hydrocarbures au moyen d'un radiomètre polarisé et le chapitre V des essais en mer de ce radiomètre. Enfin le chapitre VI est consacré à l'étude en soufflerie, au moyen du radiomètre, de la formation d'une couche froide superficielle en fonction du flux perdu par la mer et de la vitesse du vent.

CHAPITRE I

PRINCIPE DU RADIOMETRE INFRAROUGE

I PRINCIPE DE LA MESURE RADIOMETRIQUE

Un corps noir dont la température est différente de 0 K émet un rayonnement, l'énergie émise sous cette forme est donnée par la formule de PLANCK :

$$I_{\lambda}(T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{h \cdot c}{k \lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (I-1)$$

I = énergie émise

h = constante de PLANCK

λ = longueur d'onde

k = constante de STEPHAN

T = température du corps noir

c = vitesse de la lumière

La courbe représentant l'énergie émise ($I_{\lambda}(T)$) en fonction de la longueur d'onde est représentée sur la figure 1, pour un corps noir à la température de 300 K. La mesure de l'énergie émise dans une bande de longueur d'onde connue permet donc de déterminer la température de la source.

Pour des températures voisines de 300 K le maximum d'émission se place vers 10 μm , nous utiliserons donc des filtres centrés sur cette longueur d'onde qui correspond de plus à une fenêtre d'absorption atmosphérique.

II DESCRIPTION SOMMAIRE DU RADIOMETRE REALISE A LILLE

Le schéma de principe de l'appareil est représenté sur la figure 2. Le rayonnement issu de la source dont nous voulons mesurer la température (1) est envoyé sur le détecteur dans un premier temps, dans un second temps le détecteur reçoit le rayonnement provenant du corps noir interne (2). Ce cycle est assuré par un modulateur dont la fréquence de rotation est de 8,33 Hz.

L'angle d'ouverture du radiomètre est de 10°, sa constante de temps est de l'ordre de 10 s.

Une étude approfondie du radiomètre est donnée dans la référence 11 et nous ne rappellerons ici que quelques caractéristiques essentielles.

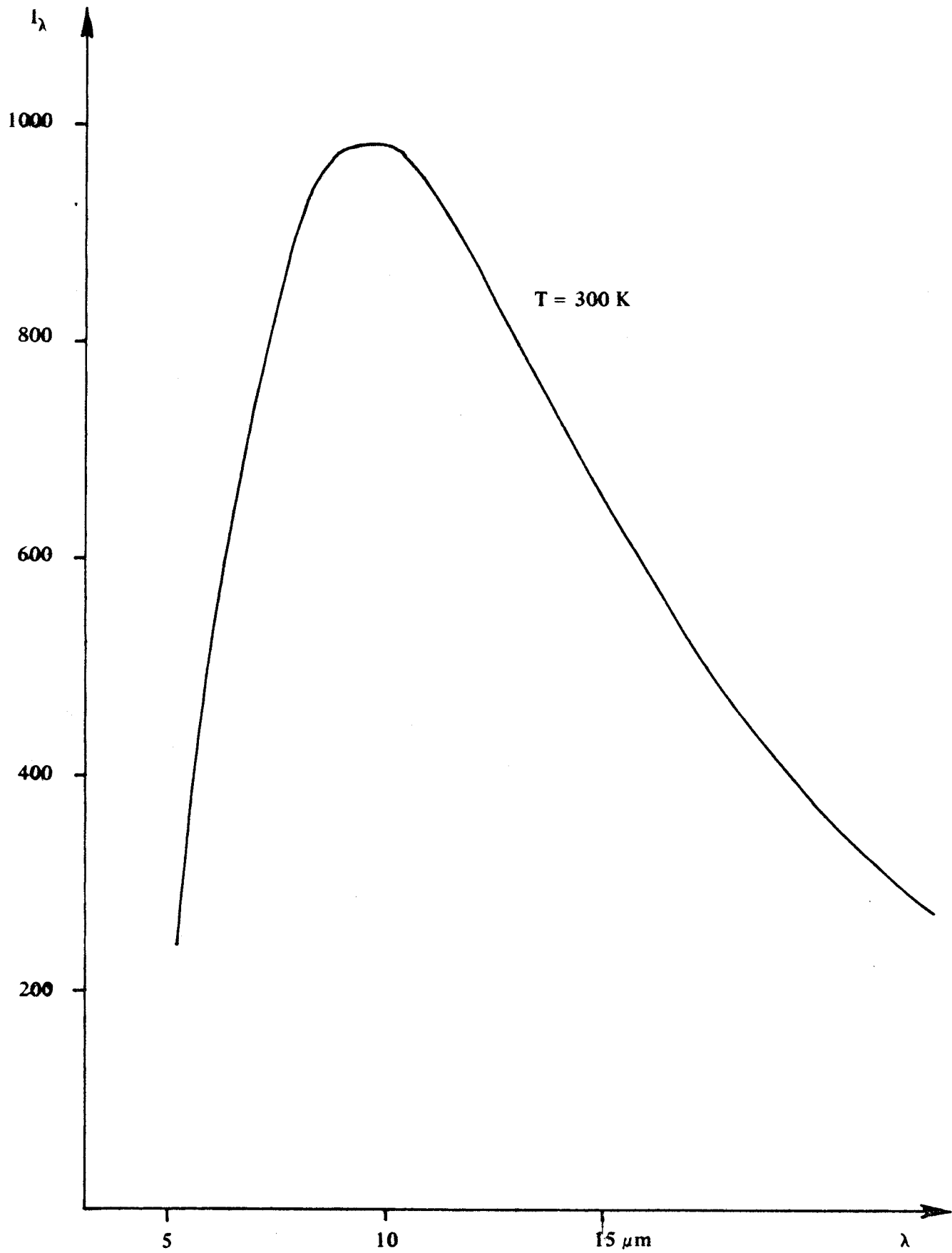
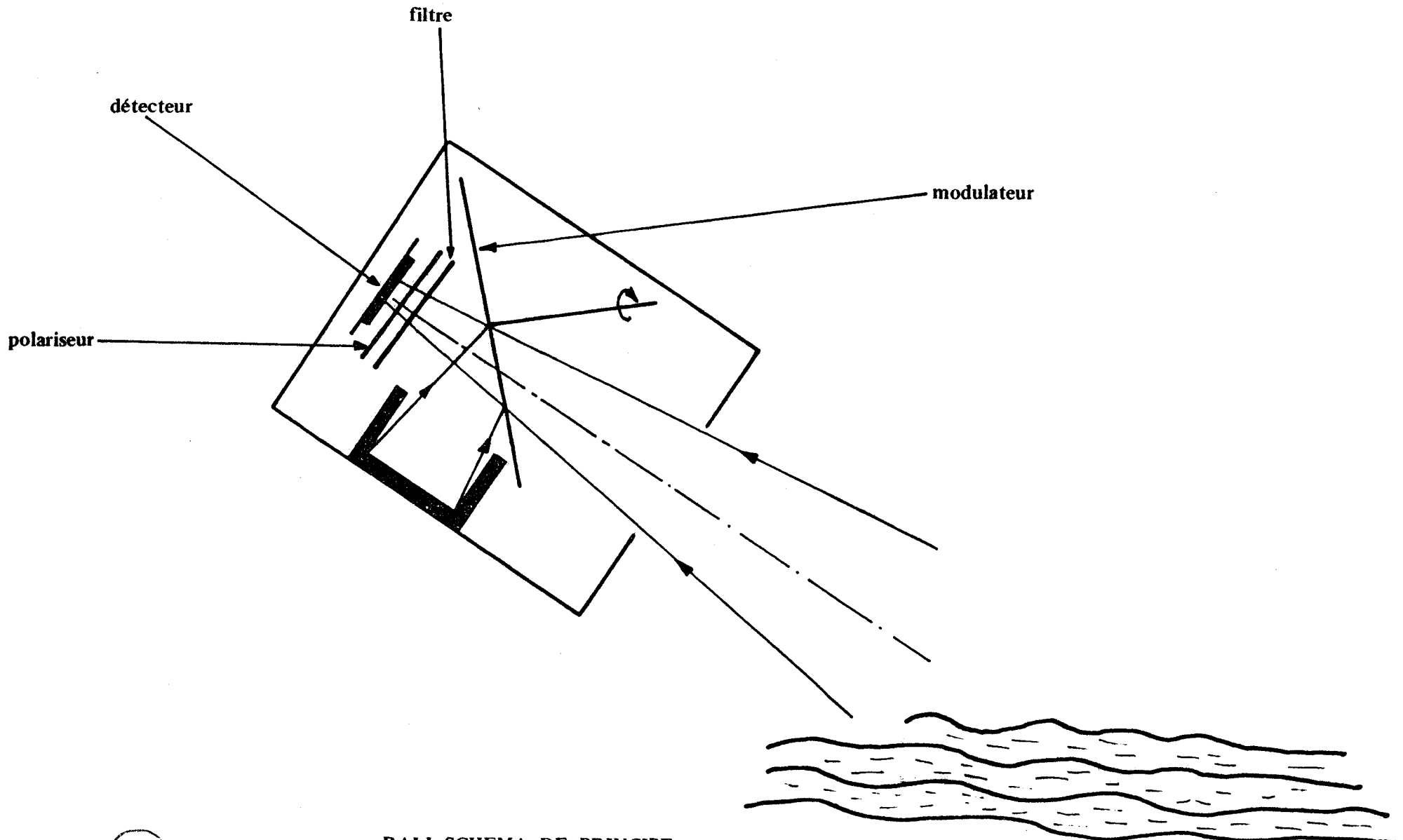


Figure 1





RALI SCHEMA DE PRINCIPE

Figure 2



a/ Le detecteur

Le detecteur, de type pyroélectrique, reçoit alternativement les rayonnements issus d'une part du corps noir de référence et d'autre part de la source dont la temperature est à mesurer. L'amplitude du signal obtenu après amplification et detection varie en fonction de la différence de temperature entre corps noir et source (T_{CN} et T_M). La tension délivrée par le detecteur est :

$$V_d = k \cdot \alpha \cdot (T_{CN}^4 - T_M^4) \quad \text{où} \quad \alpha = \frac{S \cdot \Delta\omega \cdot p \cdot \sigma}{\pi} \quad (I - 2)$$

k = sensibilité du detecteur

S = surface sensible du detecteur

$\Delta\omega$ = angle solide de visée

σ = constante de STEPHAN BOLTZMANN

$$p = \text{facteur de filtre} = \frac{\int_0^{\tau} I_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda}$$

b/ Le modulateur

Il permet d'envoyer alternativement sur le detecteur le rayonnement issu du corps noir et celui provenant de la surface (source) dont nous voulons mesurer la temperature. Ce modulateur est composé de deux secteurs métalliques dont les surfaces sont recouvertes d'une pellicule d'or. Cette pellicule d'or assure un pouvoir reflecteur élevé dans la bande de fréquence choisie. La fréquence de modulation a pour valeur 8,33 Hz.

c/ Le corps noir de référence (ref. 10)

L'erreur (ΔT) sur la détermination de la temperature de la source, due à une variation (Δk) de la sensibilité du detecteur est minimum si la temperature du corps noir est très peu différente de celle de la source. La méthode la plus précise serait donc d'utiliser un corps noir de référence dont la temperature serait asservie à celle de la source (ref. 10). Cet asservissement n'ayant pu être réalisé pour des raisons techniques, nous avons utilisé un corps noir dont la temperature, régulée

par chauffage et refroidissement, peut être fixée au gré de l'expérimentateur. Cette température sera choisie de telle sorte qu'elle soit la plus proche possible de celle de la source.

Dans les radiomètres réalisés précédemment l'écart entre T_{CN} et T_M était important (de l'ordre de $50^{\circ}C$) ce qui introduisait des erreurs importantes.

d/ Le filtre

Les filtres utilisés sont fixés sur un barillet ce qui nous permet d'utiliser plusieurs filtres au cours d'une même manipulation. Les bandes passantes les plus utilisées sont $8 \mu m - 12 \mu m$ et $8 \mu m$ et $15 \mu m$ elles correspondent en effet à la fenêtre atmosphérique.

Les coefficients de transmission de ces filtres ont été reportés sur la figure 3.

Dans les calculs où nous avons eu besoin des transmissions nous avons découpé les bandes passantes en tranches de $0,1 \mu m$ ce qui nous a permis de rendre de façon satisfaisante l'allure générale des courbes.

e/ Le polariseur

Il constitue une différence importante entre RALI et les radiomètres courants.

Il nous permet d'éliminer presque totalement une direction de polarisation ; nous l'avons placé de telle sorte que tout rayonnement tombant sur le détecteur soit passé au travers, nous éliminons ainsi l'influence de sa transmission qui est de 75% environ pour $8 \mu m < \lambda < 15 \mu m$

Ce polariseur, constitué de grilles d'or, donne une polarisation

$$\frac{I_{II} - I_I}{I_{II} + I_I} = 0,996 \text{ pour la bande de longueur d'onde utilisée.}$$

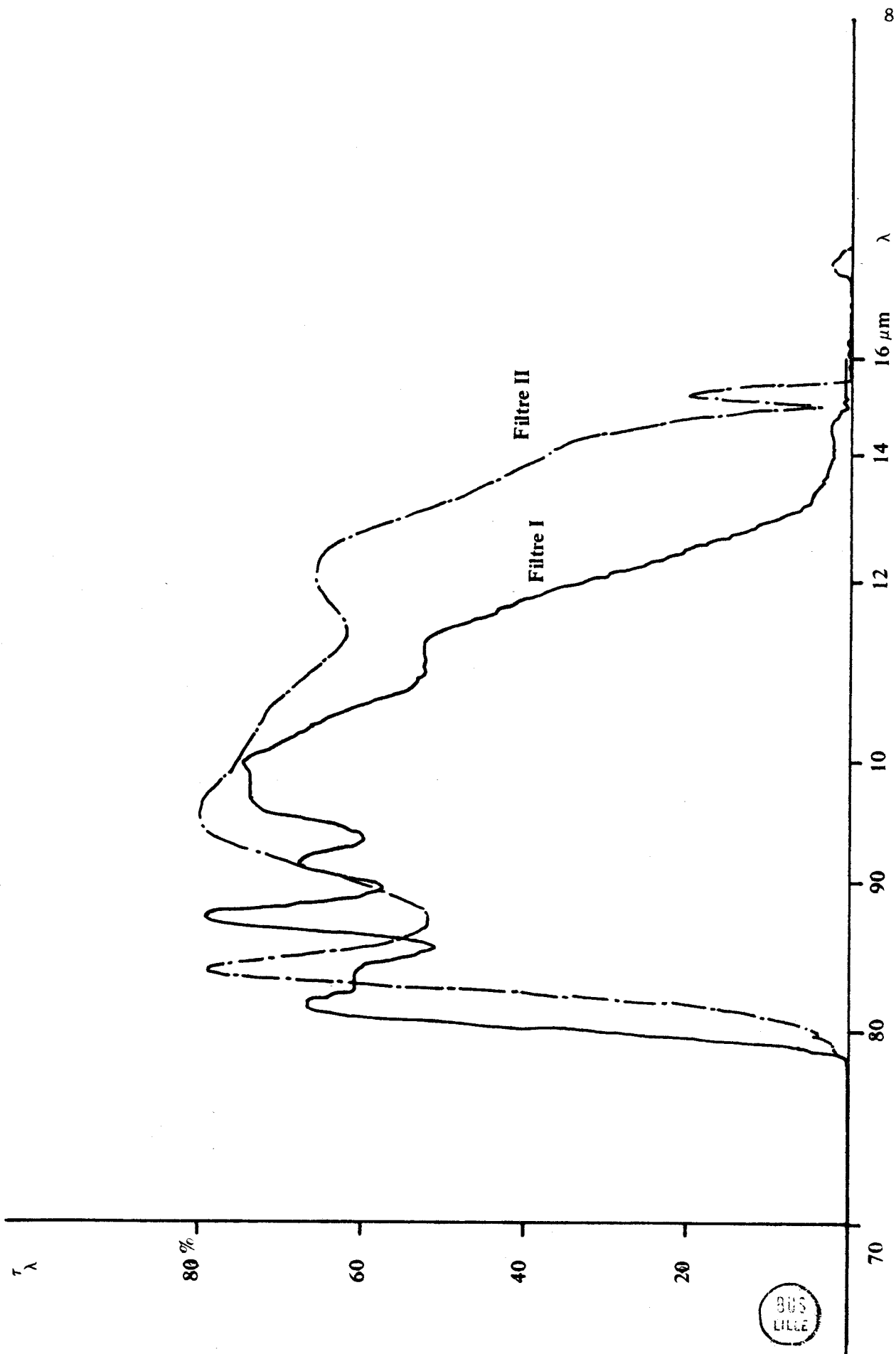


Figure 3



CHAPITRE II

PRINCIPE DE LA MESURE DE LA TEMPERATURE DE L'EAU
AVEC UN RADIOMETRE POLARISE

Nous allons faire, dans un premier temps, quelques calculs qui nous permettront de donner un ordre de grandeur des erreurs que nous voulons supprimer. Nous supposerons que nous mesurons la température d'une surface d'eau plane, l'effet dû à l'agitation de la surface de l'eau sera abordé dans le chapitre IV.

I MISE EN EVIDENCE DE L'ERREUR DE REFLEXION

Nous avons vu que l'on peut déterminer la température d'un corps noir en mesurant l'énergie qu'il émet dans une bande de fréquence connue. Pour notre problème qui est la mesure de la température de l'eau il apparaît une difficulté due au fait que l'eau n'est pas un corps noir parfait; L'émissivité de l'eau est légèrement différente de 1, soit ϵ_λ cette émissivité.

Le rayonnement capté par le radiomètre à la longueur d'onde sera donc :

$$I'_\lambda(T) = \epsilon_\lambda(i) I_\lambda(T) + (1 - \epsilon_\lambda(i)) I_{\lambda s}(i) \quad (II-1)$$

i = angle de visée

ϵ_λ = émissivité spectrale de l'eau

T = température de l'eau

$I_{\lambda s}(i)$ = luminance spectrale du ciel dans la direction i

$I_\lambda(T)$ = luminance de l'eau à la température T

Nous pouvons écrire cette équation sous la forme

$$\begin{aligned} I'_\lambda(T) &= I_\lambda(T) - (\epsilon_\lambda(i)) (I_\lambda(T) - I_{\lambda s}(i)) \\ &= I_\lambda(T) - R_\lambda(i) \cdot (I_\lambda(T) - I_{\lambda s}(i)) \end{aligned} \quad (II-2)$$

$R_\lambda(i) = 1 - \epsilon_\lambda(i)$ = coefficient de réflexion de l'eau pour la longueur d'onde λ , le calcul de ce coefficient est fait dans l'annexe.

Le rayonnement total reçu par le radiomètre sera donc

$$I'(T) = I(T) - \int_0^\infty \tau_\lambda \cdot R_\lambda(i) \cdot (I_\lambda(T) - I_{\lambda s}(i)) \cdot d\lambda \quad (II-3)$$

τ_λ = transmission du filtre placé dans le radiomètre.

La mesure de $I'(T)$ conduit, en se rapportant à l'étalonnage effectué à l'aide d'un corps noir, à une température radiométrique apparente de l'eau T_{rad} définie par $I'(T) = I(T_{rad})$; Nous pouvons alors définir une erreur

$$\Delta T_{ref} = T_{rad} - T \quad (II-4)$$

En utilisant un développement limité au premier ordre au voisinage de T on obtient

$$I'(T) - I(T) = I(T_{rad}) - I(T) = T_{rad} - T \cdot \frac{dI}{dT} = \Delta T_{ref}(i) \int_0^\infty \tau_\lambda \frac{dI_\lambda(T)}{dT} d\lambda \quad (II-5)$$

en comparant (II-3) et (II-5) il vient

$$\Delta T_{ref}(i) = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda \cdot R_\lambda(i) \{I_\lambda(T) - I_{\lambda_s}(i)\} d\lambda}{\int_0^\infty \tau_\lambda \frac{dI_\lambda}{dT}(T) d\lambda} \quad (II-6)$$

La mesure précise de la température de surface de l'océan exige donc la connaissance de ΔT_{ref} , ce qui revient à connaître

$$\Delta W \cdot \bar{R}(i) = \int_0^\infty \tau_\lambda R_\lambda(i) (I_\lambda(T) - I_{\lambda_s}(i)) d\lambda$$

avec

$$\Delta W = \int_0^\infty \tau_\lambda (I_\lambda(T) - I_{\lambda_s}(i)) d\lambda \quad (II-7)$$

Il faut donc faire une mesure annexe de $(I_\lambda(T) - I_{\lambda_s}(i))$ ou approximativement de ΔW .

Il serait intéressant d'annuler ou d'affaiblir notablement le ΔT_{ref} ceci permettant de supprimer les mesures auxiliaires ; nous allons voir que l'emploi d'un radiomètre polarisé permet en théorie de parvenir à ce résultat.

II AMELIORATION APPORTEE PAR LA POLARISATION

Nous supposons le rayonnement du ciel non polarisé. Après réflexion sur la surface de l'océan le rayonnement se trouve être polarisé en partie. Le procédé classique pour traiter la réflexion d'une

onde sur une surface consiste à décomposer l'onde en deux composantes, l'une parallèle au plan d'incidence et l'autre perpendiculaire, nous appellerons R_{λ}^{\perp} et R_{λ}^{\parallel} les coefficients monochromatiques de réflexion relatifs à chacune de ces vibrations.

Nous introduisons un polariseur dans le radiomètre en supposant ce polariseur parfait et ne transmettant que la vibration dans le plan d'incidence, l'erreur sur la mesure sera alors

$$\Delta T_{\text{ref}}^{\perp}(i) = \frac{\int_{\tau_{\lambda}}^{\infty} R_{\lambda}^{\perp}(i) \cdot (I_{\lambda}(T) - I_{\lambda S}(i)) \cdot d\lambda}{\int_{\tau_{\lambda}}^{\infty} \frac{dI_{\lambda}(T)}{dT} \cdot d\lambda} \quad (\text{II-8})$$

en effet le raisonnement fait pour un radiomètre non polarisé reste valable. Grâce à l'expression (II-8) nous pouvons définir un facteur de diminution d'erreur

$$\beta_{\lambda}(i) = \frac{\Delta T_{\text{ref}}^{\perp}(i)}{\Delta T_{\text{ref}}^{\perp}(0)} \quad (\text{II-9})$$

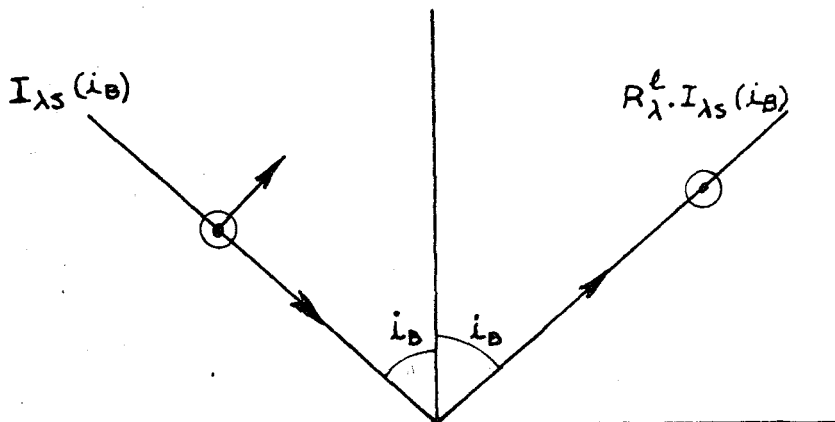
dans cette expression $\Delta T_{\text{ref}}^{\perp}(0)$ est l'erreur commise lorsque le radiomètre non polarisé vise l'eau sous une incidence normale.

En travaillant avec le radiomètre incliné de telle sorte que

$$i = i_B \approx 50^{\circ}$$

i_B = angle de BREWSTER

il est possible théoriquement de minimiser R_{λ}^{\perp} et donc d'obtenir $\Delta T_{\text{ref}}^{\perp}(i_B)$ proche de 0.



Il faut remarquer que, dans l'infrarouge, l'angle de BREWSTER, dont la valeur reste à peu près identique à celle obtenue dans le visible, ne correspond pas à un minimum nul ; ceci étant dû au fait que le coefficient d'absorption de l'eau est différent de zéro (annexe, i) Le facteur d'amélioration $\beta^{\ell}(i)$ a pour expression d'après (II-6) et (II-8)

$$\beta^{\ell}(i) = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} \cdot R_{\lambda}^{\ell} \cdot (I_{\lambda}(T) - I_{\lambda S}(i)) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} R_{\lambda}^{\ell}(0) \cdot (I_{\lambda}(T) - I_{\lambda S}(0)) \cdot d\lambda} \quad (\text{II-10})$$

Ce facteur représente le rapport de l'erreur faite avec un radiomètre polarisé, visant sous l'incidence i , à l'erreur faite avec un radiomètre non polarisé visant à la verticale (c'est à dire dans la meilleure position possible).

Nous avons aussi défini un facteur $\beta^r(i)$, le polariseur étant orienté de façon qu'il laisse passer la vibration perpendiculaire au plan d'incidence :

$$\beta^r(i) = \frac{\Delta T_{\text{ref}}^r(i)}{\Delta T_{\text{ref}}^r(0)} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} \cdot R_{\lambda}^r(i) \cdot (I_{\lambda}(T) - I_{\lambda S}(i)) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} \cdot R_{\lambda}^r(0) \cdot (I_{\lambda}(T) - I_{\lambda S}(0)) \cdot d\lambda} \quad (\text{II-11})$$

$T_{\text{ref}}^r(i)$ est défini par une relation analogue à (II-8).

Nous avons mis au point un programme qui nous permet de calculer les différentes grandeurs qui nous intéressent : $\Delta T^{\ell}, \Delta T^r, \beta^{\ell}, \beta^r$ en fonction de l'angle d'incidence i et pour les filtres $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ et $8 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$. Dans un premier temps nous avons pris comme luminance du ciel celle d'un corps noir, ceci est évidemment un cas tout à fait particulier n'ayant que peu de rapport avec la réalité, mais c'est la seule façon de vérifier la validité de la théorie que nous avons faite ; il est en effet plus facile de réaliser expérimentalement un ciel qui rayonne comme un corps noir que de mettre au point un modèle mathématique d'un ciel réel simple d'emploi pour le calcul.

III RESULTATS THEORIQUES

Nous avons porté sur la figure 4 les ΔT^l calculés pour différentes températures d'eau, la luminance du ciel étant celle d'un corps noir à 320 K, pour un filtre de bande passante $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$. Les ΔT^l ont été portés en fonction de l'angle d'incidence i .

Les courbes portées sur la figure 5 nous donnent les mêmes ΔT^l pour un filtre de bande passante $8-15 \mu\text{m}$.

Les différentes courbes $\Delta T^l = f(i)$ présentent toutes un minimum marqué correspondant à l'angle de BREWSTER. Il faut noter que ce minimum n'est pas nul, l'erreur due à la réflexion ne pourra donc pas être annulée totalement.

La température du ciel a été fixée dans tous les calculs à 320 K, cette température correspond à celle de la plaque noire utilisée comme ciel au cours de nos expériences.

L'écart entre la température réelle et la température radiométrique apparente croît de façon importante avec la différence entre les températures du ciel et de l'eau ; elle passe par exemple de $0,31^\circ\text{C}$ pour $T_{\text{ciel}} - T_{\text{eau}} = 24^\circ\text{C}$ à $0,56^\circ\text{C}$ pour $T_{\text{ciel}} - T_{\text{eau}} = 40^\circ\text{C}$, ceci pour une incidence nulle et pour un filtre de bande passante $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$.

En comparant les courbes obtenues, pour des températures d'eau et de ciel identiques, avec des filtres différents (fig. 6 et 7), nous pouvons constater que le minimum est nettement moins prononcé pour le filtre $8 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$ que pour le filtre $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$, il semble donc intéressant de travailler avec ce dernier ; il faut cependant remarquer que l'énergie reçue avec le filtre $8 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$ est plus importante, la mesure de la température sera donc plus précise avec ce filtre, pour cette raison nous avons continué les manipulations avec les deux filtres.

Quelques soit le filtre choisi il faut noter que l'écart entre la température apparente et la température réelle de l'eau, croît de façon très importante dès que l'on dépasse une incidence de 55° environ.

Nous avons porté les ΔT^r calculés pour différentes températures d'eau, la luminance du ciel étant celle d'un corps noir à la température de 320 K, sur la figure 8 pour un filtre de bande passante $8-12 \mu\text{m}$ et sur la figure 9 pour un filtre de bande passante $8-15 \mu\text{m}$.

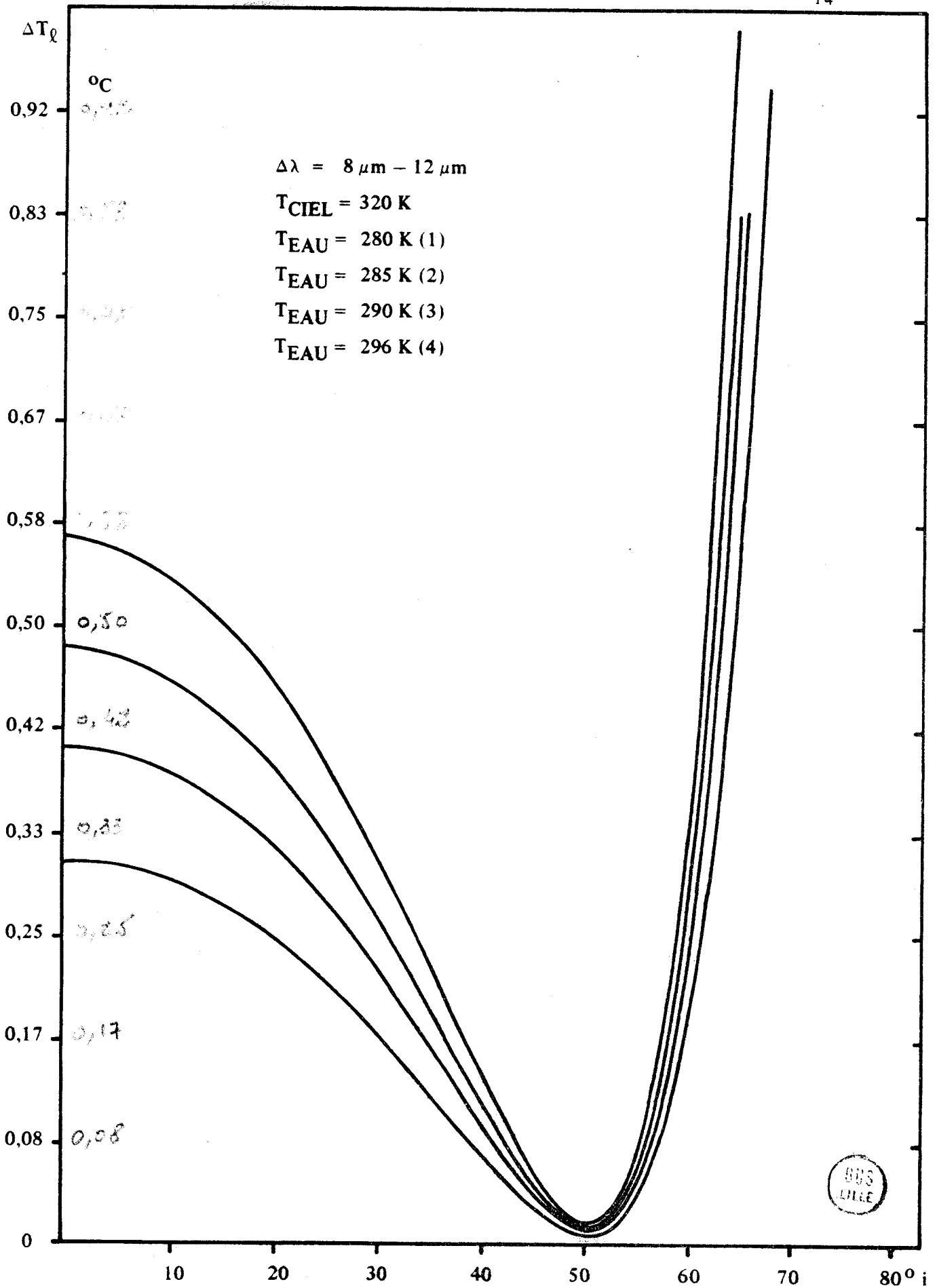


Figure 4

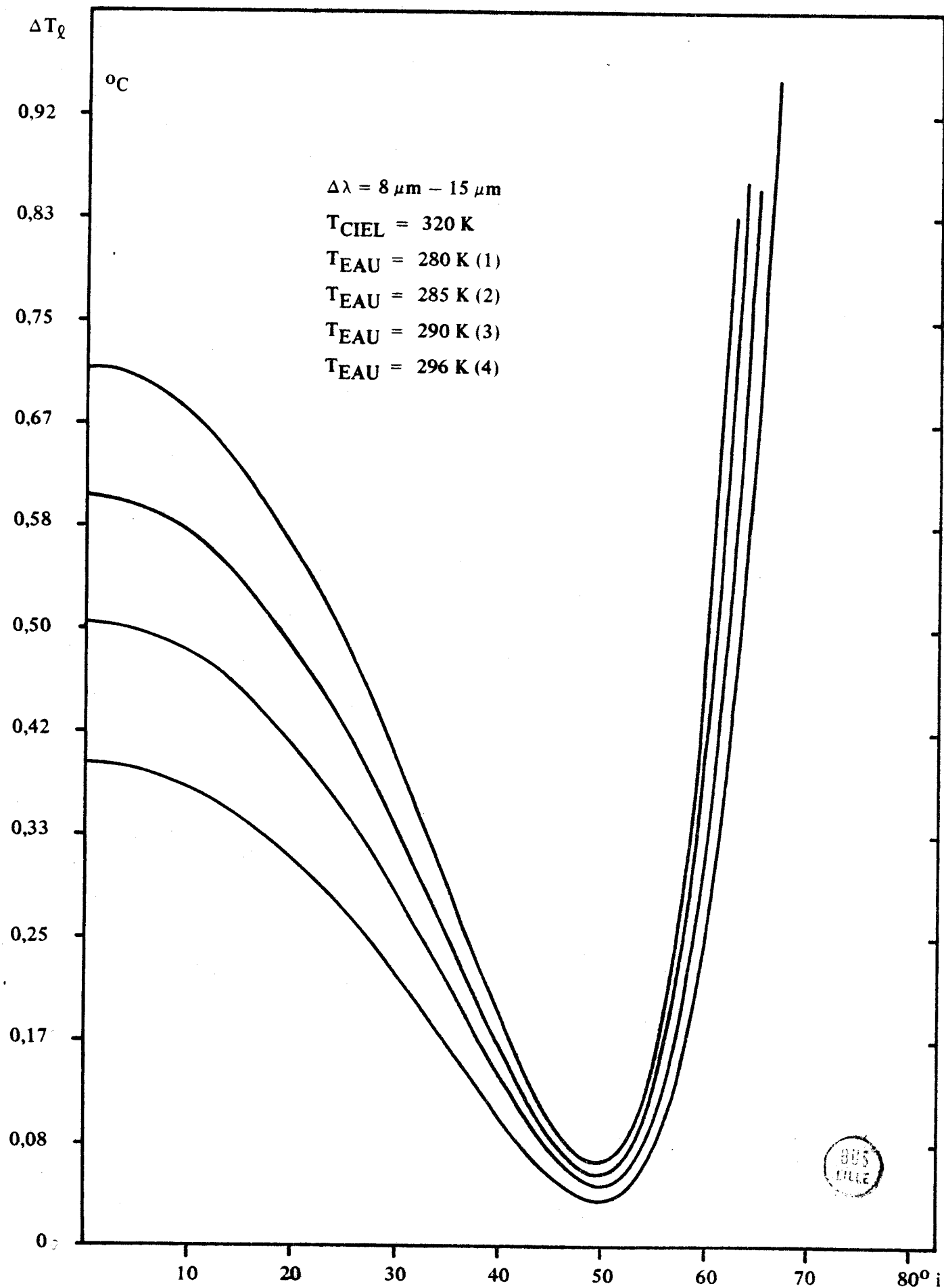


Figure 5

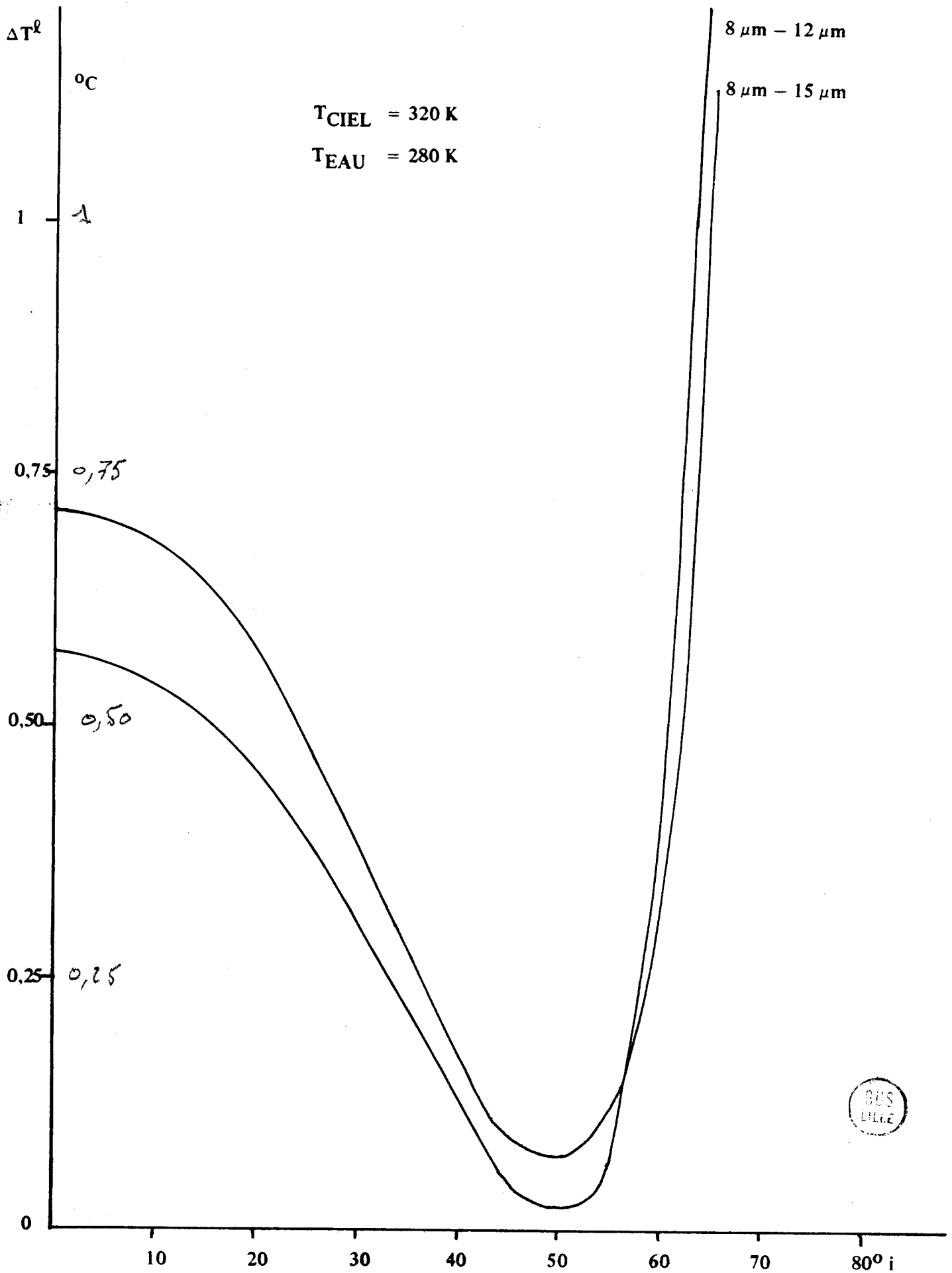


Figure 6

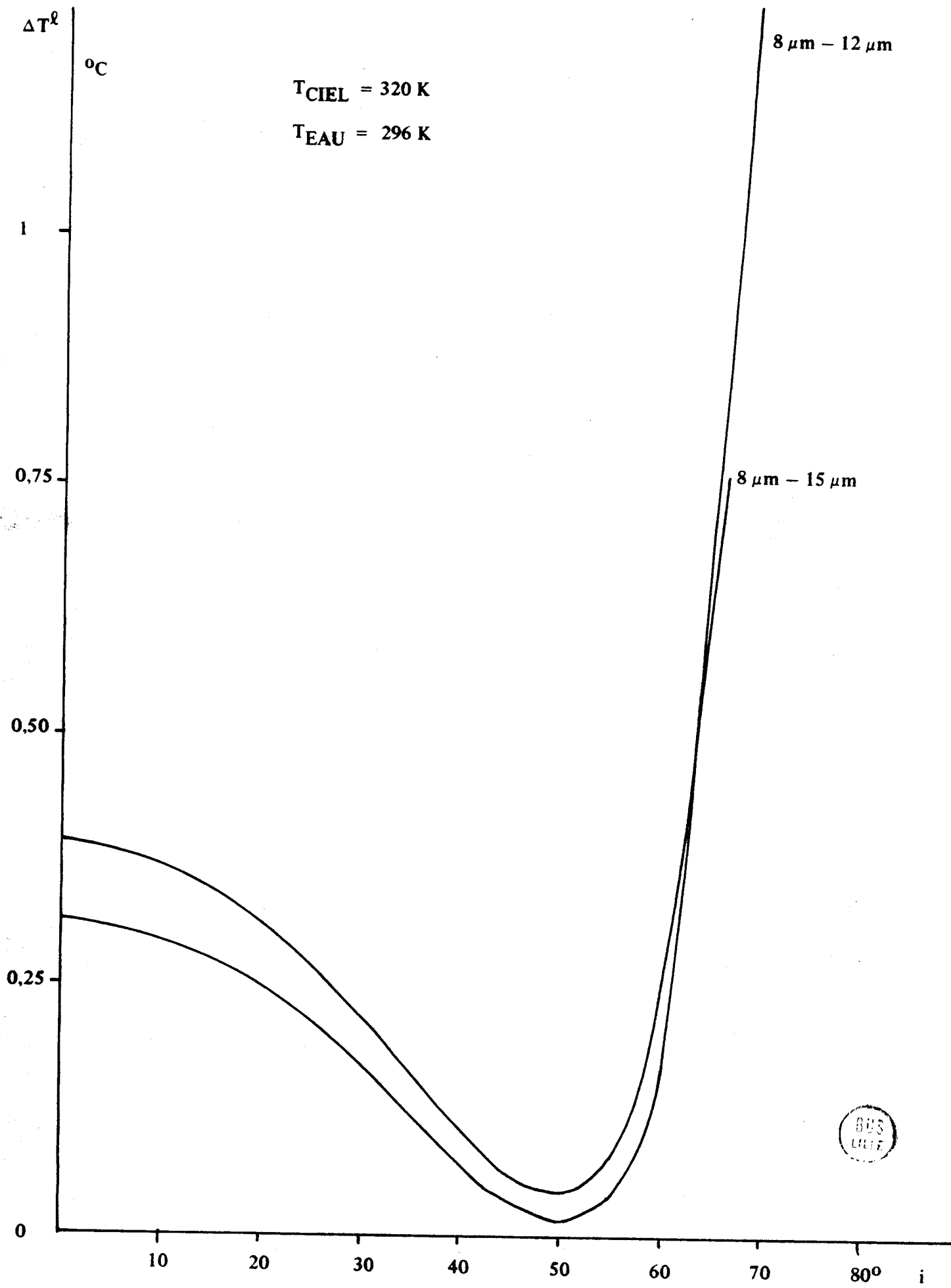


Figure 7

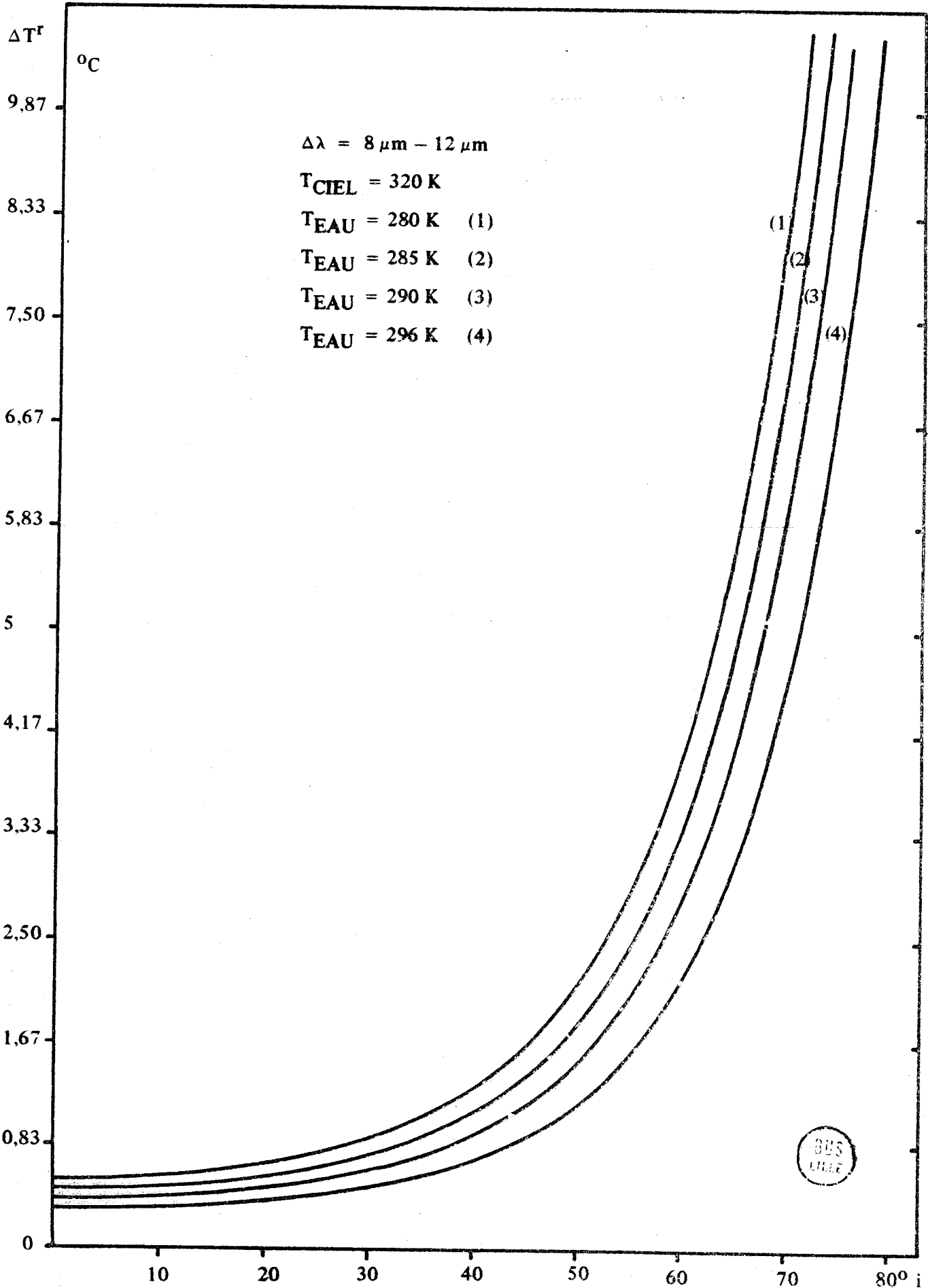


Figure 8

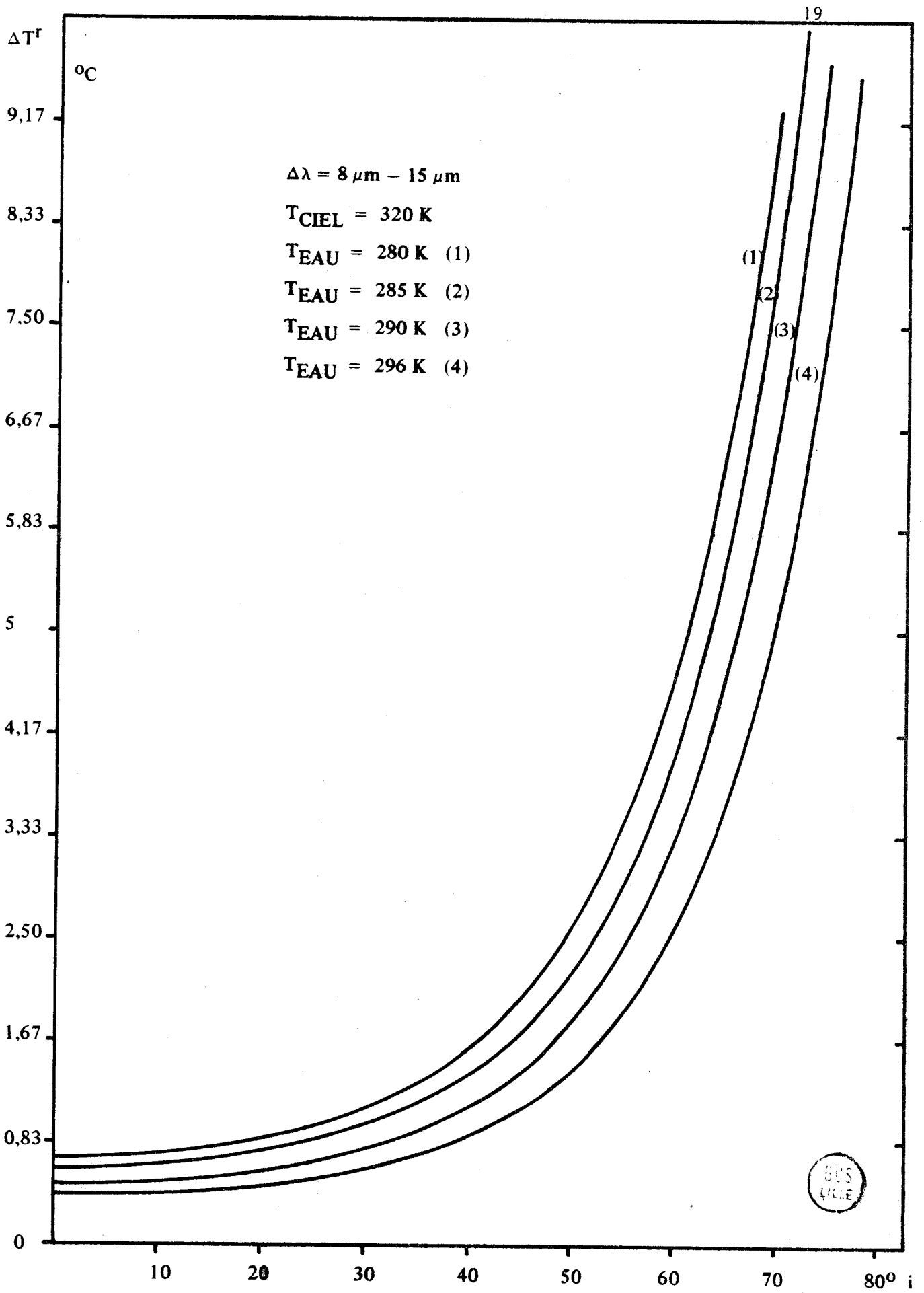


Figure 9

Il nous faut tout d'abord remarquer que les ΔT^r sont beaucoup plus important que les ΔT^l dès que l'on dépasse une incidence de 30° environ. Nous pouvons aussi remarquer que pour des incidences supérieures à 55° la pente de la courbe $\Delta T^r = f(i)$ est très grande, nous devons donc nous attendre au cours des manipulations à des difficultés lors de la mesure de ΔT^r avec de grandes incidences ; en effet une légère agitation de l'eau produira autour de l'angle d'incidence moyen des variations qui seront suffisantes pour troubler totalement la mesure de température. Nous avons porté sur les figures 10 et 11 les courbes obtenues avec des températures d'eau et de ciel identiques mais pour deux filtres différents ($8-12 \mu\text{m}$ et $8-15 \mu\text{m}$).

IV - COMPARAISON DES RESULTATS THEORIQUES EN RADIOMETRIE POLARISEE ET NON POLARISEE

Sur les figures 12 et 13 nous avons porté les coefficients β^l en fonction de l'angle d'incidence, pour les filtres $8-12 \mu\text{m}$ et $8-15 \mu\text{m}$. Nous avons calculé β^l en fonction de l'angle d'incidence pour différentes températures réelles de l'eau, la température du ciel restant constante, et nous avons pu constater que la variation de β^l ne dépendait pas de l'écart de température entre le ciel et l'eau.

Nous pouvons constater qu'il existe sur les deux courbes une large zone ($0^\circ < i < 60^\circ$) où β^l est inférieur à l'unité, dans cette zone l'erreur faite avec un radiomètre polarisé orienté convenablement, est inférieure à l'erreur que ferait un radiomètre non polarisé visant à la verticale. Le minimum très marqué, pour une incidence proche de 50° du coefficient d'amélioration confirme les résultats obtenus pour les écarts entre les températures réelles et apparentes ΔT^l .

Il faut remarquer que quel que soit le filtre utilisé l'amélioration apportée est très importante, β^l est en effet inférieur à 0,1 ce qui signifie que l'erreur due à la réflexion pour une incidence de 50° avec un radiomètre polarisé est dix fois plus faible que l'erreur faite avec un radiomètre non polarisé visant à la verticale.

Les courbes portées sur les figures 12 et 13 ont la même allure, on peut néanmoins constater que le minimum est moins prononcé pour le filtre présentant la bande passante la plus large ($8-15 \mu\text{m}$) ; ce résultat semble confirmer ceux obtenus avec les écarts ΔT^l . Nous pouvons aussi constater la croissance très rapide de β^l dès que l'on dépasse l'angle

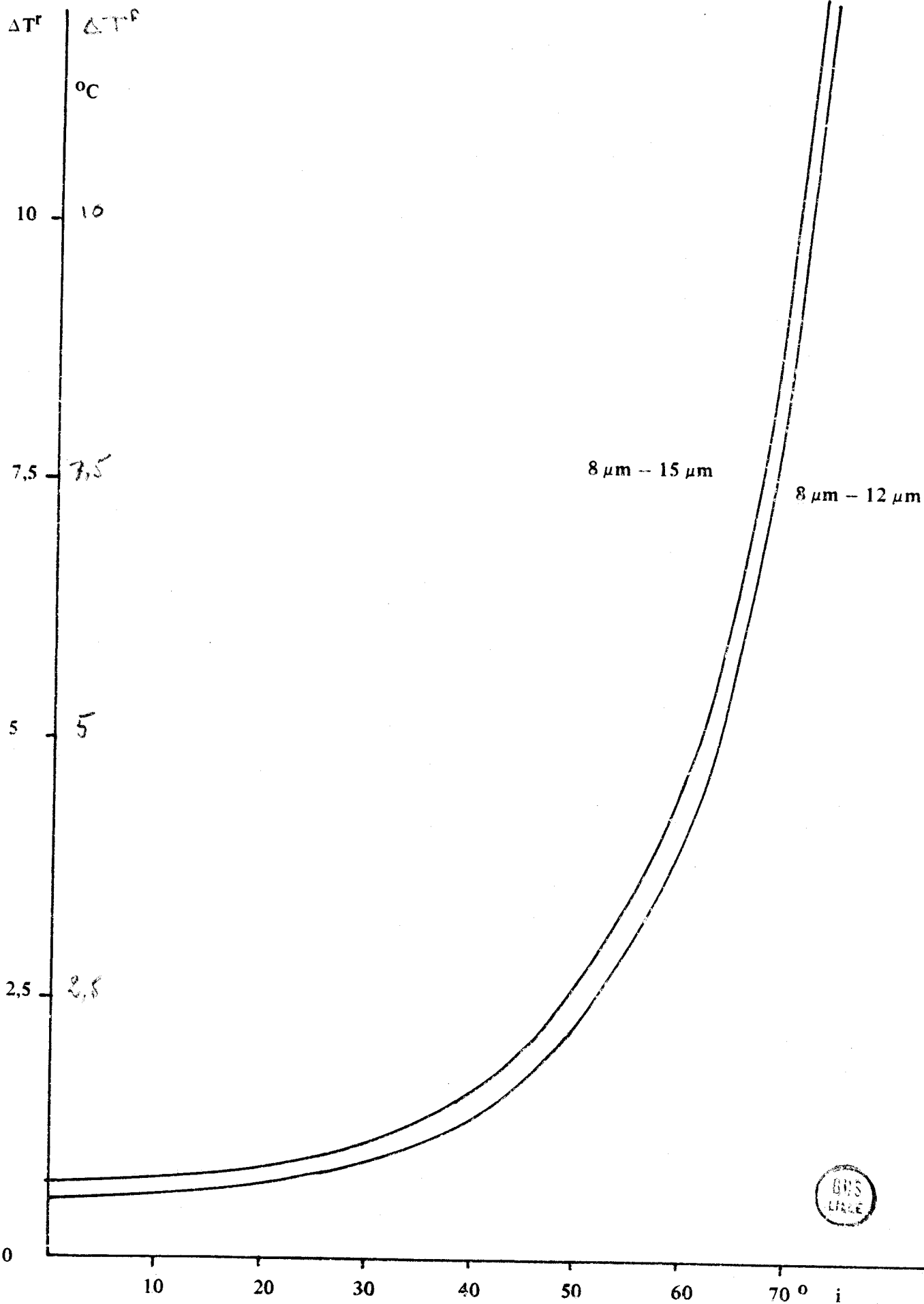


Figure 10

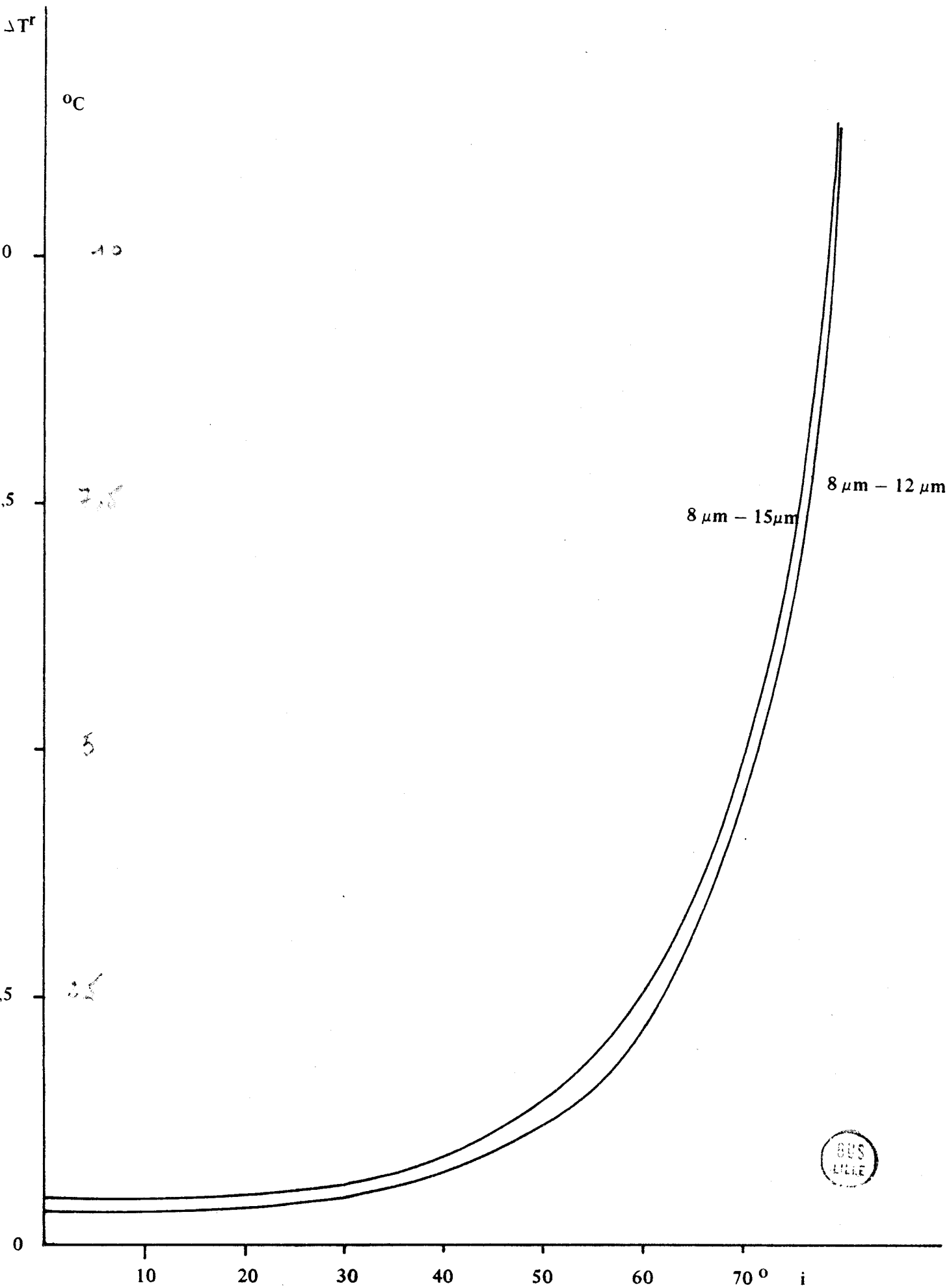


Figure 11

$$\Delta\lambda = 8\ \mu\text{m} - 15\ \mu\text{m}$$

β_ℓ 0,8
1,13
1
0,88
0,75
0,63
0,50
0,37
0,25
0,12

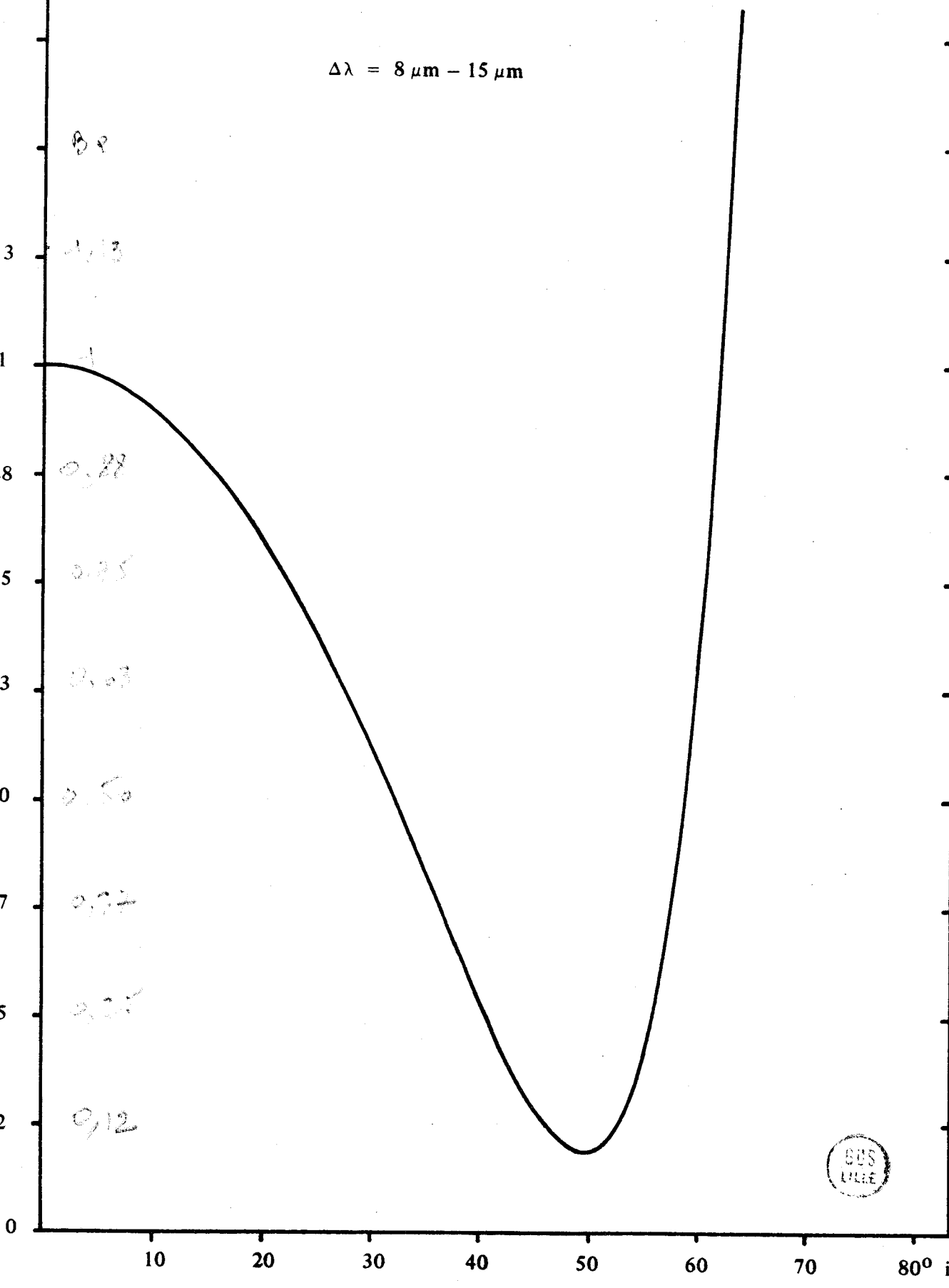


Figure 12

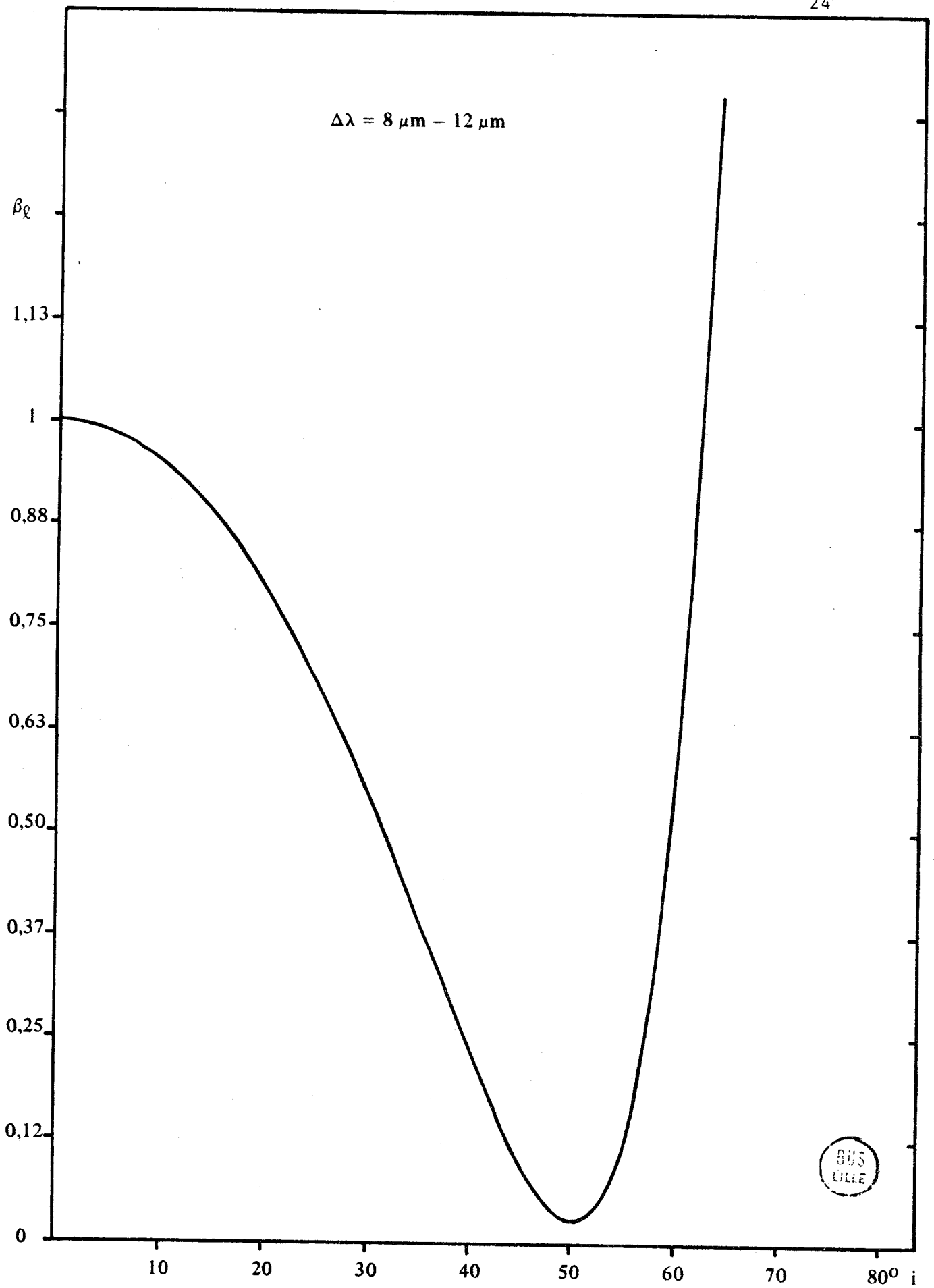


Figure 13

de Brewster. Ceci risque de poser un problème lors du choix de l'incidence la meilleure pour les mesures, nous risquons en effet d'obtenir des variations importantes de β^{ℓ} pour de faibles variations de l'angle d'incidence si nous nous plaçons à l'angle le plus favorable (la variation de l'angle d'incidence provenant essentiellement des vagues à la surface de l'eau). Il serait donc préférable de se placer à une incidence i légèrement inférieure à i_B .

CHAPITRE III

EXPERIENCES EN LABORATOIRE

I - EXPERIENCE VISANT A VERIFIER LES CALCULS

Nous avons procédé à des expériences en laboratoire préliminaire à l'essai dans des conditions réelles du radiomètre, afin de vérifier l'amélioration prévue par l'emploi d'un radiomètre polarisé.

a/ Dispositif expérimental (figure 14)

Nous avons utilisé au cours de cette expérience une surface d'eau limitée mais cependant suffisamment grande pour que les bords n'aient qu'une influence très faible sur la surface visée par le radiomètre ; cette limitation nous a néanmoins contraint à limiter nos angles de visée à $30 < i < 70^\circ$.

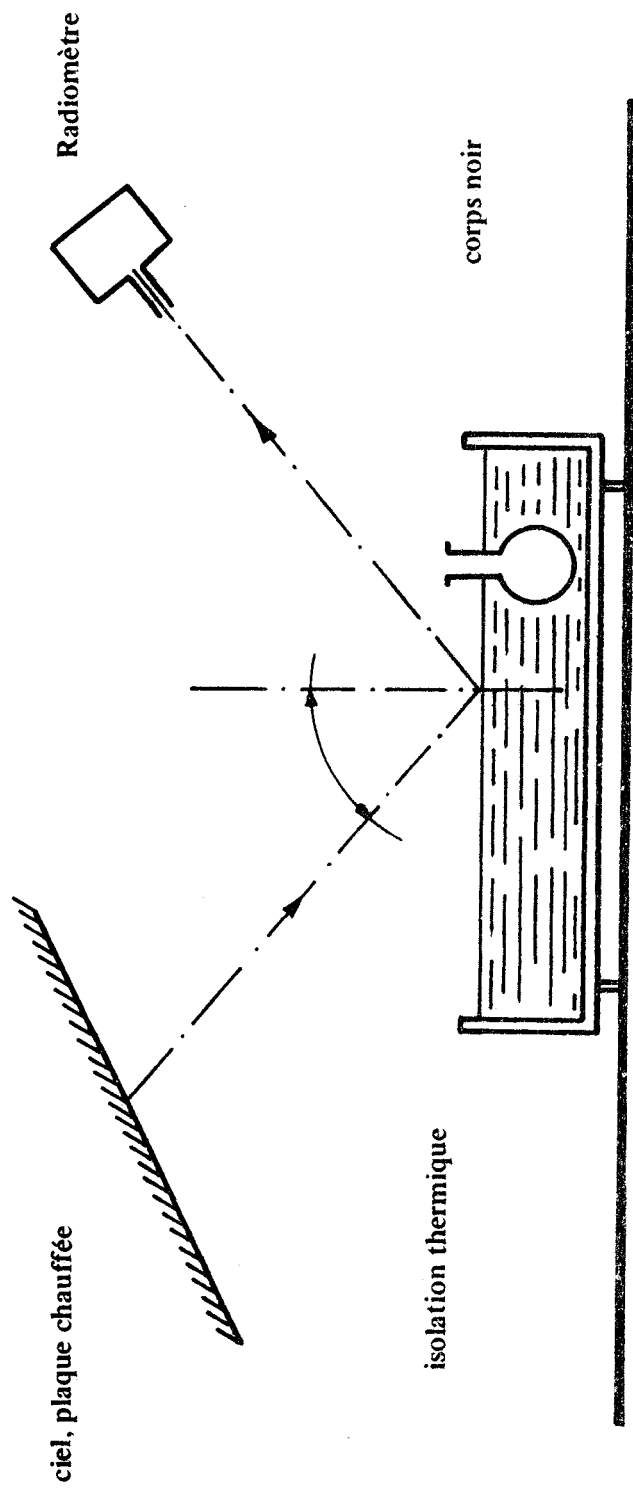
Cinq des faces du bac contenant l'eau dont nous voulions mesurer la température étaient isolées du sol et de l'air ambiant, de cette façon la température de l'eau restait à peu près constante au cours d'une série de mesures (1H environ).

Le ciel, dont une partie du rayonnement émis se réfléchit sur la surface de l'eau, était constitué par une plaque de métal recouverte d'une peinture très absorbante dans l'infrarouge ; nous avons obtenu grâce à ce procédé une luminance du ciel très proche de celle d'un corps noir ce qui nous était nécessaire pour tester notre modèle (cf p 9). La température du ciel a été mesurée et fixée à une valeur proche de celle utilisée pour les calculs.

Nous avons relevé au cours des manipulations la température réelle de l'eau à l'aide d'un thermomètre à quartz (réf. 13).

Le radiomètre nous donnait la température apparente de l'eau ; afin d'éviter l'apparition d'un refroidissement superficiel (réf. 14) une agitation était maintenue ; cette agitation était assez faible pour éviter de modifier l'angle de visée du radiomètre.

L'ensemble du radiomètre, et plus particulièrement le corps noir de référence, a été étudié pour présenter le moins de dérive possible dans le temps quelles que soient les conditions extérieures. Afin de vérifier cette stabilité nous avons procédé à des réétalonnages fréquents du radiomètre ; ces réétalonnages se font à l'aide d'un corps noir extérieur plongé dans l'eau dont la température peut être fixée à la valeur voulue. D'autre part, un corps noir annexe, immergé dans l'eau dont nous voulions mesurer la température, nous permet de vérifier entre chaque mesure, la



Dispositif expérimental

Figure 14

stabilité de l'étalonnage. Au cours des essais, les écarts sont toujours restés faibles (de l'ordre de $1.10^{-2}^{\circ}\text{C}$).

b/ Résultats expérimentaux

Nous avons réalisé plusieurs séries d'expériences avec le montage décrit précédemment. Nous ne présenterons ici que les résultats les plus significatifs.

Sur la figure 15 nous avons reporté les résultats expérimentaux obtenus avec un filtre de bande passante 8-12 μm , la température réelle de l'eau étant de 291 K et la température du ciel de 319 K.

Nous pouvons voir sur cette figure les courbes représentant les variations de ΔT^{ℓ} et de ΔT^r en fonction de l'angle d'incidence i .

La courbe ΔT^r qui ne présente aucun minimum, correspond à une position du polariseur telle qu'il laisse passer les ondes dont la direction de vibration est perpendiculaire au plan d'incidence.

Comme il nous était impossible, pour des raisons mécaniques de mesurer ΔT^{ℓ} ou ΔT^r pour $0 < i < 30^{\circ}$ les résultats ont été extrapolés à 0° en utilisant la relation assez bien vérifiée

$$\Delta T^r(o) = \Delta T(o) = \frac{\Delta T^{\ell}(35^{\circ}) + \Delta T^r(35^{\circ})}{2} = \Delta T(o)$$

Nous avons répété cette expérience avec d'autres filtres ; la figure 16 nous montre les résultats obtenus avec un filtre de bande passante 8-15 μm , la figure 17 ceux obtenus avec un filtre de bande passante étroite centrée sur 9,3 μm . Le fait que le minimum obtenu avec ce dernier filtre soit moins prononcé, contrairement à ce qu'on pouvait attendre est sans doute dû à ce que l'énergie reçue étant très faible le rapport signal sur bruit est très mauvais et la précision de la mesure de température est médiocre. Nous avons donc éliminé ce filtre.

Les figures 15 et 16 nous permettent de voir que le minimum est moins prononcé pour le filtre 8-15 μm que pour le filtre 8-12 μm , comme les calculs le laissait prévoir. Néanmoins le rapport signal sur bruit étant plus favorable pour le filtre 8-15 μm nous avons continué à l'employer. La figure 18 nous montre les résultats obtenus pour un filtre de bande passante 8-12 μm : les trois courbes en trait plein ont été tracées pour une température d'eau de 290 K : les résultats ont été

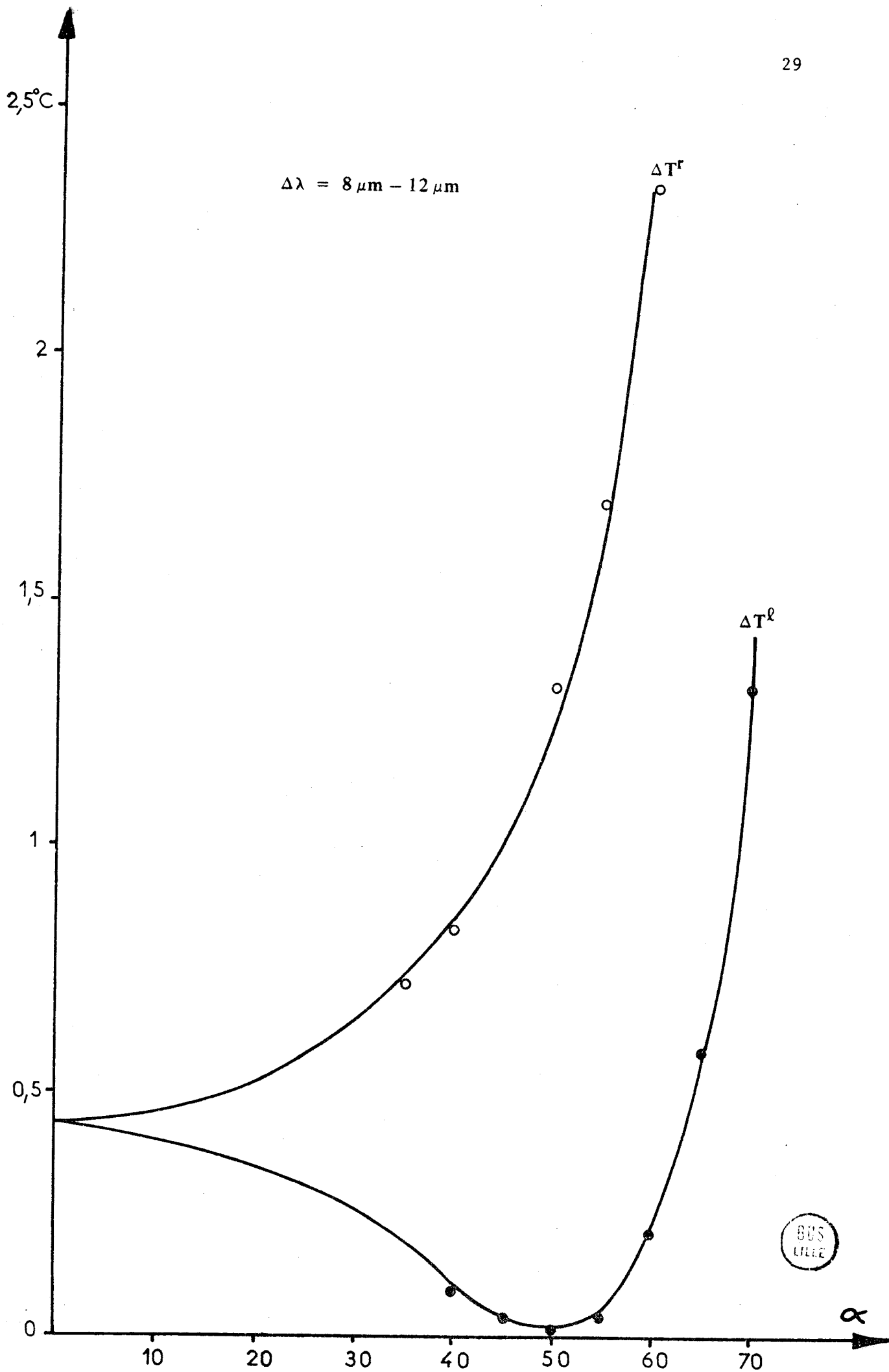


Figure 15



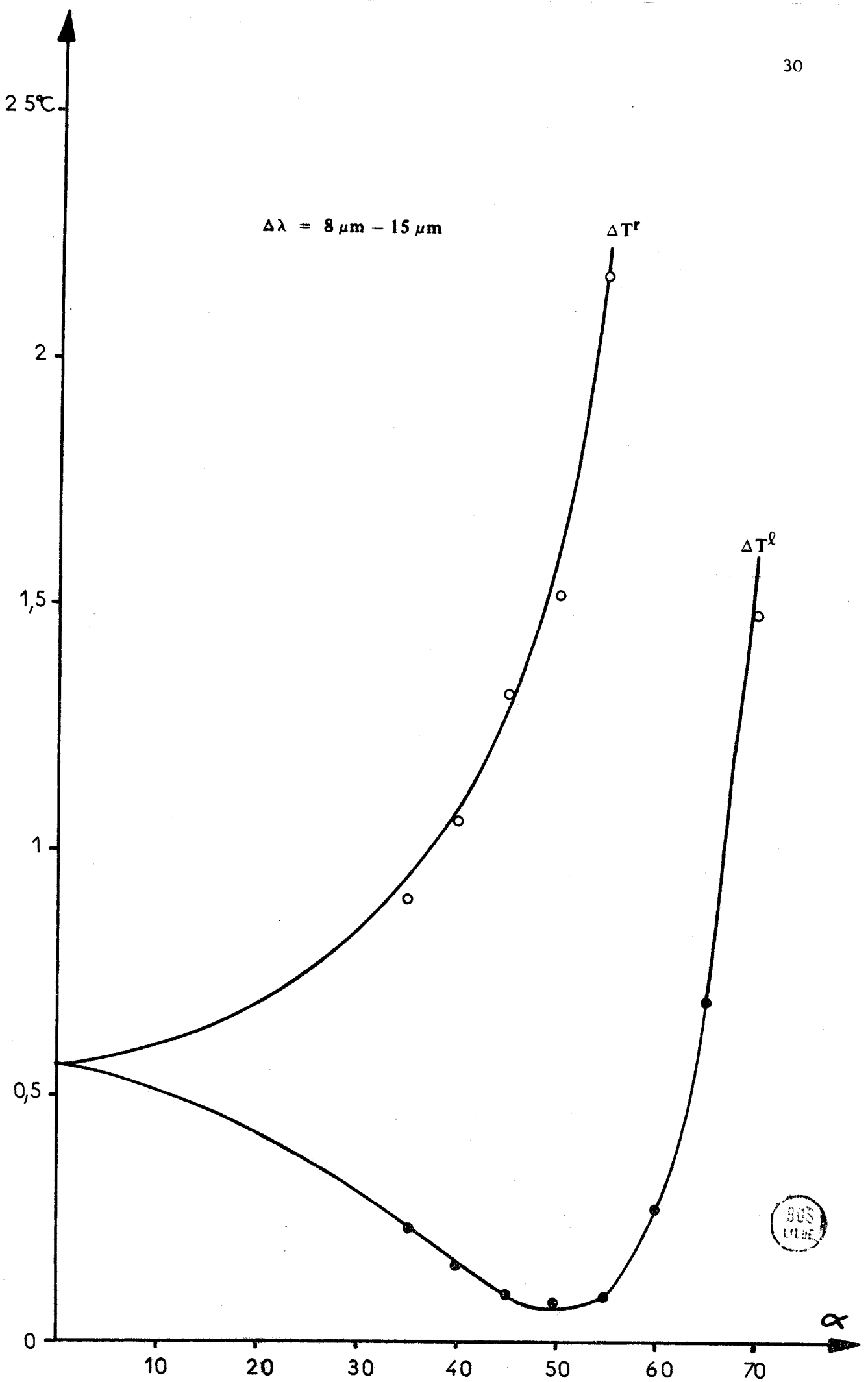


Figure 16

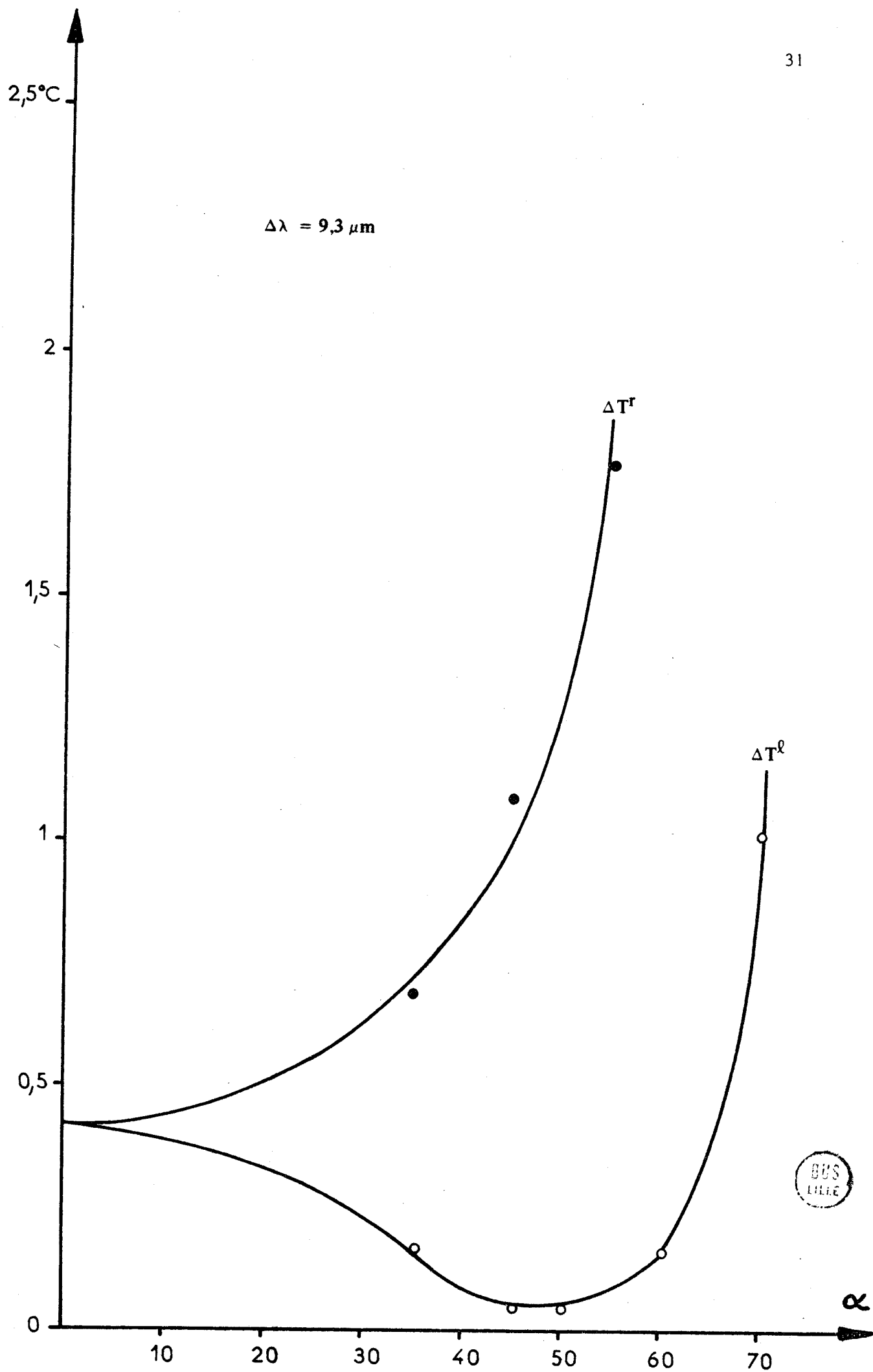


Figure 17

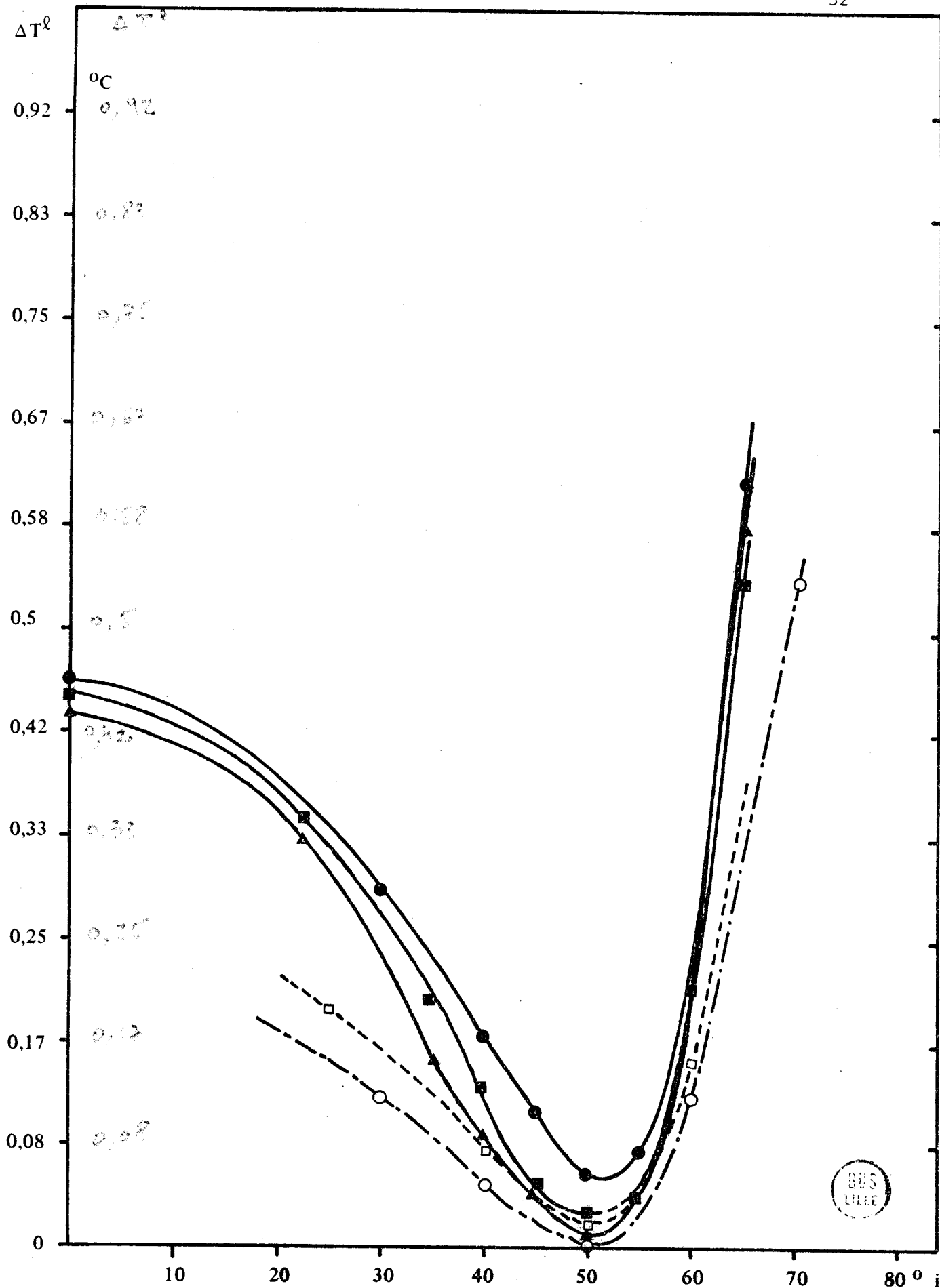


Fig: 18

obtenus à plusieurs semaines d'intervalle. Les deux courbes au traits discontinus ont été obtenues pour une température d'eau de 296 K. Nous pouvons constater que la dispersion des résultats n'est pas importante.

c/ Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

Nous avons reporté sur la figure 19 les points expérimentaux et théoriques représentant les variations de ΔT^r , ΔT^l et ΔT en fonction de l'angle d'incidence, pour un filtre de bande passante 8-12 μm , la température de l'eau étant fixée à 290 K et celle du ciel à 320 K.

Nous avons reporté sur la figure 20 les divers résultats expérimentaux obtenus pour ΔT^l ainsi que la courbe théorique ΔT^l en fonction de l'angle d'incidence pour une température d'eau de 290 K. Nous avons reporté sur la figure 21 les résultats obtenus pour $T_{\text{eau}} = 296 \text{ K}$.

Nous pouvons constater que l'écart entre les résultats théoriques et expérimentaux, pour ΔT^l est faible, quelle que soit la température de l'eau.

Cet écart peut s'expliquer : d'une part le taux de polarisation différent de 1, une partie du rayonnement réfléchi traverse le polariseur et va perturber la réception du rayonnement émis par la surface de l'eau.

D'autre part la surface de l'eau est légèrement agitée, nous verrons (chapitre V) comment nous avons essayé de rendre compte de cette erreur. Au cours de cette expérience préliminaire, nous n'avons pu chiffrer l'erreur faite. Malgré ce manque de précision dans l'évaluation des erreurs il nous a semblé que le radiomètre nous donnait les résultats attendus pour la température apparente, les erreurs faites sur T restant faibles.

Les courbes reportées sur la figure 22 nous montrent les résultats théoriques et expérimentaux obtenus pour ΔT^r , nous verrons dans les applications d'intérêt de ces courbes. Les écarts absolus entre la théorie et l'expérience sont importants.

La courbe représentée sur la figure 23 nous montre les variations de β_l en fonction de l'angle d'incidence i , pour un filtre de bande passante 8-12 μm ; nous y avons reporté les β_l expérimentaux et théoriques. Nous pouvons constater le bon accord entre le calcul et l'expérience. Le minimum obtenu pour un angle proche de 50° est très marqué, sa valeur,

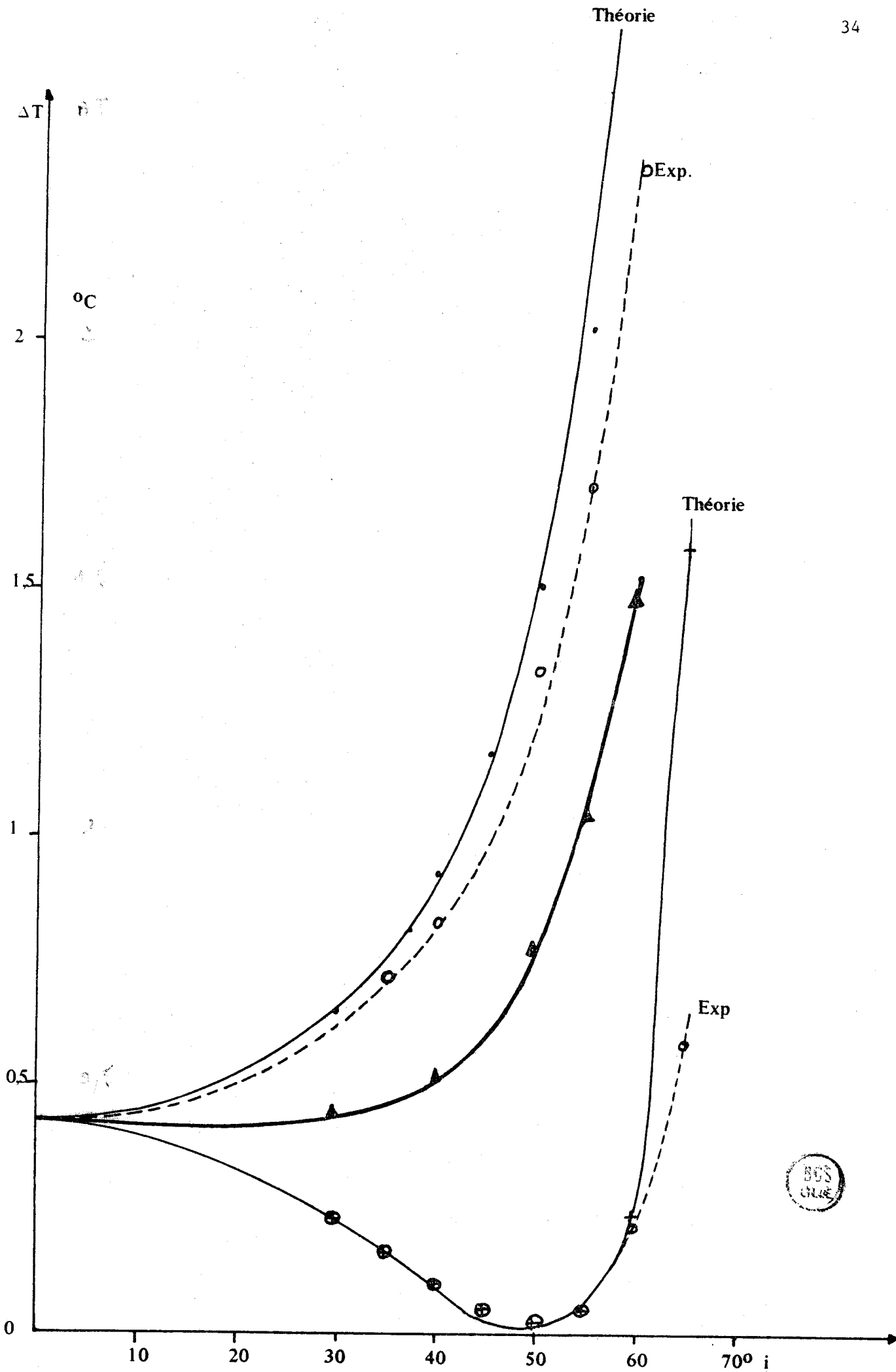


Figure 19

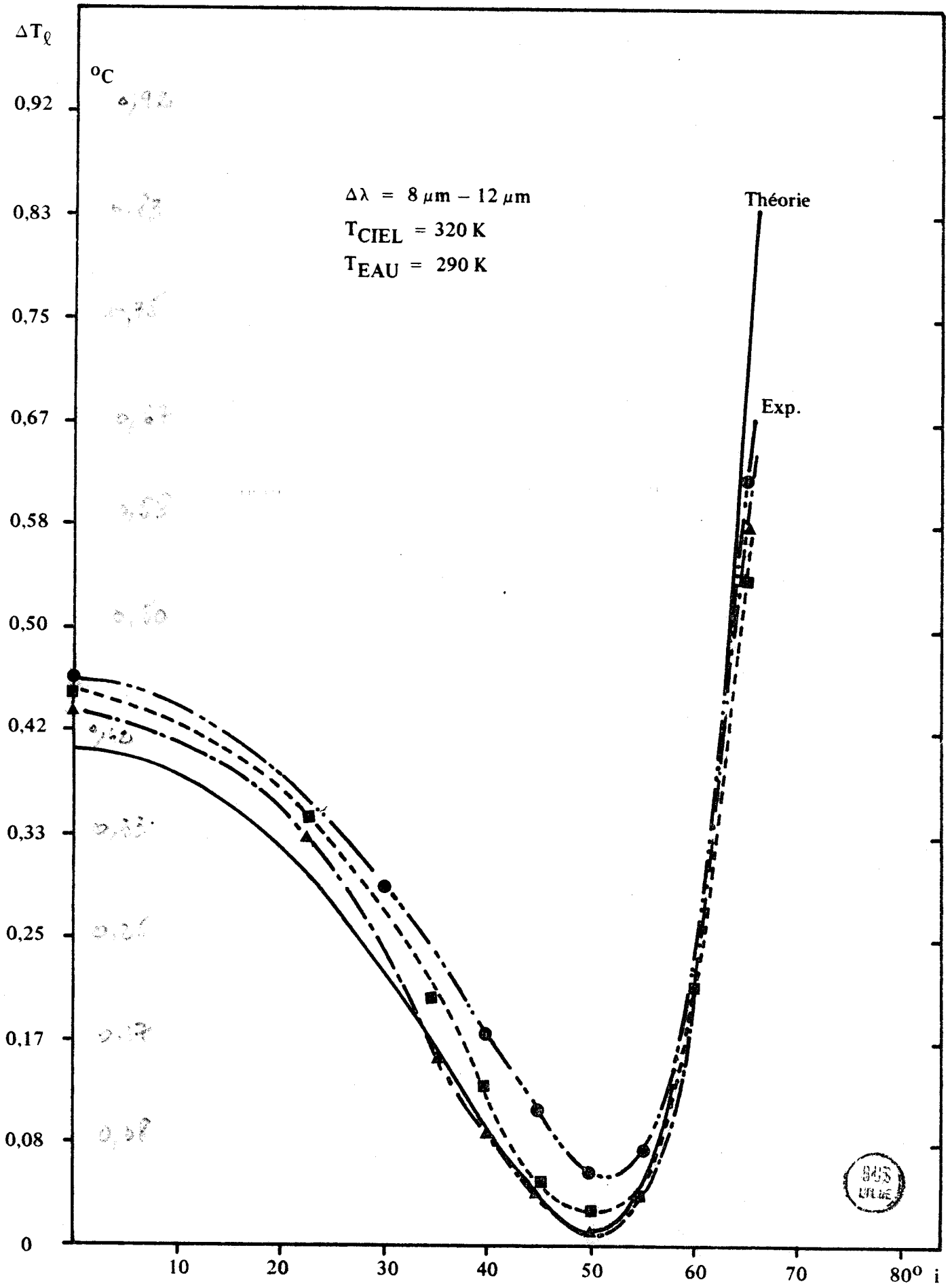


Figure 20

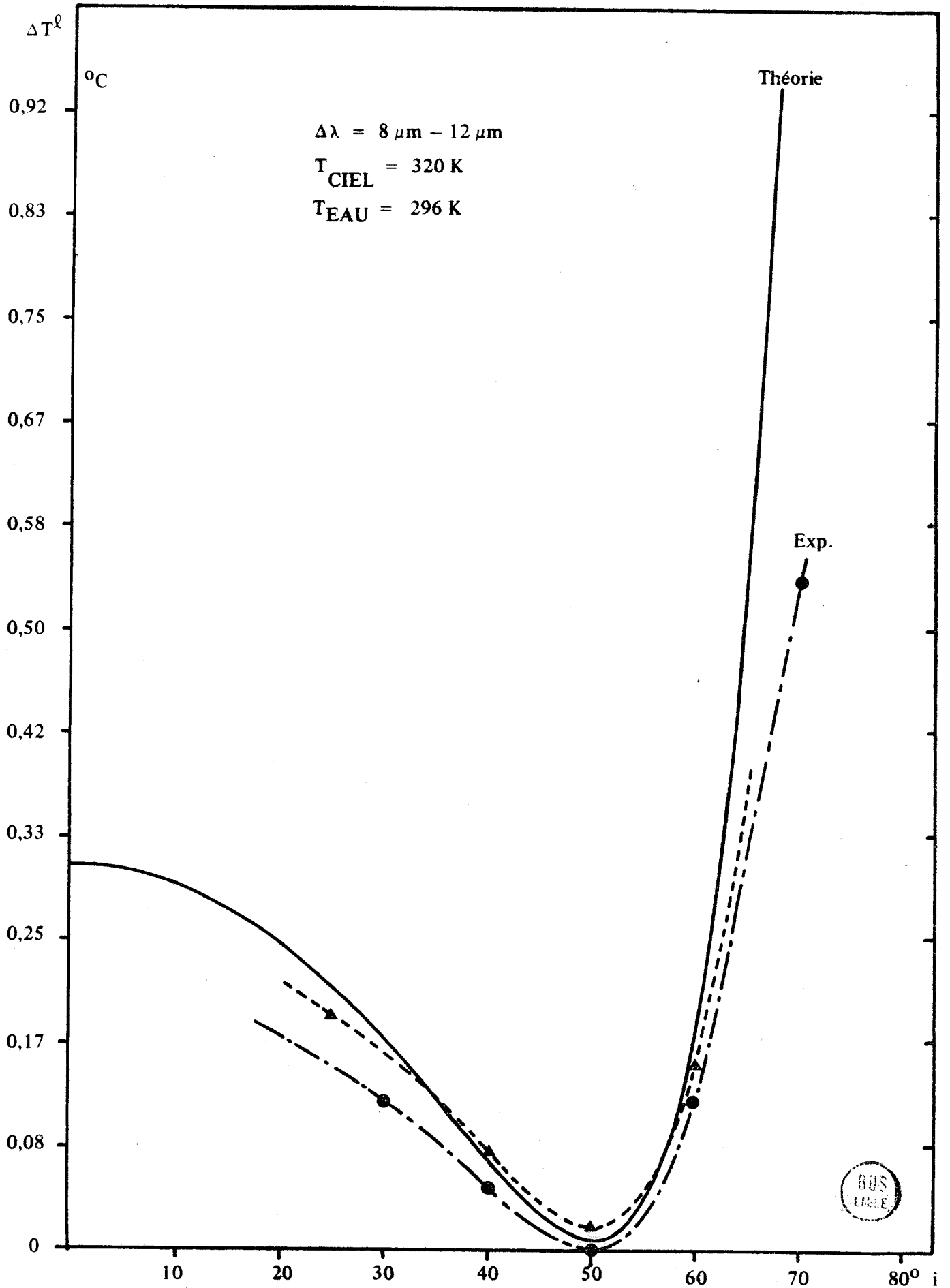


Figure 21

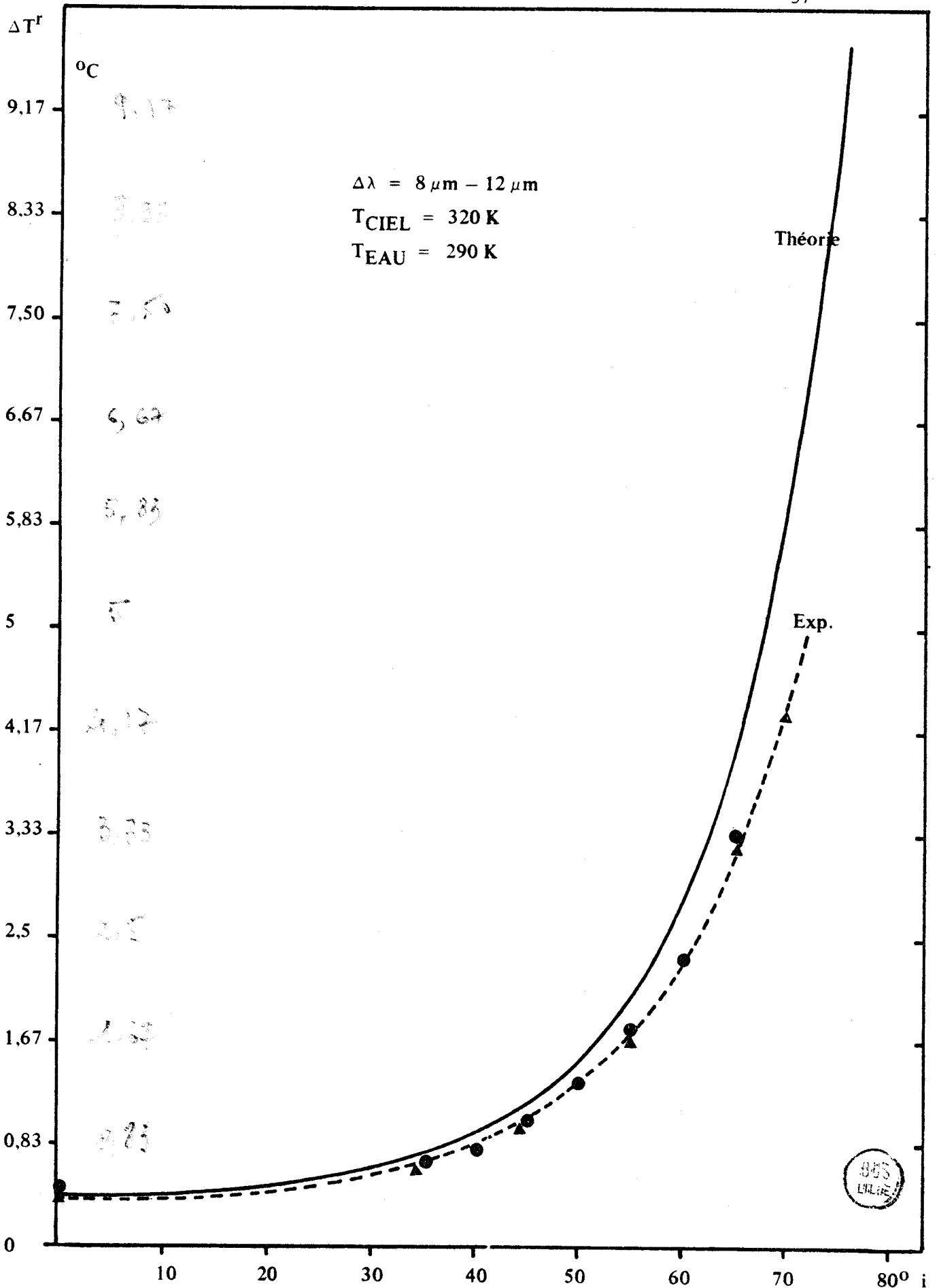


Figure 22

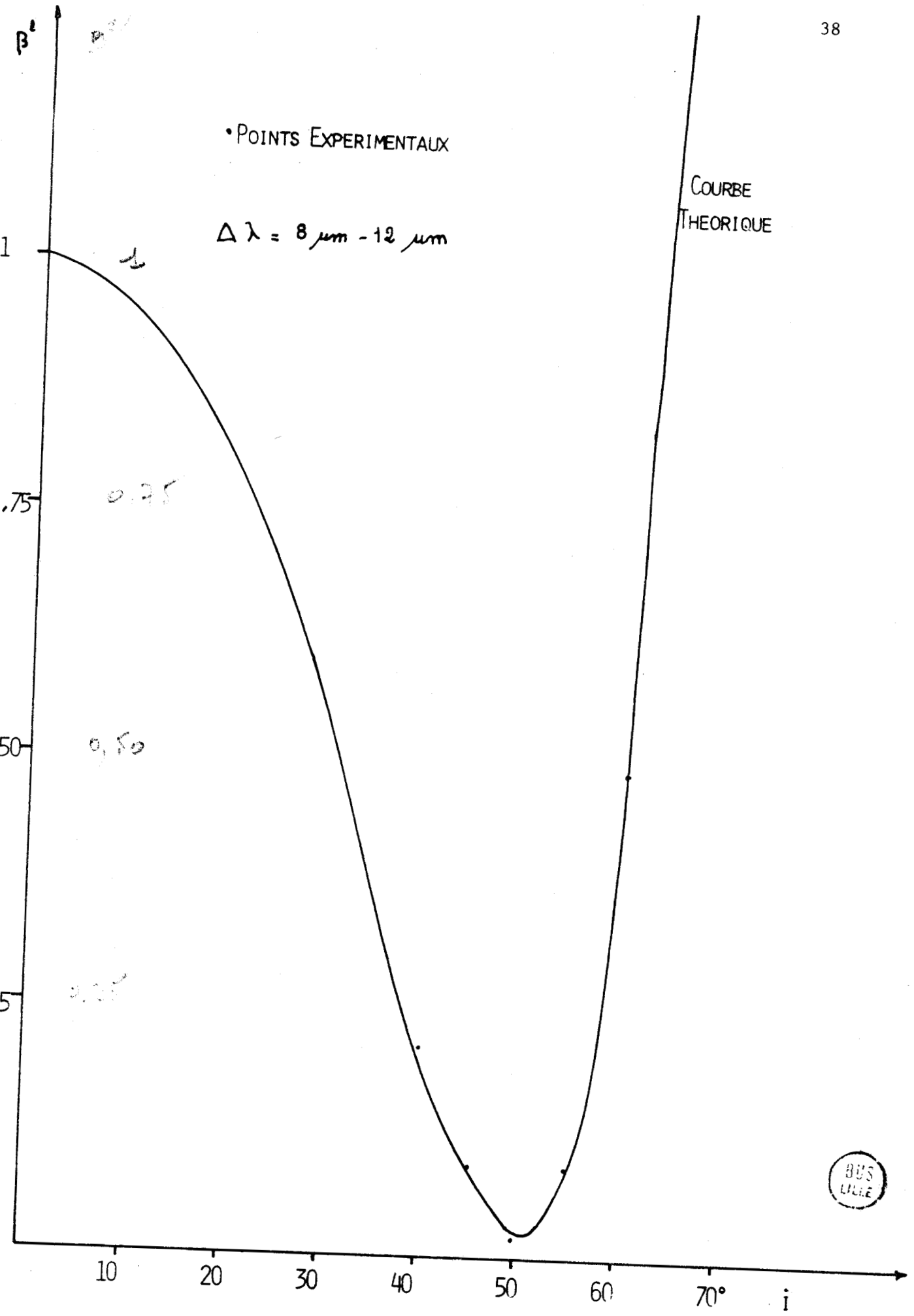


FIGURE 23

quelle soit expérimentale ou théorique est de l'ordre de 0,02 ; ceci signifie que l'erreur de réflexion entachant la mesure de la température de surface, faite avec un radiomètre polarisé, visant l'eau sous une incidence de 50° , est 50 fois plus faible que celle faite avec un radiomètre classique visant l'eau à la verticale.

L'amélioration apportée à la mesure semble très importante, il faut néanmoins garder à l'esprit que cette expérience a été faite avec une surface d'eau très peu agitée, l'angle d'incidence étant bien défini, pour une expérience in situ l'amélioration apportée sera certainement plus faible, compte-tenu de l'agitation quasi constante de la surface de l'océan (chap.V).

L'accord entre les résultats théoriques et expérimentaux semble assez satisfaisant nous avons décidé de réaliser une expérience plus proche des mesures sur le terrain. Pour ce faire nous avons installé la cuve en plein air éclairée par le ciel. Nous avons utilisé uniquement le filtre 8-12 μ .

II - MESURE DE L'ERREUR DE REFLEXION POUR UN CIEL REEL

a/ Dispositif expérimental

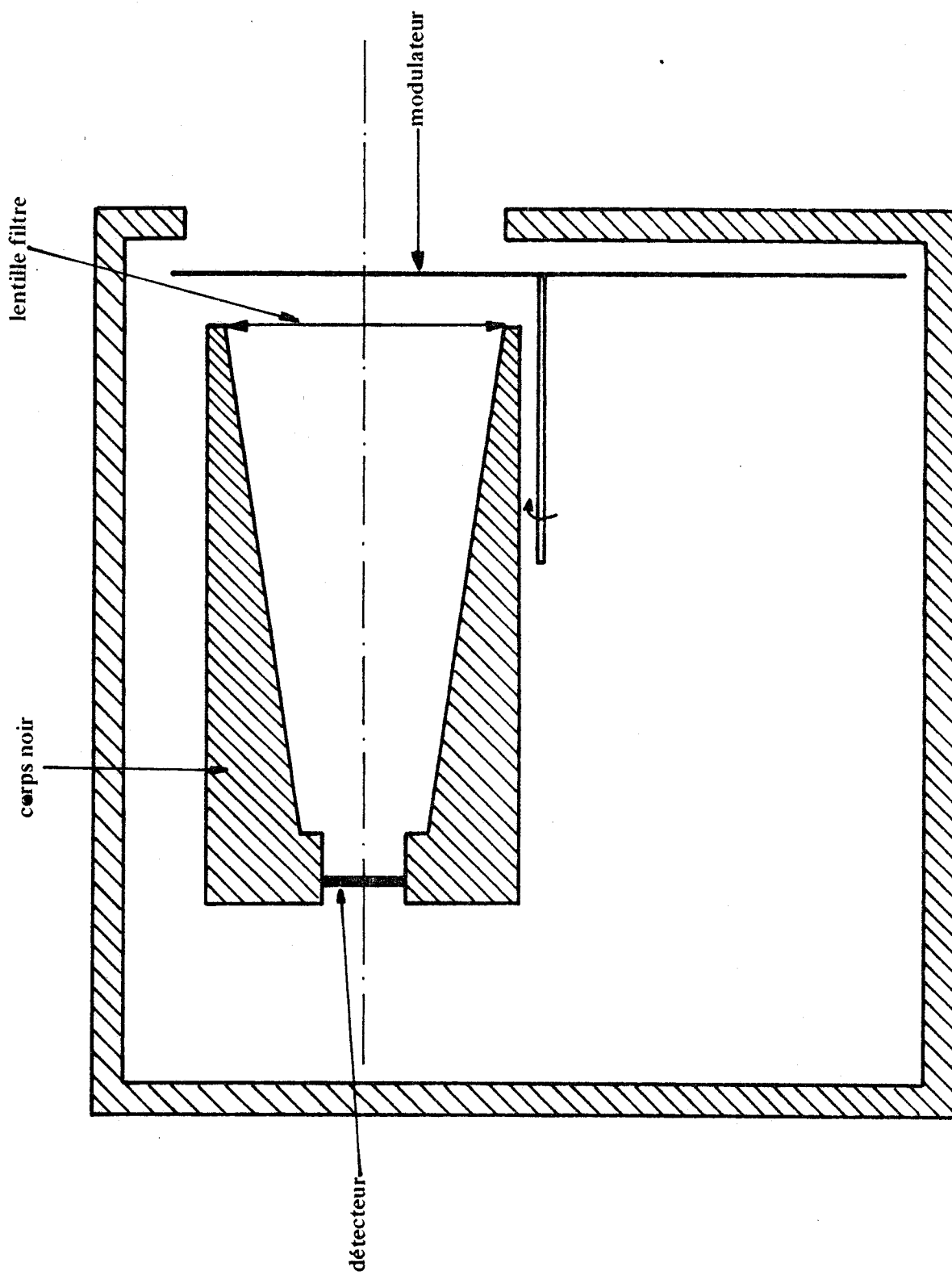
Nous avons utilisé au cours de cette manipulation, en plus de RALI, un radiomètre classique et une thermopile dont nous allons donner une description succincte.

Radiomètre classique

Ce radiomètre est un Barnes PRT 5, il nous a permis de comparer les résultats obtenus avec un radiomètre classique et le radiomètre polarisé dans des conditions de travail identiques.

Le schéma de principe de ce radiomètre est représenté sur la figure 24. Le détecteur est du type bolomètre.

La lentille sert à la fois à concentrer le rayonnement sur une petite surface du détecteur et à limiter la bande passante à 8-12 μm . Des essais ont été faits avec une lentille qui limitait la bande passante à 9,5 - 11,5 μm , l'énergie reçue dans cette bande étant très faible, le rapport



Barnes schéma de principe

Figure 24



signal sur bruit était nettement moins bon que pour la lentille précédente.

Le corps noir de ce radiomètre est chauffé jusqu'à 70° environ la précision obtenue sur les mesures de température sera moins bonne que celle obtenue pour RALI (chap.I §II).

Ce radiomètre a un angle d'ouverture de 4° et une constante de temps de l'ordre de 10 s.

Thermopile du ciel

Nous avons vu que la mesure précise de la température de la surface de l'océan nécessite la connaissance du rayonnement venant du ciel pour évaluer l'erreur de réflexion ; pour mesurer ce rayonnement nous utiliserons un radiomètre auxiliaire appelé "thermopile du ciel". Le schéma de principe de cette thermopile est représenté sur la figure 25. La thermopile proprement dite est une thermopile de KIPP, elle est constituée de 10 couples manganine-constantan montés en série, leur soudure chaude est portée à la température de la surface réceptrice, celle-ci étant recouverte d'une fine couche de laque de PARSONS ce qui lui permet d'absorber une grande partie du rayonnement que nous voulons mesurer ; la soudure froide des thermocouples est en contact avec une masse thermique qui est à la même température que le boîtier de la thermopile ; la thermopile mesure donc la différence de température entre la surface réceptrice et son boîtier, il importe donc que ce boîtier reste toujours à la même température, pour que les mesures soient répétitives nous l'avons thermostaté.

Un filtre de même bande passante que celui du radiomètre est placé devant la surface réceptrice.

La thermopile a un angle d'ouverture de 60° environ et une constante de temps de l'ordre de 30 s ; cette constante de temps relativement longue explique que certaines variations du ciel ne soit pas vues par la thermopile.

La figure 26 nous montre le dispositif expérimental que nous avons adopté:

- les radiomètres BARNES et RALI visent la surface de l'eau, dont nous voulons déterminer la température, sous la même incidence (proche de 50°) le polariseur de RALI est réglé pour laisser passer la vibration parallèle. Le thermomètre numérique nous donne la température réelle de l'eau ;

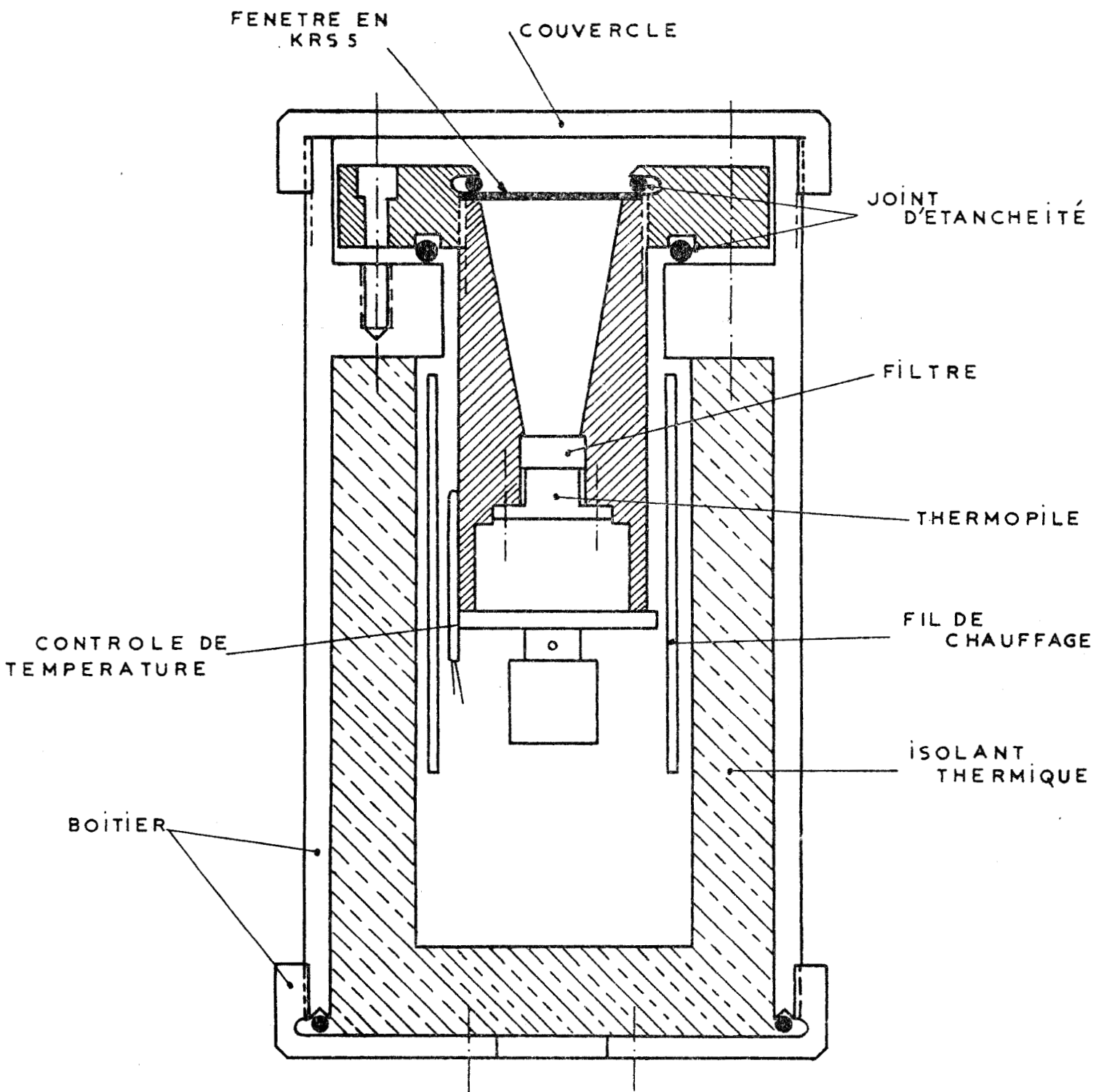
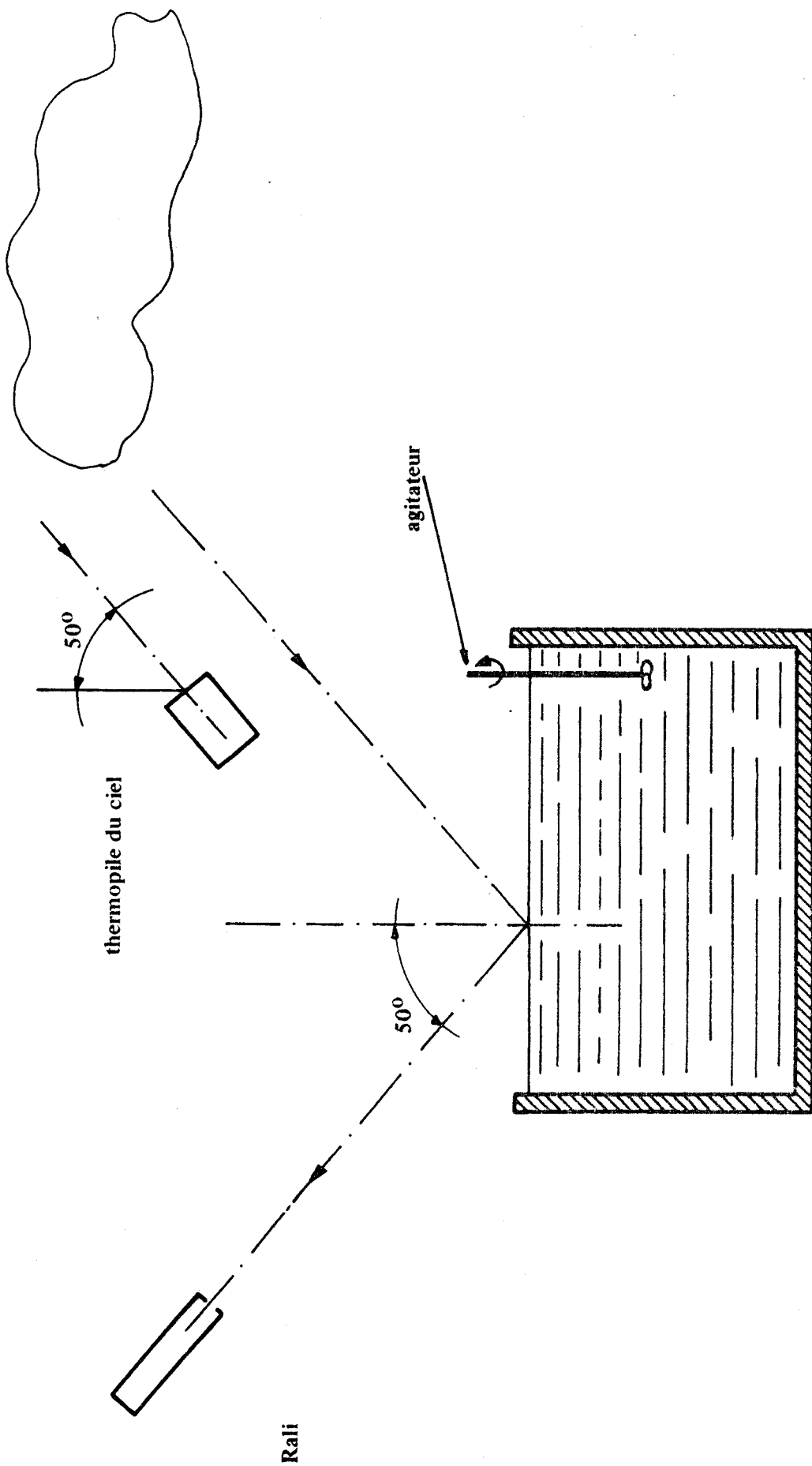


FIG:25 BOITIER POUR THERMOPILE DU CIEL



Dispositif expérimental

Figure 26



afin d'éviter tout effet de refroidissement superficiel, l'eau est constamment agitée (réf. 14) ;

- la thermopile du ciel vise en permanence le ciel avec un angle d'incidence de 50° ; à intervalles de temps réguliers nous lui ferons viser la surface de l'eau afin de pouvoir déterminer ΔW défini par (II-7) ;

- les parois du bac contenant l'eau ont été calorifugés pour limiter au maximum les échanges entre l'eau et le milieu extérieur ;

- le ciel de cette expérience est le ciel réel ; les écarts entre les températures réelles et radiométriques apparentes de l'eau seront donc négatifs, alors qu'ils étaient positifs dans les expériences précédentes, en effet l'expression de ΔT_{ref} est : (voir chap. II §I)

$$\Delta T_{ref} = \frac{\int_0^{\infty} R_{\lambda}(i) \cdot \{I_{\lambda}(T) - I_{\lambda s}(i)\} d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{dI_{\lambda}(T)}{dT} d\lambda} = T_{rad} - T_{réelle}$$

avec un ciel réel $I_{\lambda s} < I_{\lambda}(T)$, donc

$$T_{réelle} > T_{rad}$$

Les deux radiomètres nous permettront de déterminer les températures apparentes de l'eau, le thermomètre à affichage numérique nous donnera sa température réelle, nous pourrons ainsi calculer les erreurs dues à la réflexion :

$$\Delta T = T_{réelle} - T_{radi} \quad \text{pour le radiomètre polarisé}$$

$$\Delta T' = T_{réelle} - T_{barnes} \quad \text{pour le radiomètre classique}$$

La thermopile nous permettra de calculer le flux énergétique venant du ciel reçu par le radiomètre (ΔW).

Nous avons choisi le meilleur angle d'incidence possible pour le radiomètre polarisé (50°) ; le radiomètre classique ne sera pas utilisé ici dans les meilleures conditions possibles, son erreur est en effet minimum pour un angle d'incidence proche de 0° ($\frac{\Delta T(50)}{\Delta T(0)} \approx 2$).

Nous avons ajusté les deux sensibilisés des deux radiomètres à des

valeurs proches, de cette façon une variation de température de la surface visée entrainera pour les radiomètres une déviation identique ; les sensibilités adoptées sont les suivantes :

BARNES (radiomètre non polarisé) : 0,40°C/mm

RALI (radiomètre polarisé) : 0,35°C/mm

b/ Résultats expérimentaux

La figure 27 nous montre un enregistrement obtenu :

. La courbe 1 représente les variations du signal délivré par la thermopile, c'est à dire l'énergie reçue par la surface de l'eau. Un ciel clair rayonne peu dans la bande 8 μm - 12 μm , l'énergie reçue sera faible.

. La courbe 2 nous montre les variations du signal issu du radiomètre polarisé.

. La courbe 3 représente le signal issu du radiomètre non polarisé. Nous pouvons constater que pour une même variation de l'état du ciel, et avec une température d'eau constante, la température apparente déterminée à l'aide du radiomètre varie de façon beaucoup plus importante que celle déterminée avec le radiomètre polarisé.

Les enregistrements réalisés nous ont permis de reporter sur les figures 28,29 et 30 les résultats obtenus sous la forme de ΔT fonction de ΔW .

. La figure 28 nous montre les écarts de température obtenus avec un radiomètre classique.

. La figure 29 nous montre les mêmes résultats obtenus avec un radiomètre polarisé.

. Nous avons rassemblé sur la figure 30 les résultats obtenus avec les deux radiomètres afin de pouvoir les comparer.

Nous pouvons constater sur toutes les courbes tracées une grande dispersion des points expérimentaux ce fait nous semble dû, pour une grande part, à la différence importante entre les angles d'ouverture des radiomètres d'une part et de la thermopile d'autre part.

On note néanmoins que l'erreur de réflexion est très diminuée par l'emploi du radiomètre polarisé.

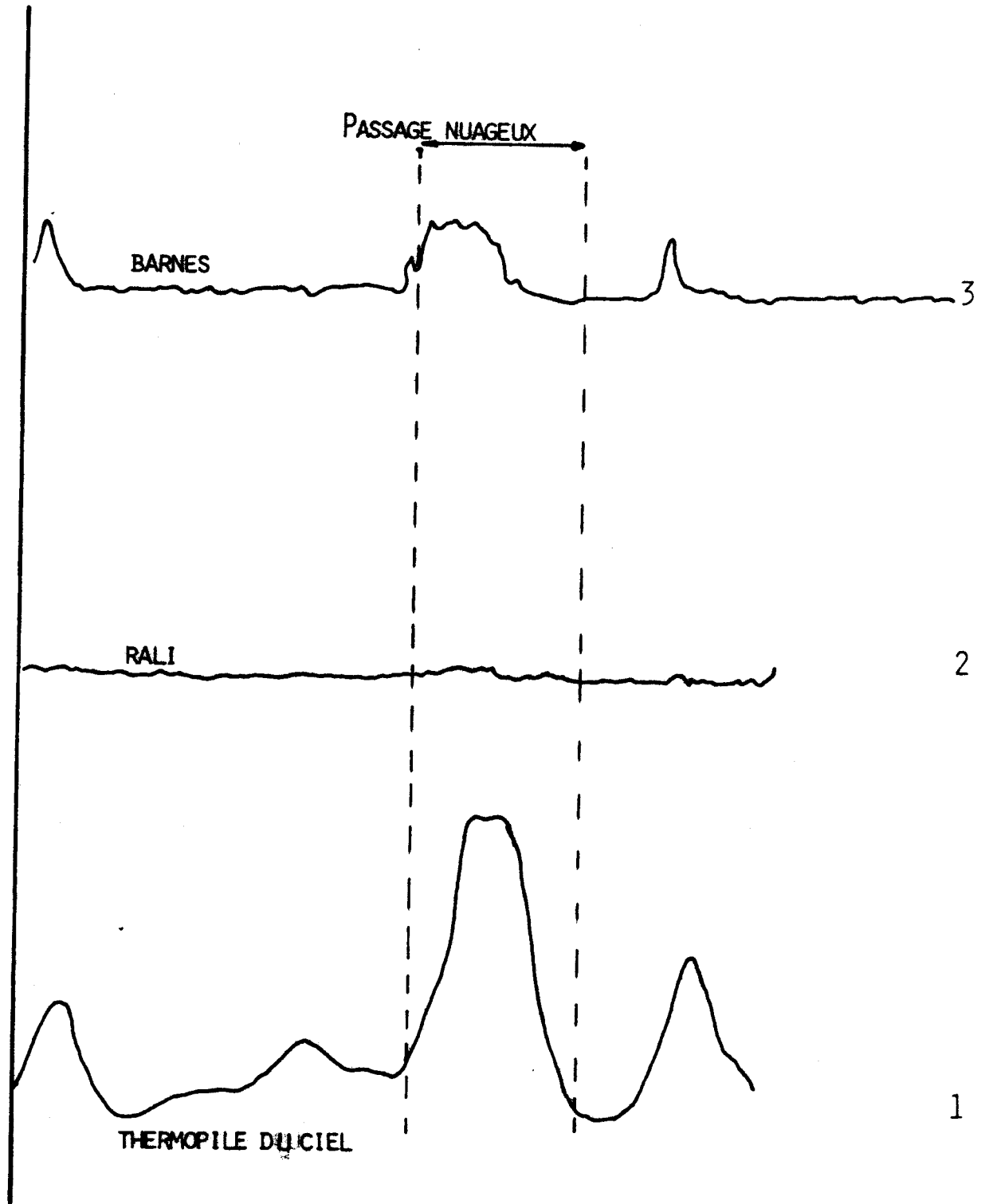


FIGURE 27



BARNES : $\Delta T = f(\Delta W)$

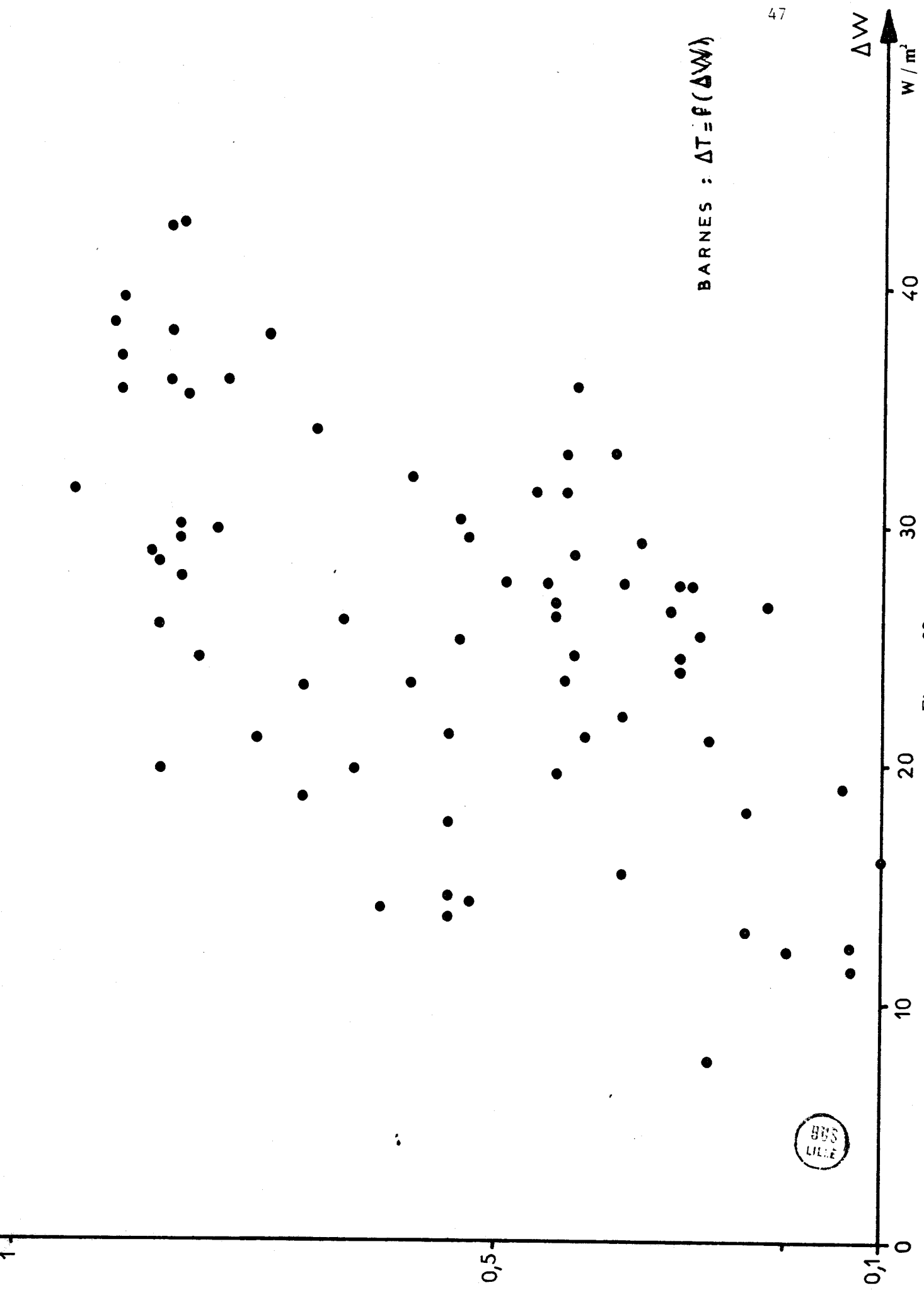


Figure 28

$\Delta T^{\circ}C$

RALI $\Delta T = f(\Delta W)$

0,3

0,2

0,1

0

$\Delta W w/m^2$

50

40

30

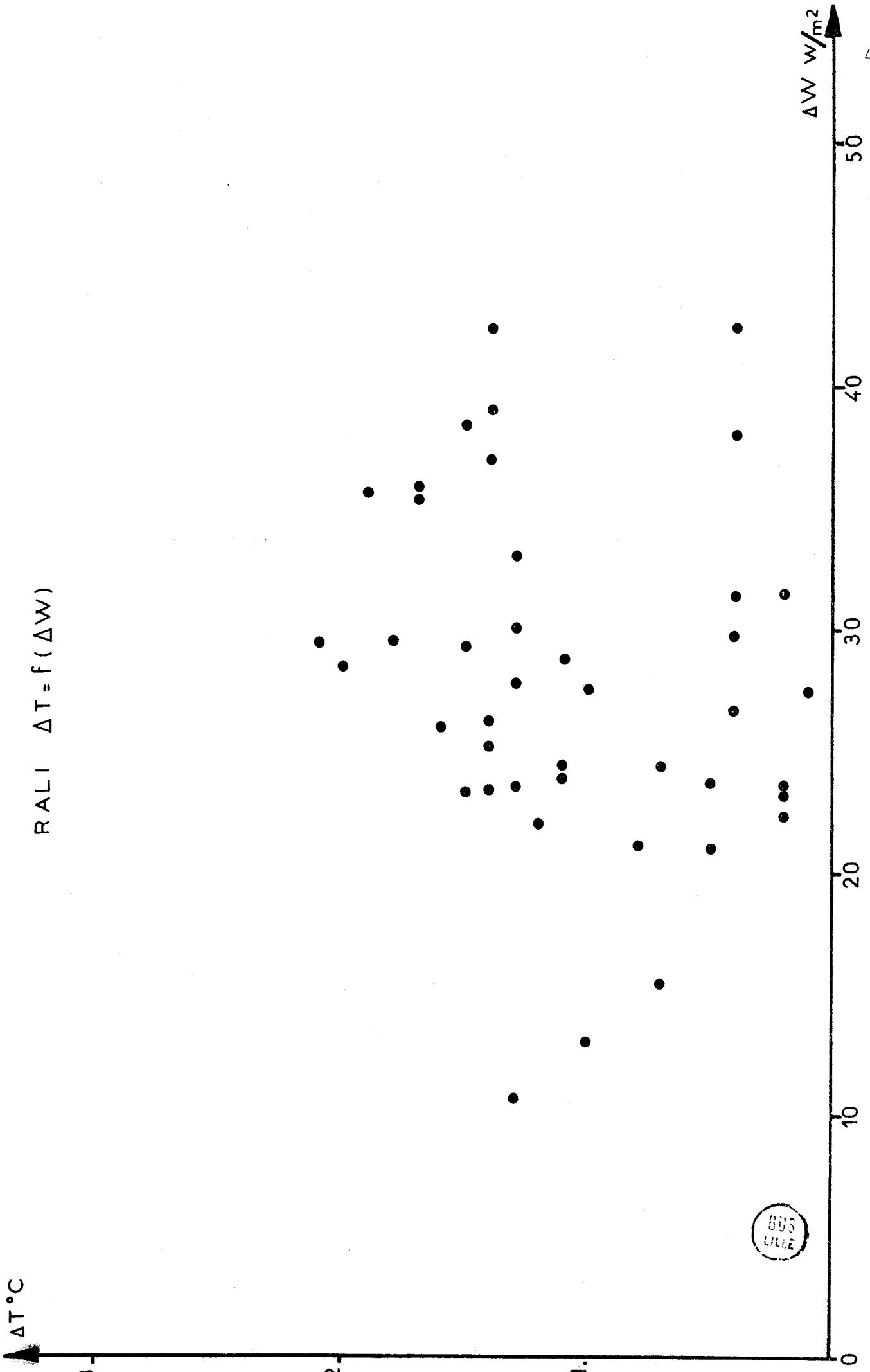
20

10

48



FIGURE 29



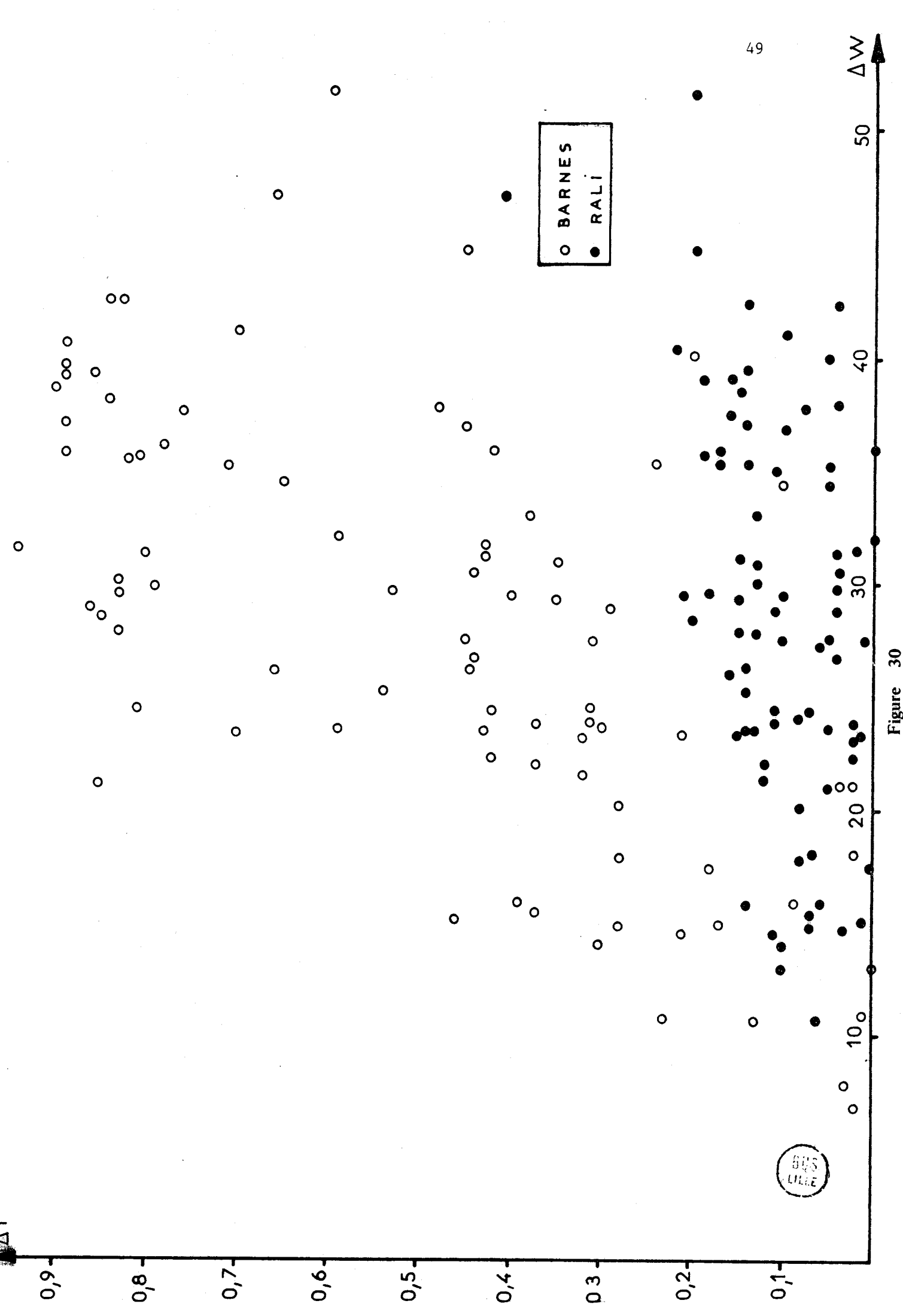


Figure 30

c/ Comparaison des resultats expérimentaux et théoriques

La figure 31 nous montre les resultats du calcul de ΔT^l effectué pour de l'eau à la temperature de 280 K avec un modèle de ciel clair très schématique (fig. 32 et ref. 6) ,qui correspond à un ΔW de $20 \text{ W/m}^2/\text{strd}$.

Ce modèle de ciel est caracterisé par :

$$I^{\text{ciel}} = \frac{I(10 \mu\text{m})}{3} \quad \text{pour } 9 \mu\text{m} < \lambda < 10 \mu\text{m} \text{ et } 12 \mu\text{m} < \lambda < 13,6 \mu\text{m}$$

$$I^{\text{ciel}} = \frac{I(10 \mu\text{m})}{3} \quad \text{pour } 8 \mu\text{m} < \lambda < 9 \mu\text{m} \text{ et } 10 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$$

La très grande dispersion des points expérimentaux, sur la figure 30, rend difficile la détermination d'une valeur de l'écart entre les temperatures réelles et apparentes de la surface pour une valeur de ΔW . Nous avons essayé en éliminant les points manifestement faux, de tracer les droites moyennes donnant ΔT en fonction de ΔW pour les deux radiomètres, ces droites ont été reportées sur la figure 33.

Les ΔT^l calculés théoriquement pour les deux radiomètres ont été portés le ΔT^l a été calculé en faisant la moyenne des ΔT^l pour des angles d'incidence compris entre 45° et 55° .

L'accord entre valeurs calculées et mesurées est très bon dans le cas de RALI; par contre pour le radiomètre BARNES, l'erreur est très importante, ceci est probablement dû l'imprécision sur la transmission du filtre.

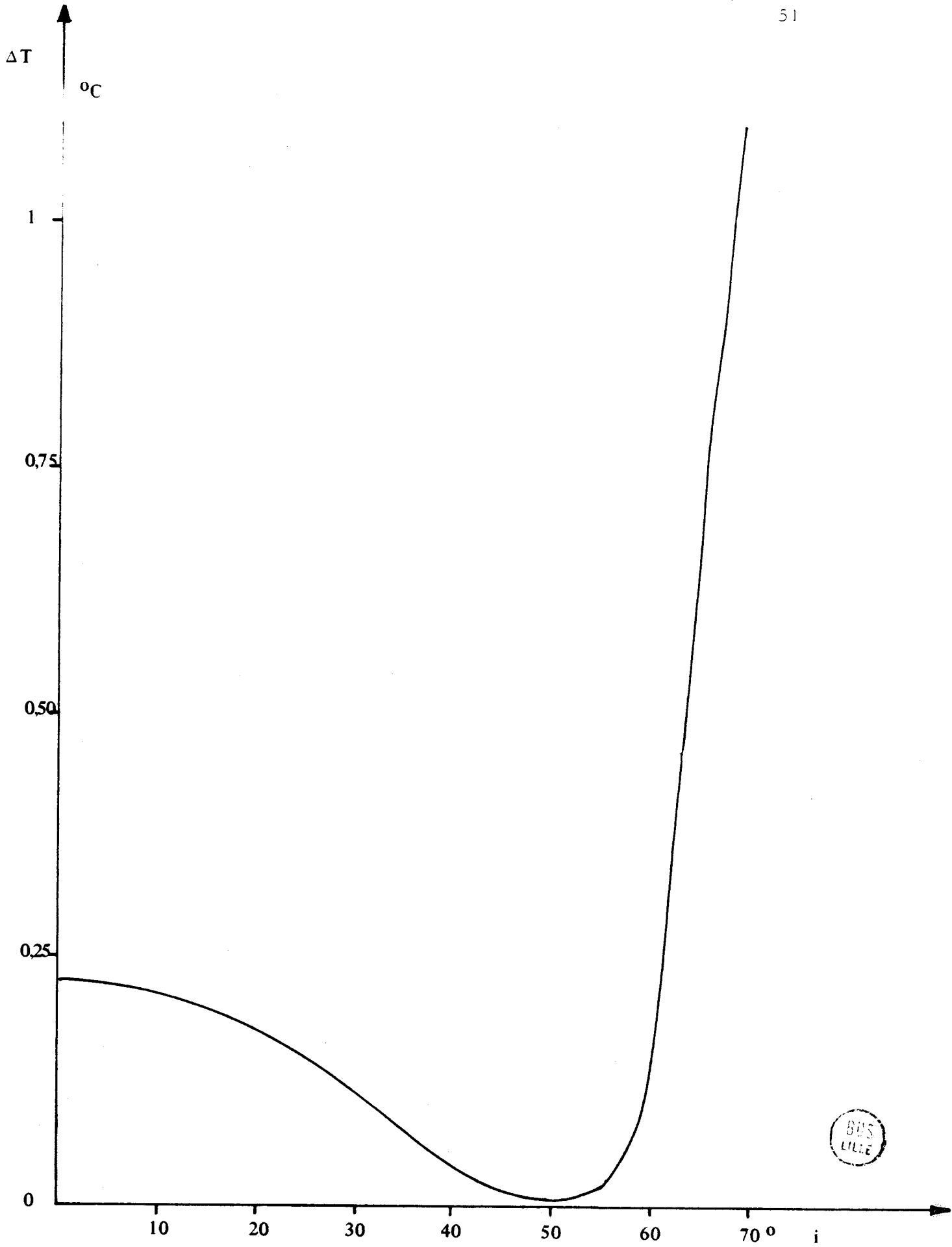


Figure 31

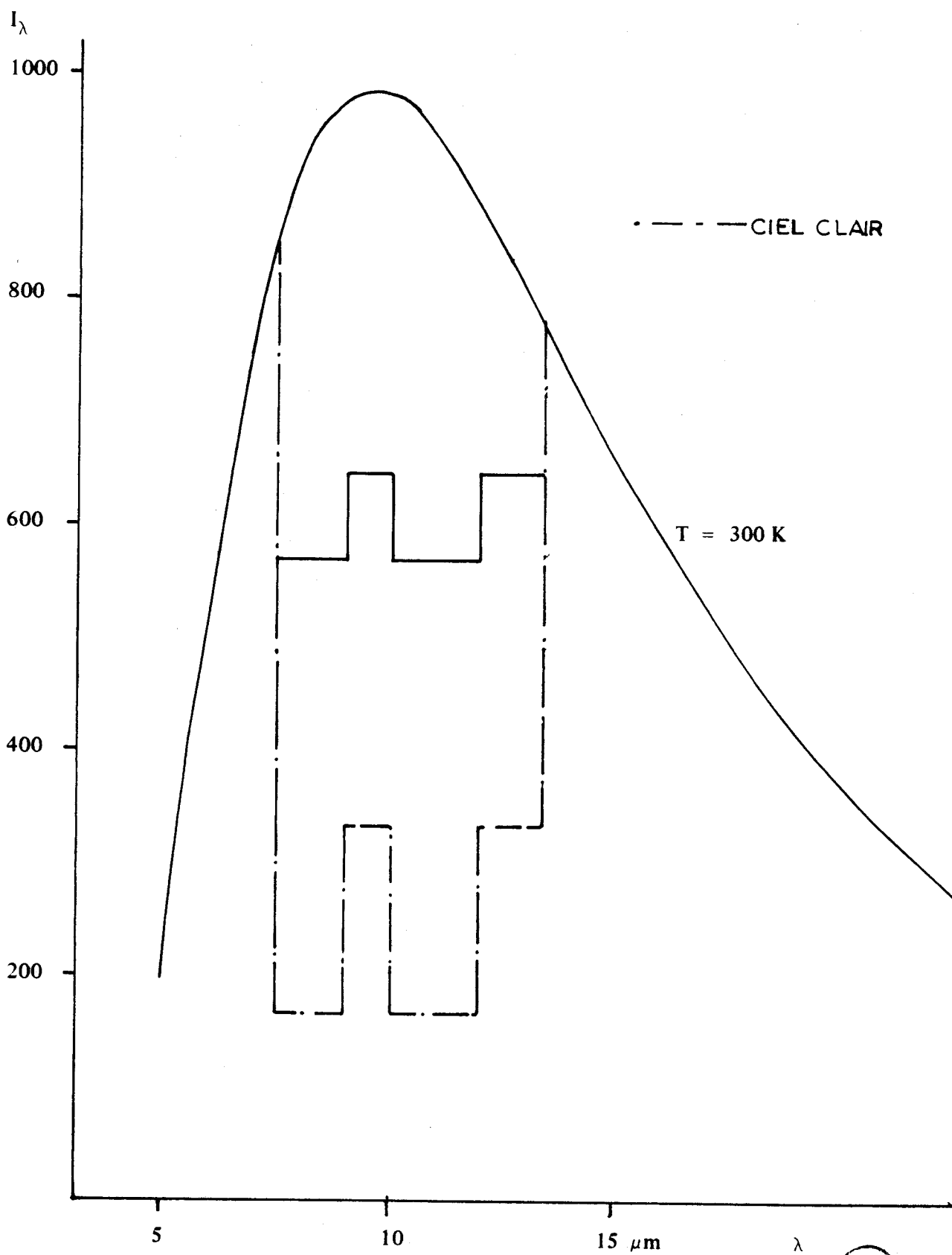


Figure 32



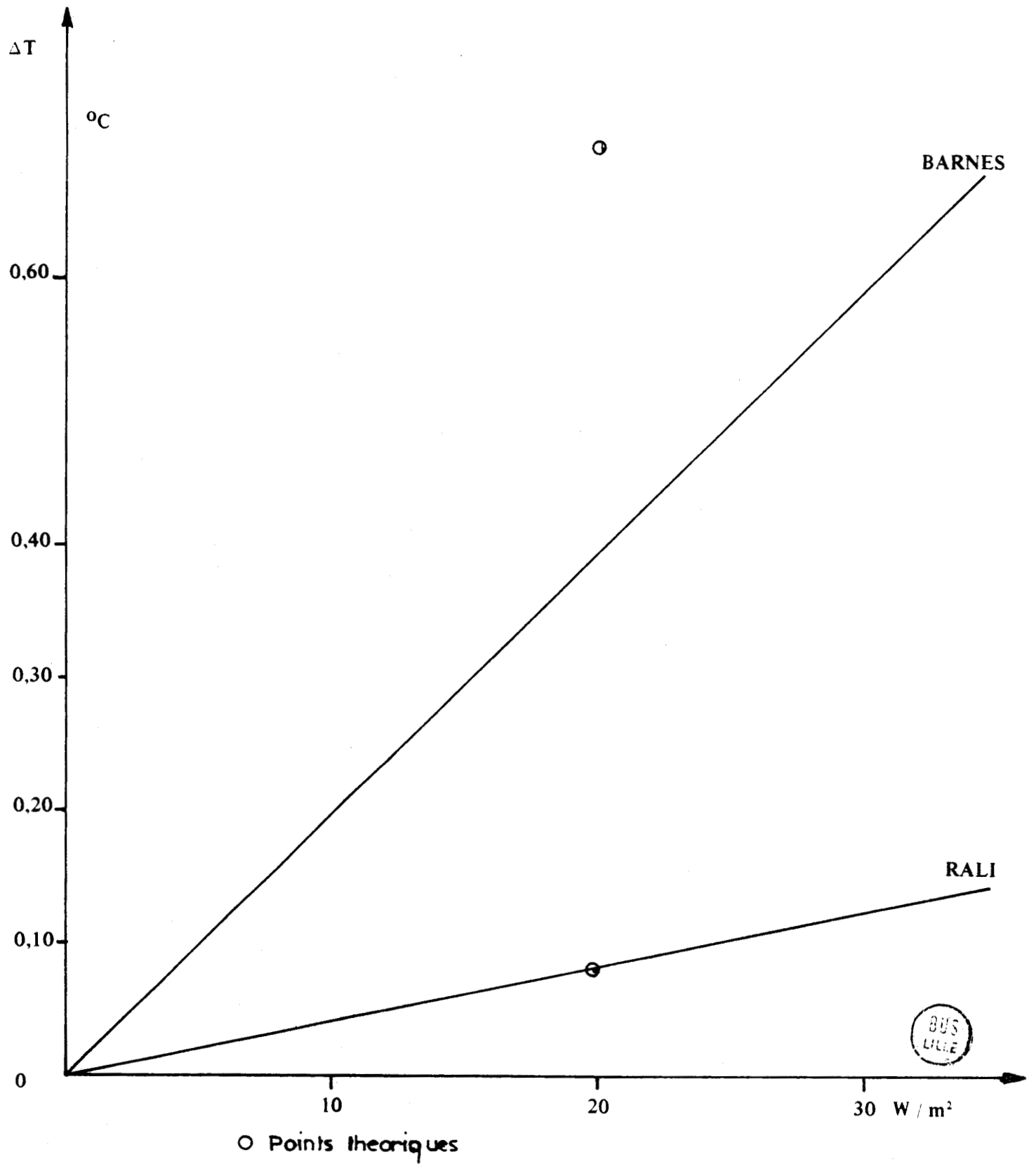


Figure 33

Les trois premiers chapitres, dont nous venons d'exposer les résultats, nous ont permis de comparer la théorie et l'expérience; Cela nous a permis de mettre au point une méthode de mesure de la température de surface précise, peu influencée par l'état du ciel et dont les résultats sont directement exploitables.

D'autre part l'étude que nous avons faite nous a montré que nous pouvions faire varier l'importance du rayonnement réfléchi reçu par le détecteur, il suffit en effet de faire tourner la direction privilégiée du polariseur de 90° .

Nous allons aborder, dans les chapitres suivants, quelques applications du radiomètre polarisé, ces applications sont de deux types :

l'un basé sur les variations du rayonnement réfléchi reçu par le radiomètre; Cette application fera l'objet du chapitre IV.

l'autre fondé sur la mesure précise de la température de surface et les problèmes qui y sont liés, ceci fera l'objet des chapitres V et VI.

CHAPITRE IV

APPLICATION DU RADIOMETRE POLARISE A LA DETECTION DE NAPPE
D'HYDROCARBURES

I - INTRODUCTION

Nous avons étudié dans un travail précédent (réf. 14) la possibilité de détecter des nappes d'hydrocarbures qui se trouvent à la surface de l'océan. Ces travaux préliminaires ont été effectués avec un radiomètre infrarouge non polarisé et une caméra infrarouge. Nous nous sommes basés, pour repérer les hydrocarbures, sur le fait que leur température radiométrique est inférieure à celle de l'eau environnant la nappe ; nous avons en effet :

$$T_{\text{rad}}^h = T^h - \Delta T_{\text{ref}}^h - \Delta T_s^h \quad (\text{IV-1})$$

T_{rad}^h est la température apparente (radiométrique) de l'hydrocarbure

T^h est la température réelle de l'hydrocarbure

ΔT_{ref}^h est l'erreur de réflexion

ΔT_s^h est le refroidissement superficiel du film.

Quand le radiomètre vise l'eau libre nous aurons une température radiométrique égale à :

$$T_{\text{rad}}^{\text{eau}} = T^{\text{eau}} - \Delta T_{\text{ref}}^{\text{eau}} - \Delta T_s^{\text{eau}} \quad (\text{IV-2})$$

$T_{\text{app}}^{\text{eau}}$ est la température radiométrique de l'eau

T^{eau} est la température réelle de l'eau

ΔT_r^{eau} est l'erreur de réflexion

ΔT_s^{eau} est le refroidissement superficiel de l'eau.

Si nous survolons, au cours d'un lever aérien de température radiométrique, une nappe de polluant nous verrons apparaître une différence de température ΔT :

$$\Delta T = T_{\text{rad}}^h - T_{\text{rad}}^{\text{eau}} = (\Delta T_{\text{ref}}^{\text{eau}} - \Delta T_{\text{ref}}^h) + (\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^h) \quad (\text{IV-3})$$

Ce ΔT comprend donc deux termes, l'un relatif à l'effet de réflexion $(\Delta T_{\text{ref}}^{\text{eau}} - \Delta T_{\text{ref}}^h)$, l'autre dû au refroidissement superficiel $(\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^h)$; l'écart de température dû au refroidissement superficiel est un phénomène physique que la mesure au radiomètre ne peut faire varier.

L'écart de température dû à la réflexion peu par contre être maximisé ou minimisé grâce à l'emploi d'un radiomètre polarisé.

Ces considérations nous ont amenées à étudier les possibilités de détection des nappes d'hydrocarbures à l'aide d'un radiomètre polarisé, nous avons effectué deux calculs, l'un avec un ciel rayonnant comme un corps noir, l'autre avec notre modèle de ciel réel. Nous avons ensuite testé en laboratoire les résultats du calcul effectué avec un ciel corps noir, nous n'avons pu encore tester notre méthode in situ.

Les calculs et les expériences qui suivent ont été faits pour un filtre de bande passante $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$. En effet ce mode de détection des hydrocarbures est destiné à être utilisé par les avions ou les satellites or le filtre $8 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$ introduit dans les mesures une erreur importante due à la forte absorption du rayonnement par l'atmosphère dans la zone $13 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$.

II - ETUDE THEORIQUE

Nous avons pris, pour les calculs, les résultats de M. VIOLLIER (réf. 15) qui a montré que le pouvoir de réflexion des hydrocarbures est, dans l'infrarouge, beaucoup plus important que celui de l'eau. Il a déterminé, pour les produits étudiés, les coefficients n et k qui interviennent dans le calcul de R_λ et R_r (annexe) : il semble que l'on puisse prendre pour ces coefficients les valeurs suivantes :

$$n = 1,4 \qquad k = 0,1$$

Il faut cependant remarquer que ces coefficients n'ont pas été déterminés pour toutes la bande qui nous intéresse, les mesures s'arrêtant à $\lambda = 10 \mu\text{m}$.

Nous avons utilisé pour ces calculs le même programme que celui du chapitre II.

a/ Ciel rayonnant comme un corps noir

Les figures 34 et 35 représentent les variations de ΔT^{λ} et ΔT^r en fonction de l'angle d'incidence.

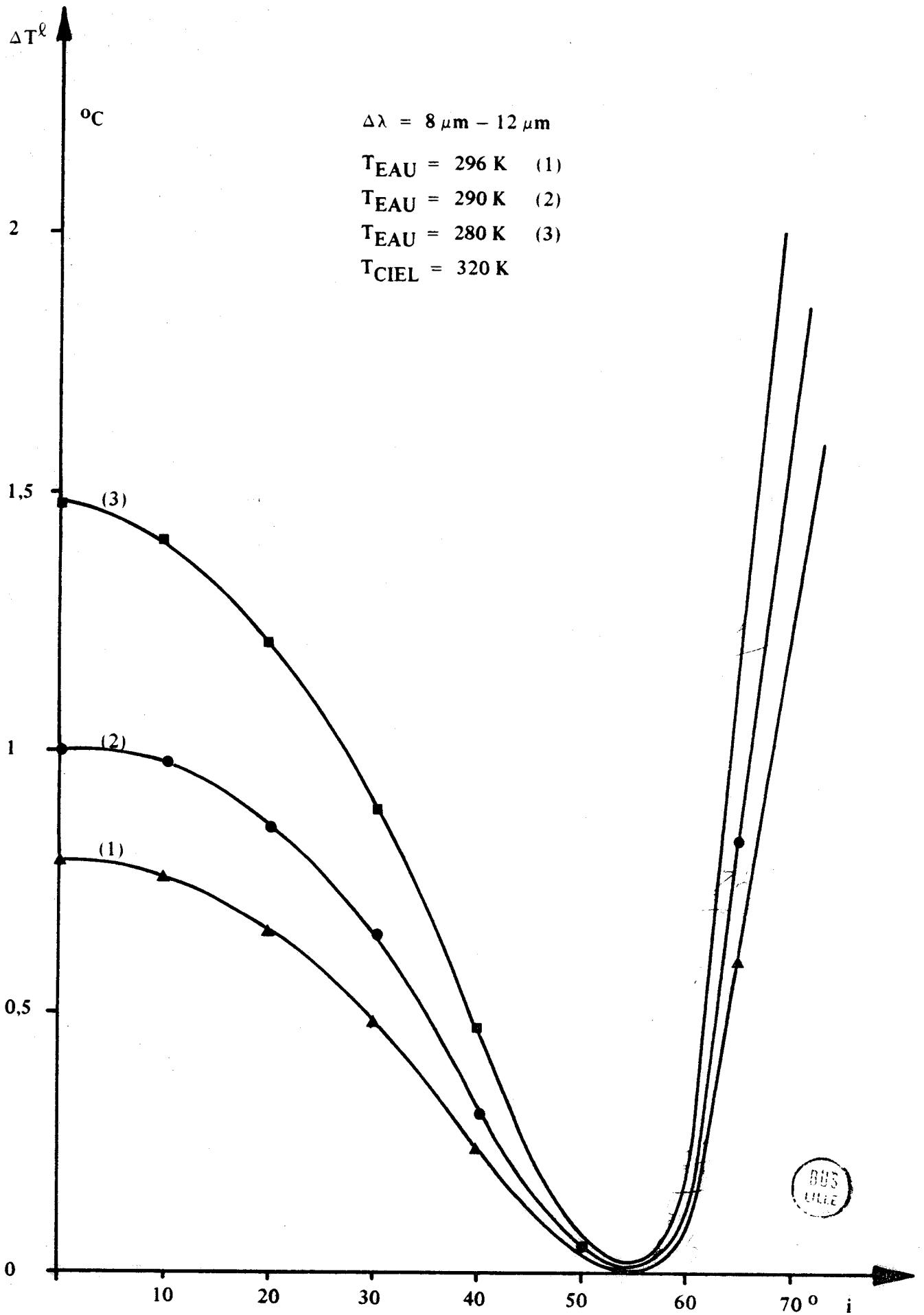
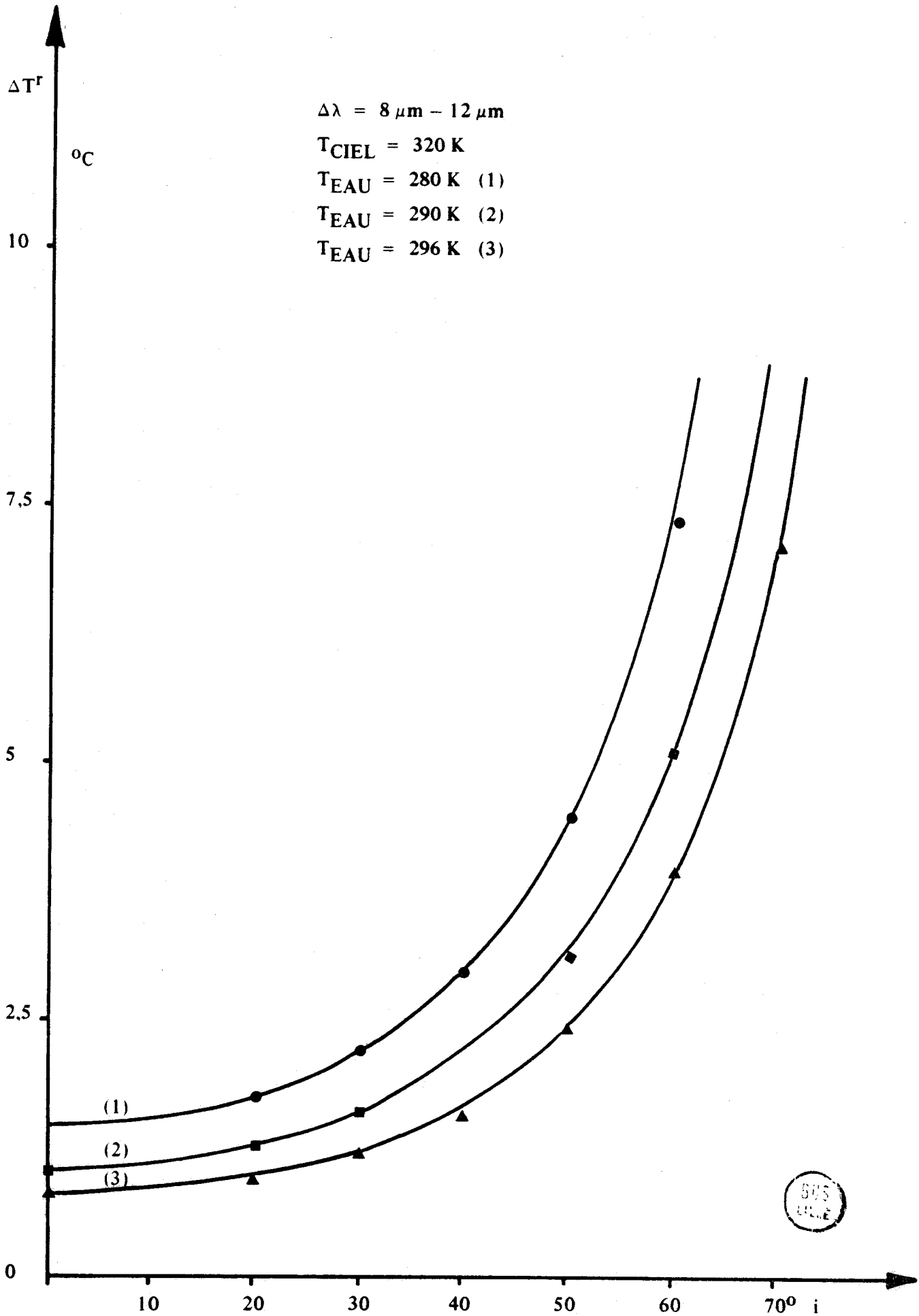


Figure 34



La température du ciel a été prise égale à 320 K, celle de l'huile variant de 280 K à 296 K.

Nous pouvons tout d'abord relever les valeurs importantes de l'erreur de réflexion ΔT^r .

D'autre part nous constatons un glissement de l'angle de BREWSTER qui passe de 50° pour l'eau à 55° pour les hydrocarbures ; un troisième point est à souligner c'est la très faible valeur de ΔT^r pour l'angle d'incidence i_B (incidence Brewsterienne).

Par ailleurs l'allure générale des courbes obtenues est identique à celle des courbes de l'eau (fig. 4 et 8).

b/ Modèle de ciel réel

Les figures 36 et 37 nous permettent de comparer les résultats théoriques obtenus pour les hydrocarbures et pour l'eau, les températures étant pour l'huile et pour l'eau de 280 K.

Nous pouvons constater que nous retrouvons le glissement de l'angle i_B vers 55° .

Les courbes tracées à partir des calculs effectués avec notre modèle de ciel réel présentent des variations comparables à celles tracées pour un ciel rayonnant comme un corps noir, mais il faut se rappeler que les erreurs de réflexion sont inverses :

- dans le cas d'un ciel rayonnant comme un corps noir chaud, la température apparente de l'eau est plus élevée que sa température réelle.

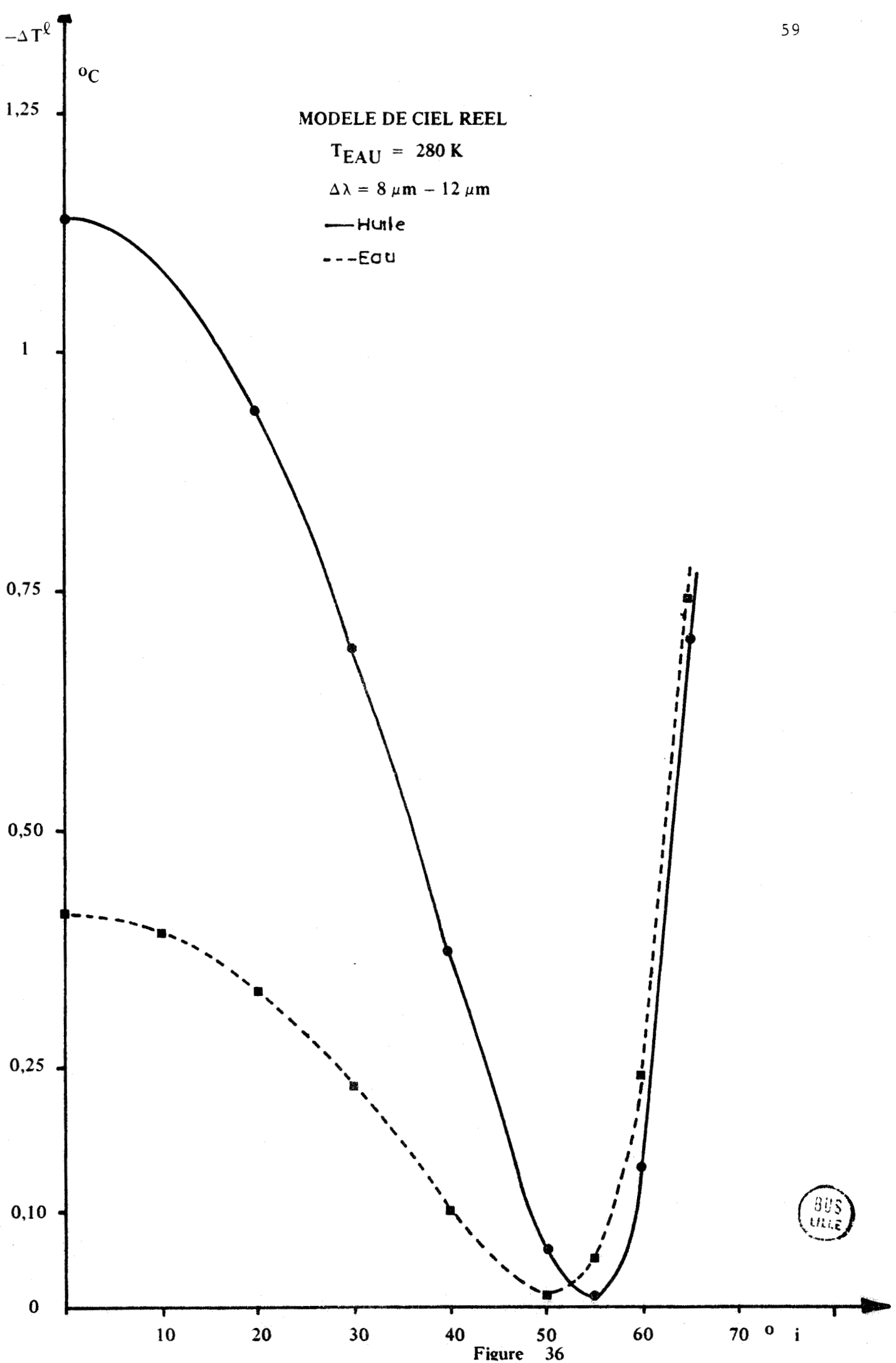
- dans le cas d'un ciel réel la température apparente, mesurée au radiomètre, est plus froide que la température réelle.

Nous avons cherché à tester la validité des calculs, pour ce faire nous avons réalisé une expérience en laboratoire.

III - EXPERIENCE EN LABORATOIRE

a/ Présentation

Nous avons utilisé pour ces expériences le même mode opératoire que pour l'eau (fig. 14), nous avons répandu à la surface de l'eau une couche d'huile ; cette huile est la même que celle utilisée au cours des travaux précédents (réf. 14).



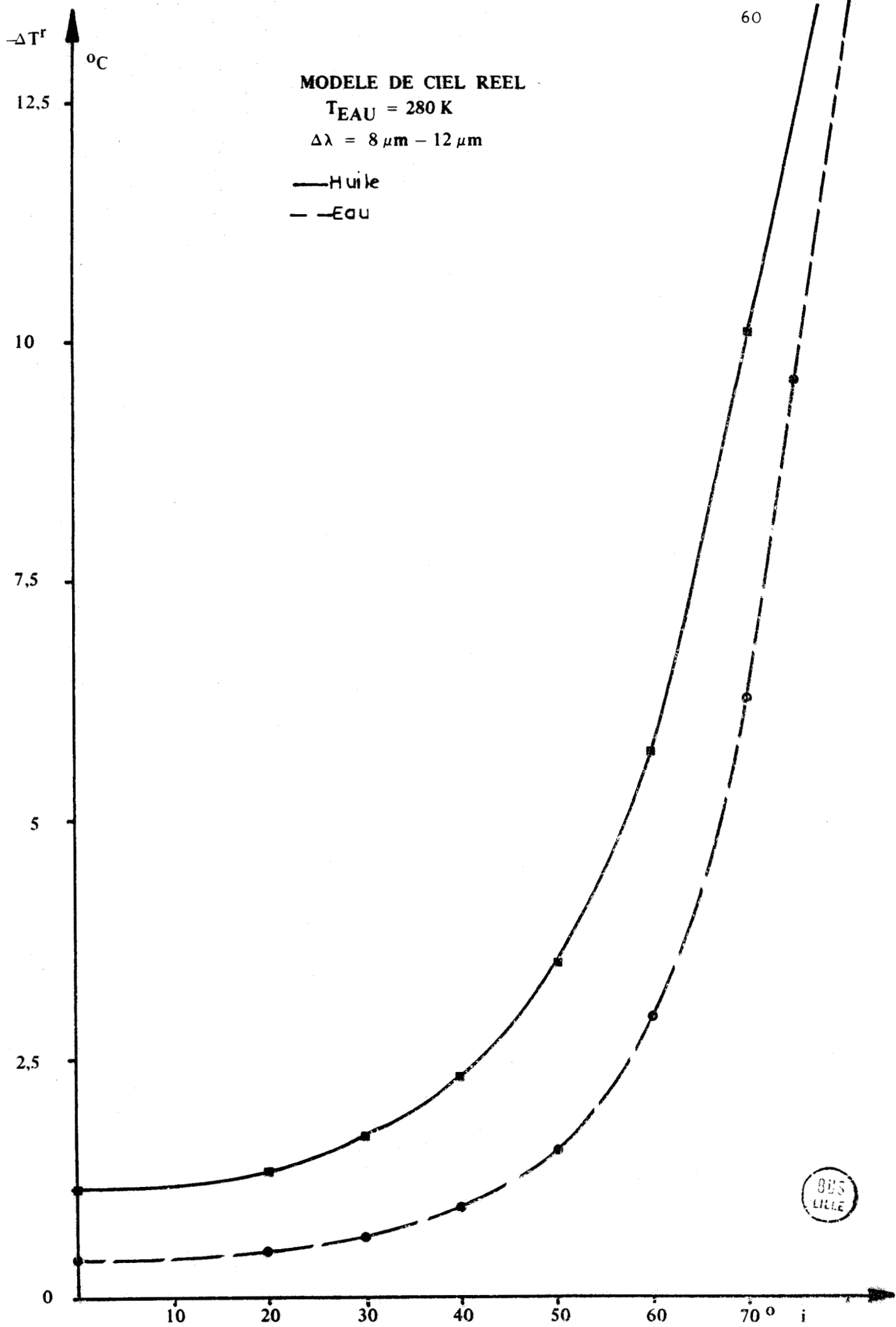


Figure 37



Nous avons veillé tout particulièrement à l'agitation de la surface de façon à éviter la formation d'un gradient superficiel qui peut être très important avec des hydrocarbures, nous avons veillé aussi à ne pas casser le film formé. La température du ciel a été maintenue constante et égale à 320 K, la température de l'eau étant, elle, égale à 290 K.

b/ Résultats

Les résultats des expériences effectuées, ainsi que les résultats théoriques ont été reportés sur les figures 38 et 39, ce qui nous permet de confronter nos calculs à la réalité.

Des divergences sérieuses apparaissent entre les divers résultats, nous allons les recenser, nous essaierons ensuite de les expliquer :

- les valeurs de $\Delta T^l = \Delta T^r = \Delta T$ calculées pour un angle d'incidence nul sont nettement plus faibles que les valeurs réelles

$$\Delta T^{\text{exp}}(0^\circ) - \Delta T^{\text{calc}}(0^\circ) = 0,3^\circ \text{ C}$$

- les valeurs de ΔT^l calculées restent inférieures aux valeurs expérimentales tant que i est inférieur à 60° .

- les valeurs de ΔT^r calculées restent inférieures aux valeurs expérimentales tant que i est inférieur à 37° .

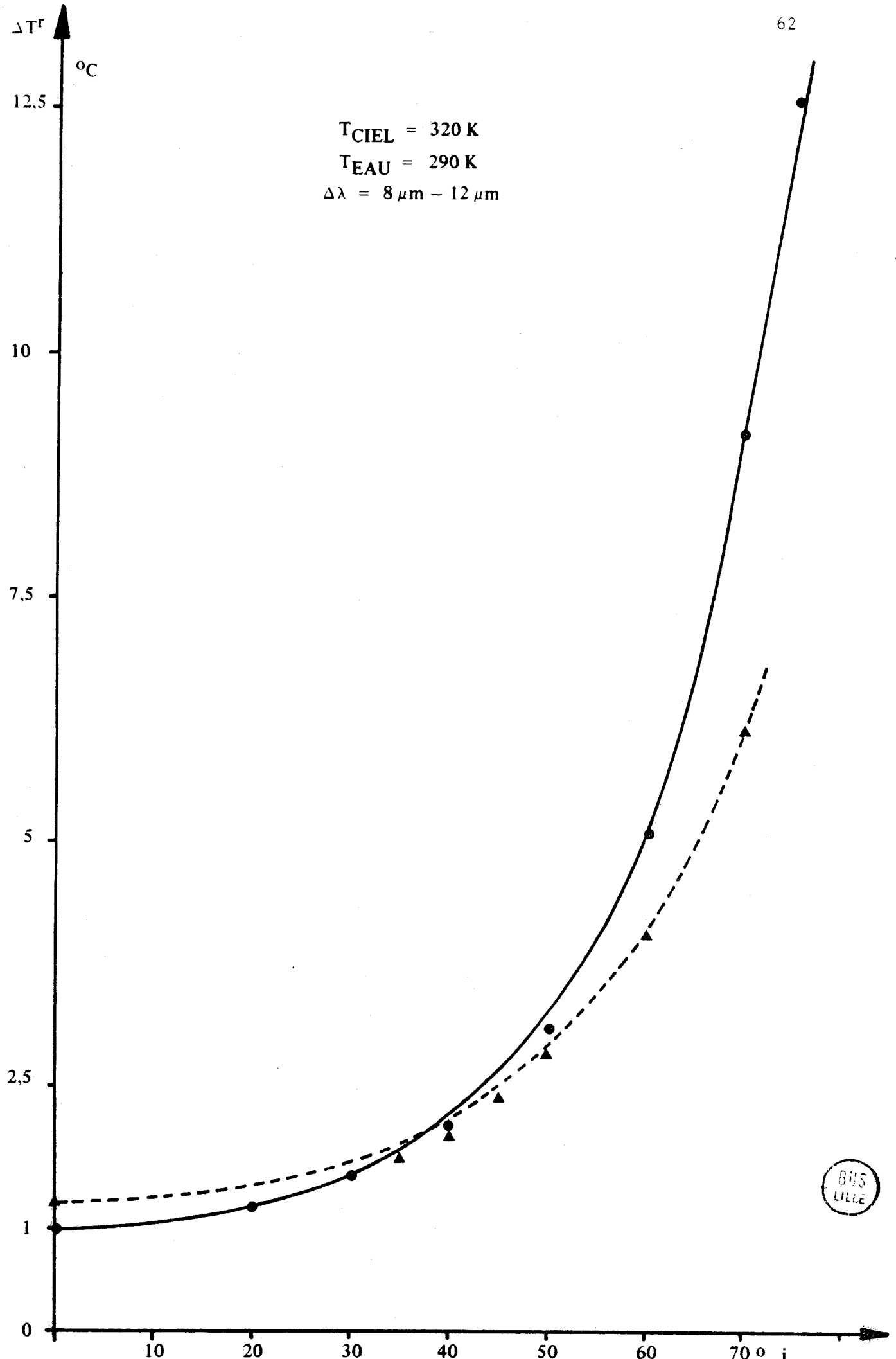
- pour des valeurs de i telles que $i > 37^\circ$ pour ΔT^r et $i > 60^\circ$ pour ΔT^l , les valeurs théoriques deviennent très nettement supérieures aux valeurs réelles.

- l'angle de BREWSTER est égal à 57° en pratique alors que les calculs nous donnaient $i_B = 55^\circ$.

- le ΔT^l minimum, $\Delta T^l(i'_B)$, calculé est différent du $\Delta T^l(i_B)$ expérimental :

$$\Delta T^l \text{ exp}(i_B) - \Delta T^l \text{ calc}(i'_B) = 0,15^\circ \text{ C}$$

Cet inventaire étant fait nous allons essayer d'expliquer ces différences et de voir si les calculs peuvent nous permettre de tirer des conclusions malgré les différences notables entre théorie et expérience.



$T_{\text{CIEL}} = 320 \text{ K}$
 $T_{\text{EAU}} = 290 \text{ K}$
 $\Delta\lambda = 8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$



Figure 38

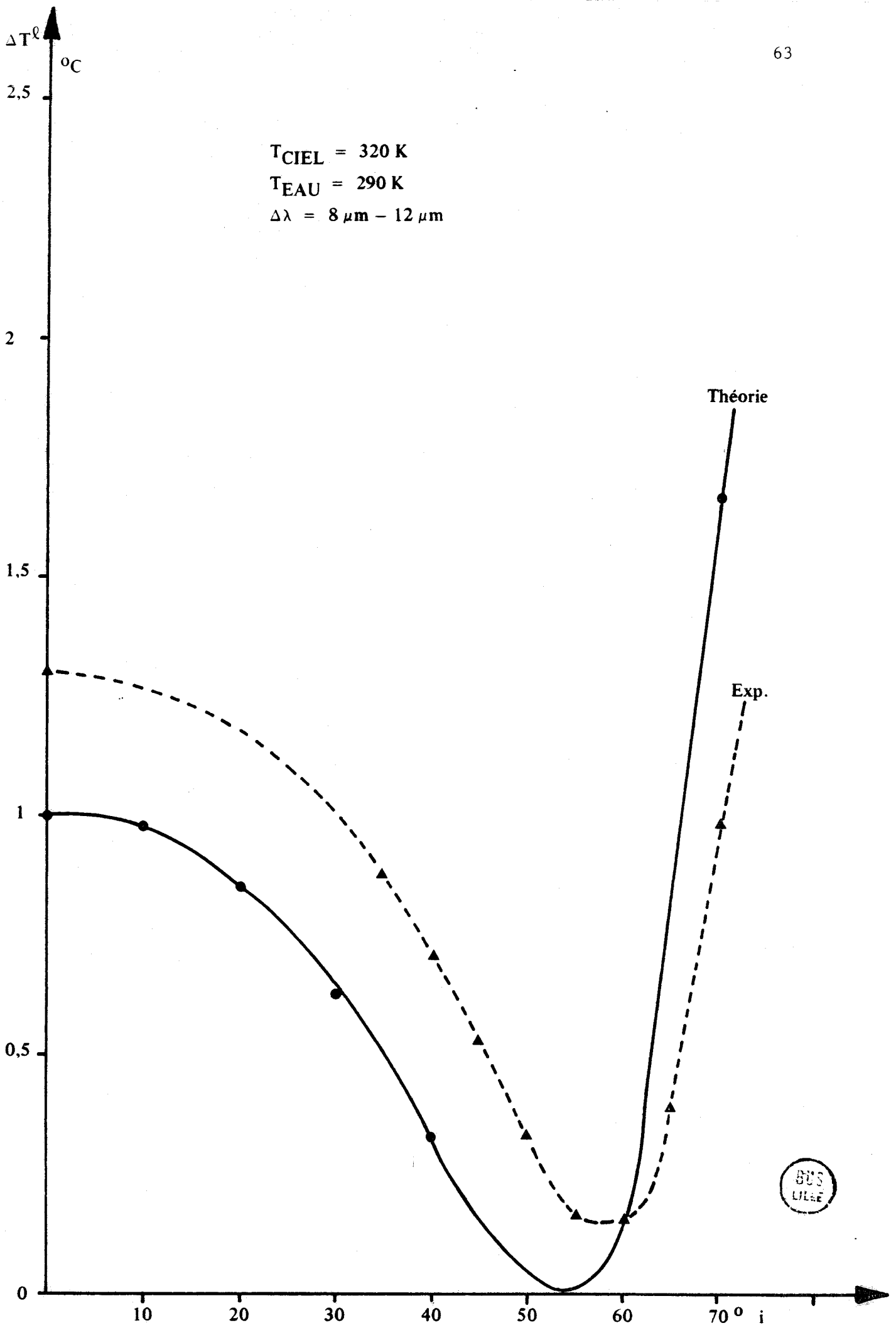


Figure 39

Les deux données principales qui peuvent influencer sur les valeurs de ΔT^{ℓ} et ΔT^r sont les indices n et k , l'angle d'ouverture du radiomètre et les variations de l'angle de visée dues à l'agitation de la surface. Les valeurs de n et k utilisées dans notre calcul sont $n = 1,4$ et $k = 0,1$ pour toute la bande $8 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$, nous avons essayé de faire varier ces indices, et de trouver ainsi un couple de valeur mieux adaptés, les variations admises étant bien entendu très faibles et centrées sur les valeurs déterminées après l'expérience de M. VIOLLIER ; nous n'avons pas réussi, les variations faibles de n et k entraînant des variations très fortes de ΔT^{ℓ} et ΔT^r , il serait très intéressant que les mesures des indices de réflexion de l'huile soient reprises, il n'existe en effet pratiquement aucune mesure de ces indices, mises à part celles que nous avons utilisées. La détermination des valeurs très précises de n et k sur l'intervalle spectral $8-12 \mu\text{m}$ permettrait le calcul de façon plus précise de ΔT^{ℓ} et ΔT^r ; néanmoins il reste un écart qui ne serait pas expliqué, c'est celui résultant de la différence d'allure des courbes ΔT^{ℓ} et ΔT^r en fonction de i ; les deux courbes, théoriques et expérimentale, se coupent à $i = 37^\circ$ pour ΔT^r et à $i = 60^\circ$ pour ΔT^{ℓ} . L'explication de ce phénomène peut se trouver dans l'angle d'ouverture du radiomètre et dans l'agitation de la surface de l'eau (variation de l'angle de visée) ; l'angle d'ouverture du radiomètre, égal à 10° , entraîne en effet une certaine intégration sur l'angle d'incidence, d'autre part nous verrons (chap. V) qu'une agitation de la surface de l'eau entraîne une augmentation de $\Delta T^{\ell}(i_B)$.

c/ Conclusions

L'accord entre les calculs et la théorie est loin d'être satisfaisant et ce travail devrait être repris ; mais il faut se rappeler que nous cherchons à détecter des nappes d'hydrocarbures en mer ; leur température exacte nous intéresse mais ce n'est pas le point le plus important. Au vu des courbes représentées sur la figure 37, la détection des nappes semble possible ; en utilisant le polariseur en position vibration perpendiculaire, nous constatons en effet un écart de température apparente de $2,5^\circ \text{C}$ environ entre l'eau et l'huile pour un angle d'incidence de 60° ; ce ΔT^r est calculé, il faut donc s'attendre à une différence réelle peut-être

plus faible, néanmoins l'écart entre les deux températures apparentes doit rester suffisamment important pour que la détection soit possible.

IV - MISE AU POINT D'UN MODE OPERATOIRE POUR LA DETECTION DES HYDROCARBURES

Nous avons vu au début de ce chapitre qu'un hydrocarbure répandu à la surface de l'océan présente une température plus faible que celle de l'eau sur laquelle il flotte ; ce phénomène est dû à la fois au refroidissement superficiel et à la différence de réflexion de l'énergie rayonnée par le ciel, que nous venons d'étudier en détail.

Les deux effets s'ajoutant, la température relevée par un radiomètre visant une nappe d'huile doit être beaucoup plus froide que celle relevée par ce même radiomètre quand il vide la surface dégagée de l'océan.

a/ Calculs

Les calculs effectués précédemment nous ont permis de tracer différentes courbes.

a-1/ Ciel rayonnant comme un corps noir

Nous avons reporté, sur la figure 40, les écarts entre la température apparente de l'huile et de l'eau dus à l'erreur de réflexion pour une position du polariseur tel qu'il transmette la vibration dont la direction de polarisation est perpendiculaire au plan d'incidence. Cette figure nous met à même de constater que :

- Le maximum de $\Delta T_r^{\text{huile}} - \Delta T_r^{\text{eau}}$ correspond à une incidence de 78° .

- La valeur du maximum dépend de la température de l'eau, nous avons en effet :

$$\text{pour } T_{\text{eau}} = 280 \text{ K} \quad \Delta T = \Delta T_{\text{ref}}^{\text{huile}}(78^\circ) - \Delta T_{\text{ref}}^{\text{eau}}(78^\circ) = 5,4^\circ \text{ C}$$

$$\text{pour } T_{\text{eau}} = 296 \text{ K} \quad \Delta T = \Delta T_{\text{ref}}^{\text{huile}}(78^\circ) - \Delta T_{\text{ref}}^{\text{eau}}(78^\circ) = 2,9^\circ \text{ C}$$

Nous avons ensuite reporté sur la figure 41 les écarts entre la température apparente de l'huile et de l'eau, pour une position du polariseur

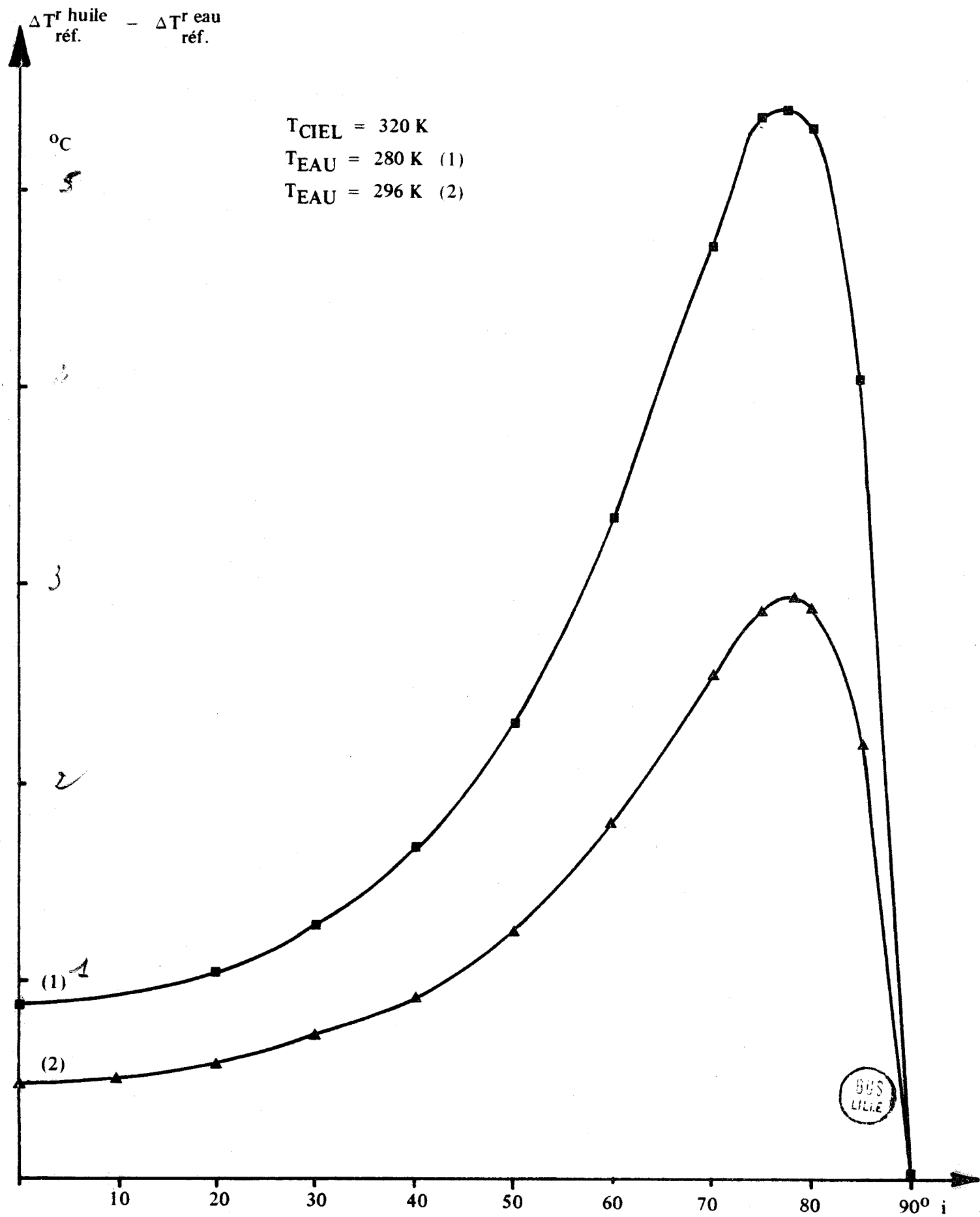


Figure 40

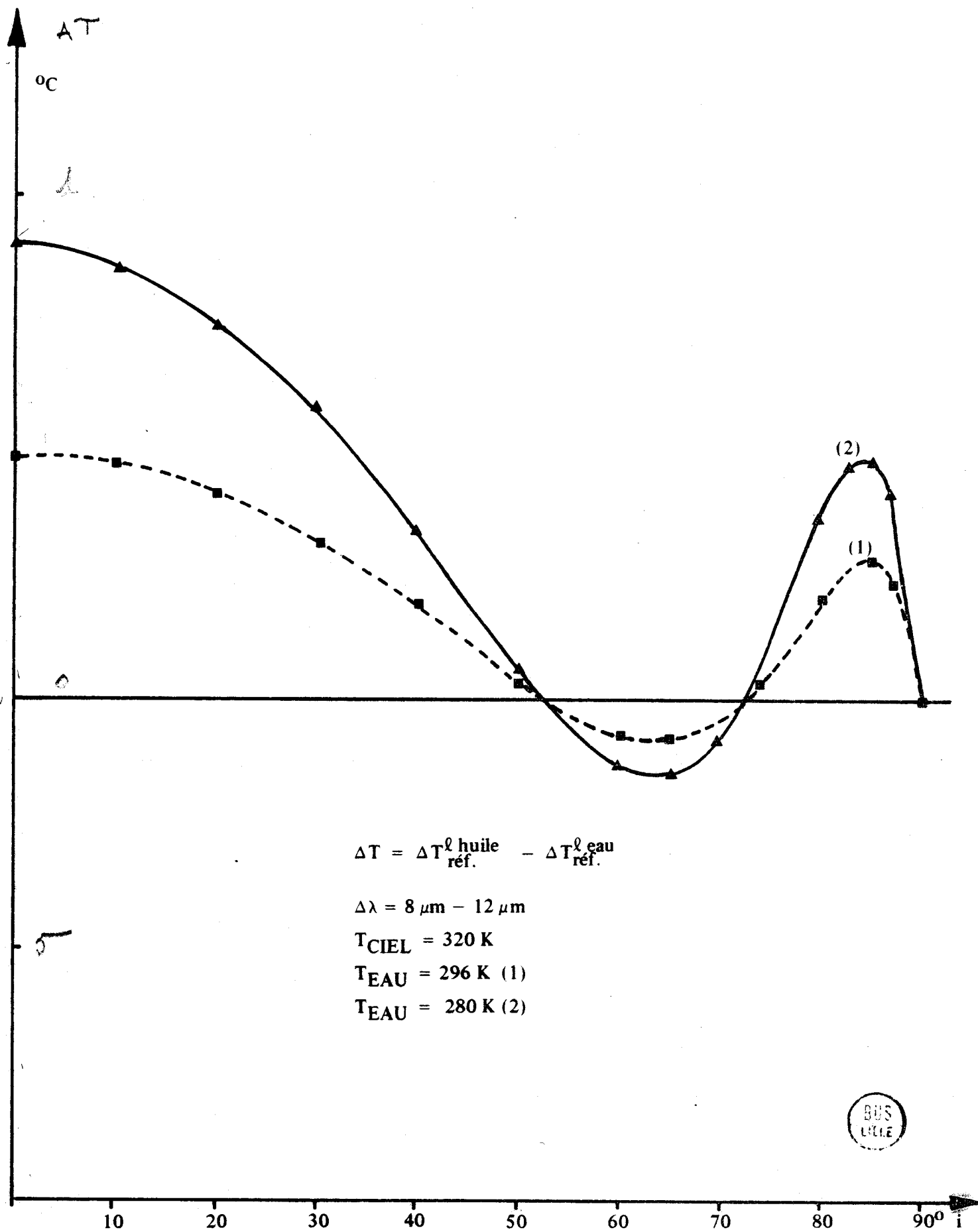


Figure 41



tel qu'il laisse passer, sans l'affaiblir, la vibration dont la direction de polarisation est parallèle au plan d'incidence ; ceci nous permet de

constater que la courbe $\Delta T_{\ell}^{\text{huile}} - \Delta T_{\ell}^{\text{eau}}$ en fonction de l'angle d'incidence i passe par deux extremum :

- un minimum négatif pour une incidence proche de 65°
- un maximum positif pour $i = 85^{\circ}$

Nous avons éliminé le point $i = 0^{\circ}$, car le fait d'utiliser un radiomètre polarisé n'influe pas sur ce point.

a-2/ Résultats obtenus avec un modèle de ciel réel

Les figures 42 et 43 nous montrent les résultats obtenus avec notre modèle de ciel réel. Nous pouvons constater que les courbes présentent des variations identiques aux précédentes ; les valeurs absolues sont différentes mais l'allure générale des courbes est semblable.

b/ Comparaison des calculs effectués avec des résultats expérimentaux

Tous les résultats expérimentaux dont nous faisons état ici ont été obtenus en laboratoire, donc avec un ciel rayonnant comme un corps noir. Nous avons reporté sur les figures 44 et 45 les résultats expérimentaux et théoriques, ce qui nous permet de les comparer ; la figure 44 nous montre que l'écart entre $\Delta T_{\ell}^{\text{huile}} - \Delta T_{\ell}^{\text{eau}}$ expérimentaux de l'huile et de l'eau est beaucoup moins important que l'écart théorique, le maximum est déplacé et se trouve pour $i = 55^{\circ}$ environ. Le maximum a atteint la valeur de $1,6^{\circ}$ C environ. Nous avons reporté sur la figure 45, $\Delta T_{\ell}^{\text{huile}} - \Delta T_{\ell}^{\text{eau}}$ en fonction de i nous pouvons constater que les valeurs absolues sont différentes mais que les courbes théoriques et expérimentales présentent un minimum assez marqué ; ce minimum correspond à un angle d'incidence de 70° pour la courbe expérimentale, la valeur de ce minimum est nettement plus importante pour la courbe expérimentale :

- $0,34^{\circ}$ C pour $i = 70^{\circ}$

alors que pour la courbe théorique nous avons :

- $0,15^{\circ}$ C pour $i = 65^{\circ}$

Comme prévu les valeurs expérimentales sont différentes des valeurs calculées mais l'allure générale des courbes est identique.

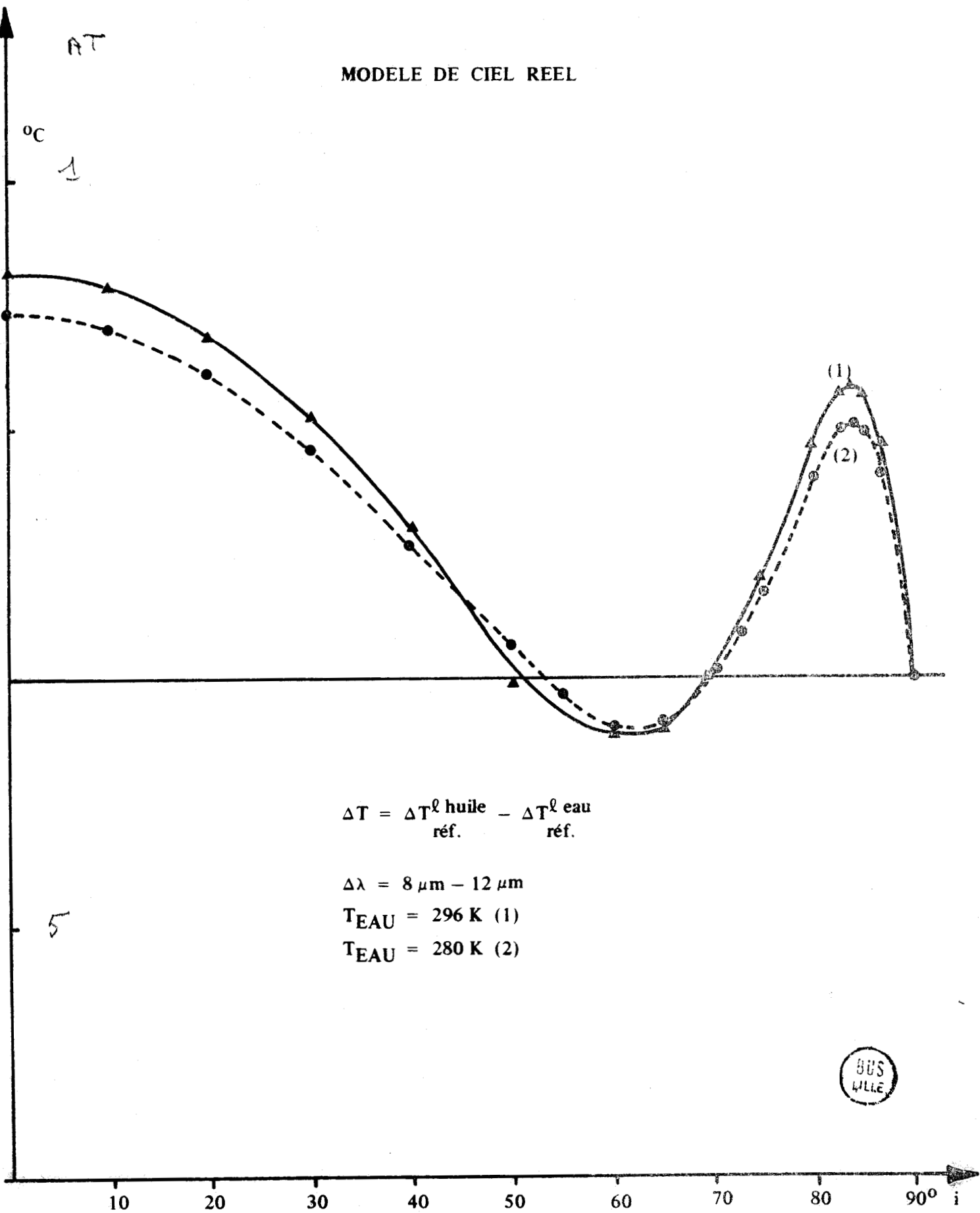


Figure 42

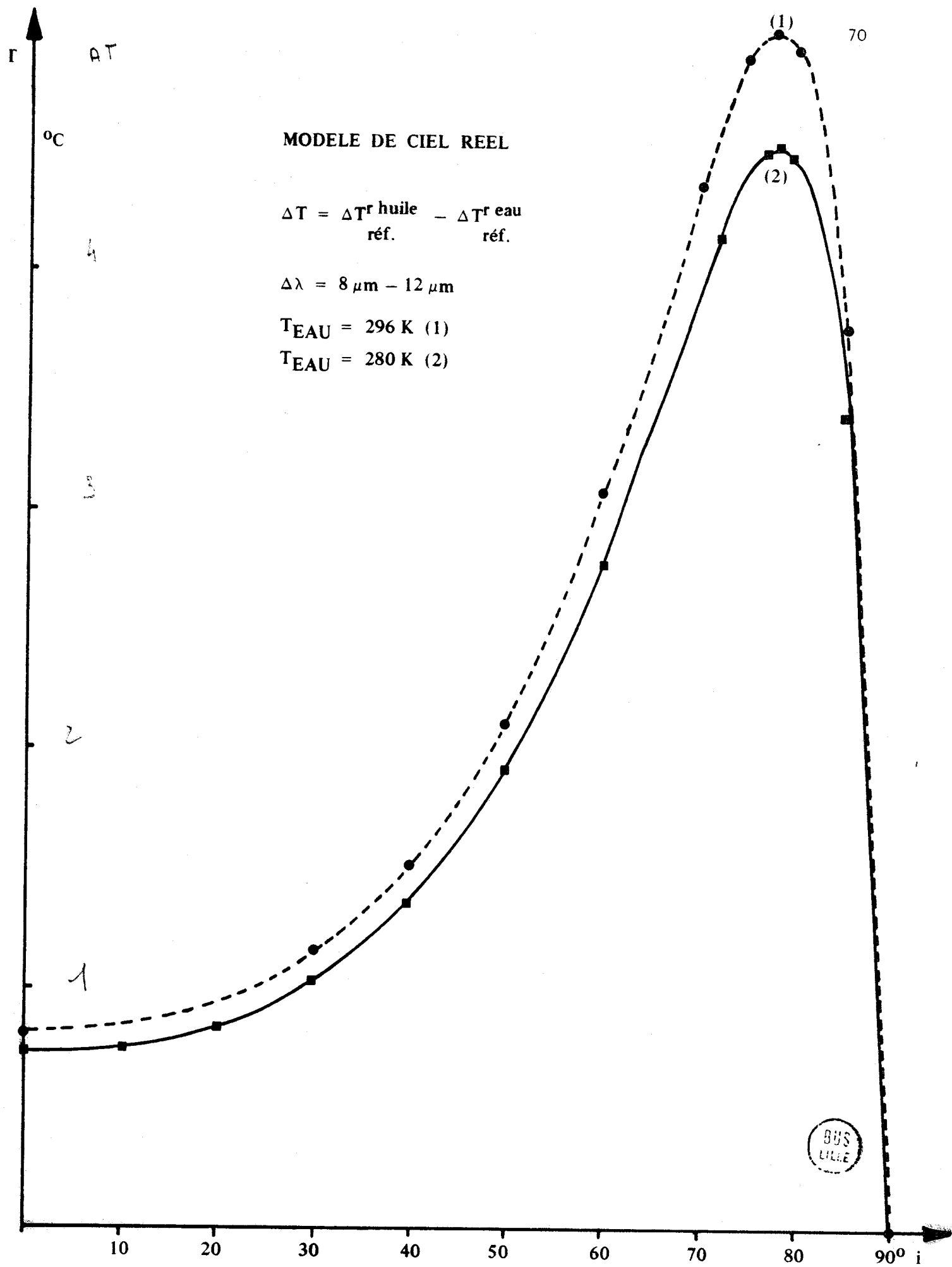


Figure 43

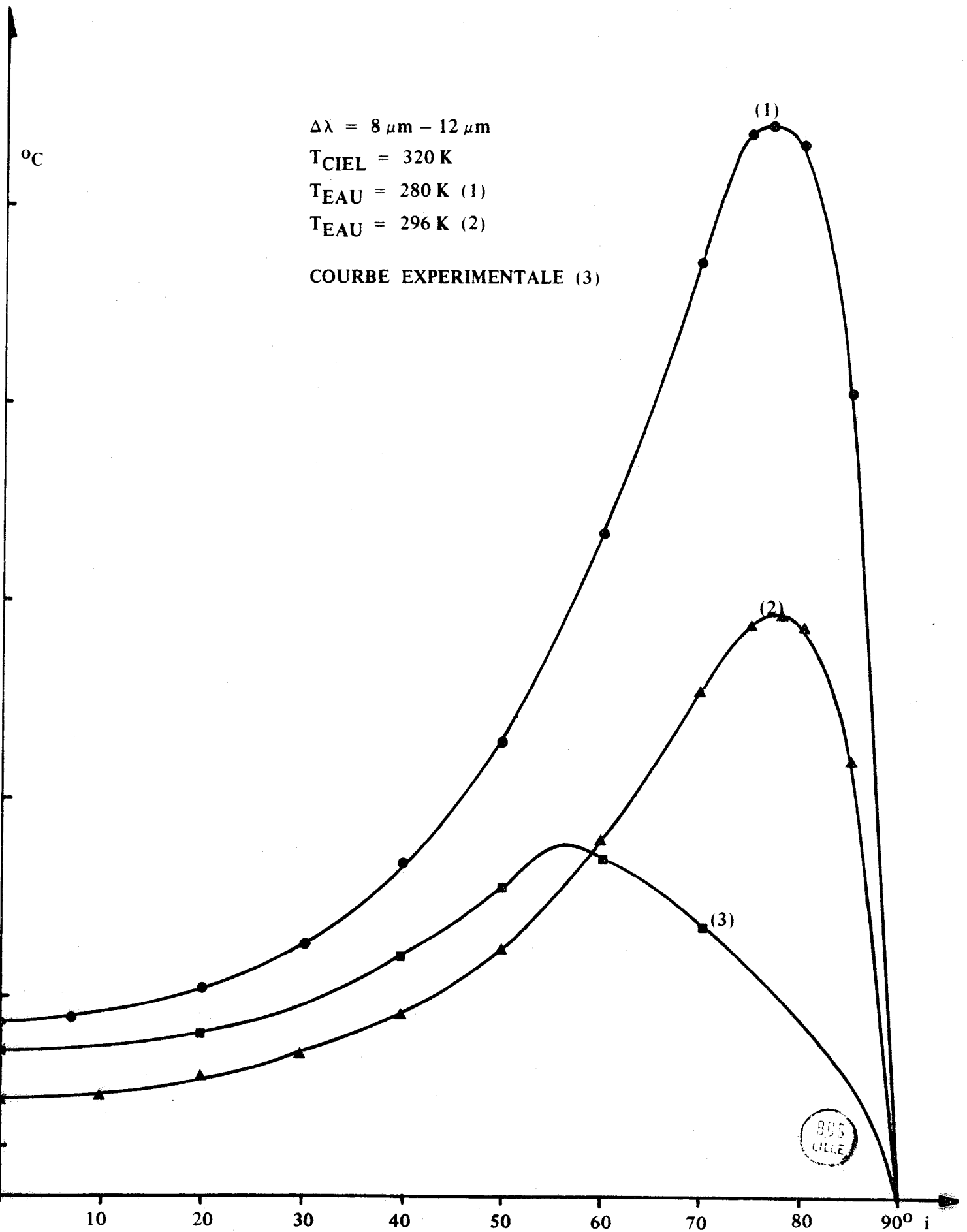


Figure 44

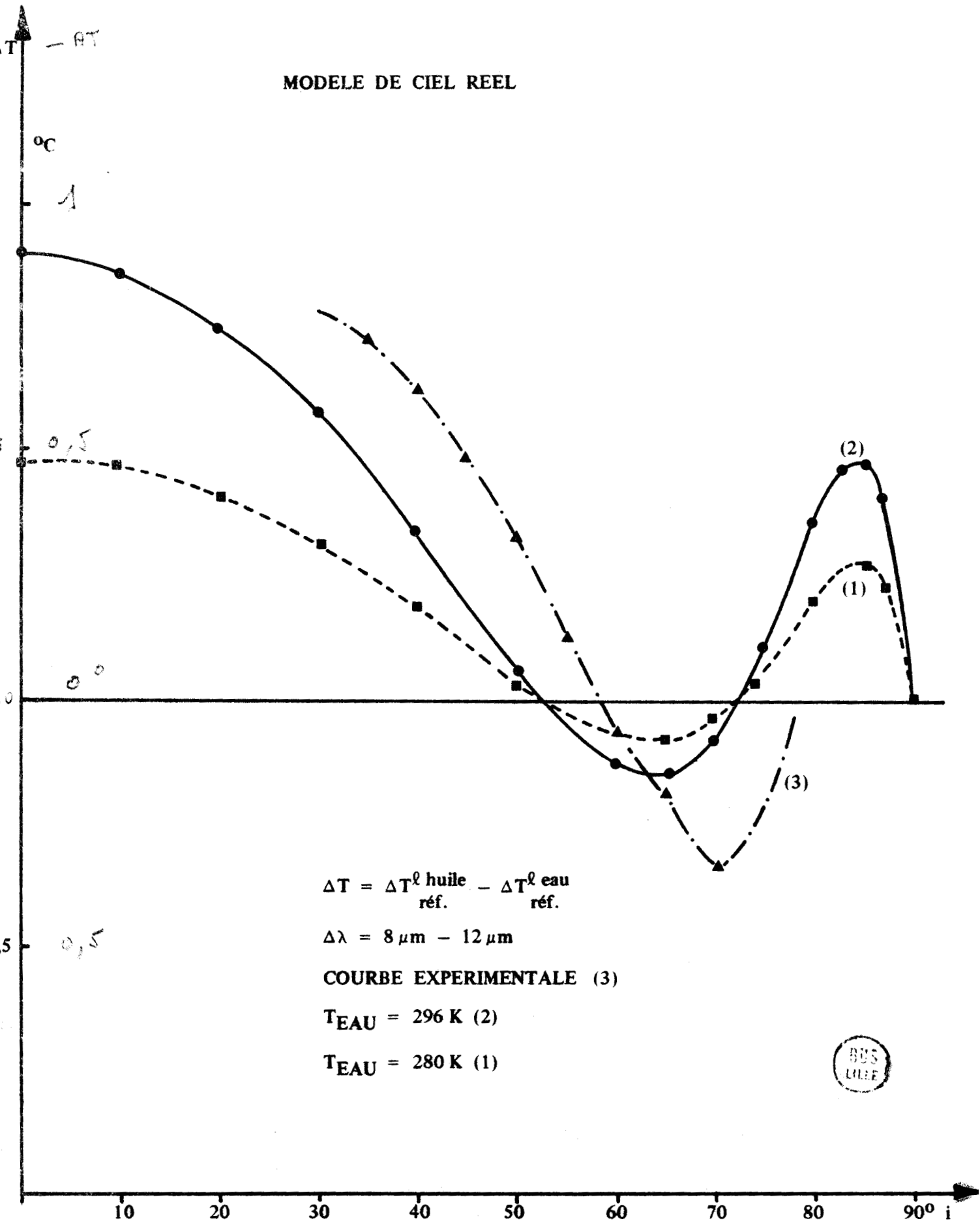


Figure 45

Nous pouvons donc penser que dans le cas d'un ciel réel, les courbes expérimentales correspondront aux courbes théoriques obtenues avec notre modèle de ciel réel. Nous appuyant sur cette hypothèse nous pouvons proposer un mode de détection des nappes d'hydrocarbures.

c/ Mode opératoire proposé

A la lumière des divers calculs que nous avons effectués nous sommes en mesure de proposer une méthode de détection des nappes d'hydrocarbures que l'on peut trouver à la surface de l'océan.

Il est bien évident que cette proposition devra être vérifiée in situ, et comparée à d'autres méthodes utilisées :

- photographies dans le spectre visible
- détection par réflexion d'ondes radar
- films de scanner infrarouge etc...

Il nous faut tout d'abord revenir sur le refroidissement superficiel (réf. 14) : celui-ci provoque un écart entre la température du film d'hydrocarbure et celle de l'eau sur laquelle il flotte, cet écart varie avec l'épaisseur du film, il passe de 0,52° C pour un film de 0,77 mm d'épaisseur à 2° C pour un film de 7 mm. Pour des films très minces, le refroidissement superficiel est inférieur à celui de l'eau qui est de l'ordre de 0,50° C. Ce phénomène explique que dans une expérience de détection de film nous n'ayons pas pu détecter les bords de la tache qui sont constitués d'une pellicule extrêmement mince (fig. 46).

La mesure de la température de surface d'une nappe d'huile devra être faite en deux temps :

- une première mesure sera faite avec le radiomètre polarisé orienté de façon à ce que le polariseur transmette la vibration dont la direction de polarisation est perpendiculaire au plan d'incidence, l'angle de visée étant proche de 55°, maximum présumé de $\Delta T_r^{\text{huile}} - \Delta T_r^{\text{eau}}$. Nous savons (cf. introduction) que nous avons entre la température radiométrique de l'eau et celle d'une nappe d'hydrocarbure un écart de température ΔT défini par (IV-3).

DETECTION VISUELLE

TEMPERATURE
APPARENTE
RADIOMETRIQUE

10-

10,5

7 ème PASSAGE

600 ft

13 h 26' 28"

11-

11,5

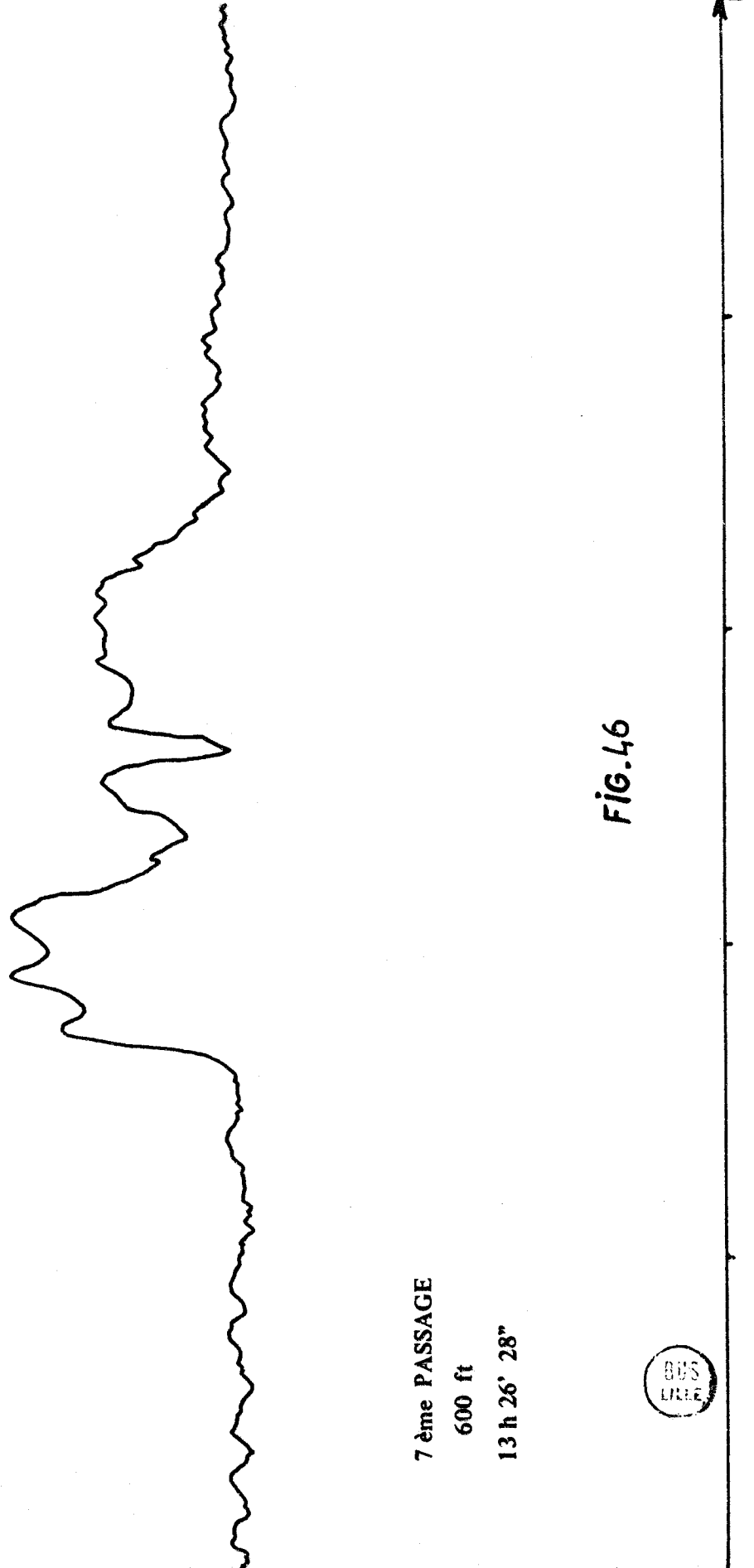


FIG.46



Cette formule nous permet de calculer approximativement T dans deux cas : pour une couche épaisse (de l'ordre de 5 mm) nous aurons

$$\Delta T_{ref}^{r \text{ eau}} - \Delta T_{ref}^{r \text{ huile}} \approx - 1,4^\circ \text{ C}$$

$$\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^{\text{huile}} \approx - 1,5^\circ \text{ C}$$

soit

$$\Delta T \approx - 3^\circ \text{ C}$$

pour une couche mince (de l'ordre de 0,8 mm) nous aurons

$$\Delta T_{ref}^{r \text{ eau}} - \Delta T_{ref}^{r \text{ huile}} \approx - 1,4^\circ \text{ C}$$

$$\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^{\text{huile}} \text{ est pratiquement nul}$$

soit

$$\Delta T \approx - 1,4^\circ \text{ C}$$

Dans ces calculs approximatifs nous avons tenu compte du fait que le $\Delta T_{ref}^{r \text{ huile}} - \Delta T_{ref}^{r \text{ eau}}$ expérimental est beaucoup plus faible que celui calculé à l'aide de notre programme.

- la deuxième partie de la mesure sera faite avec un angle d'incidence de 70° environ, la direction privilégiée du polariseur étant parallèle au plan d'incidence. Nous aurons alors :

dans le cas d'une couche épaisse

$$\Delta T_{ref}^{\ell \text{ eau}} - \Delta T_{ref}^{\ell \text{ huile}} \approx + 0,3^\circ \text{ C}$$

$$\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^{\text{huile}} \approx - 1,5^\circ \text{ C}$$

soit

$$\Delta T \approx - 1,2^\circ \text{ C}$$

dans le cas d'une couche mince

$$\Delta T_{ref}^{\ell \text{ eau}} - \Delta T_{ref}^{\ell \text{ huile}} \approx + 0,3^\circ \text{ C}$$

$$\Delta T_s^{\text{eau}} - \Delta T_s^{\text{huile}} \text{ très peu différent de zéro}$$

soit

$$\Delta T \approx + 0,3^\circ \text{ C}$$

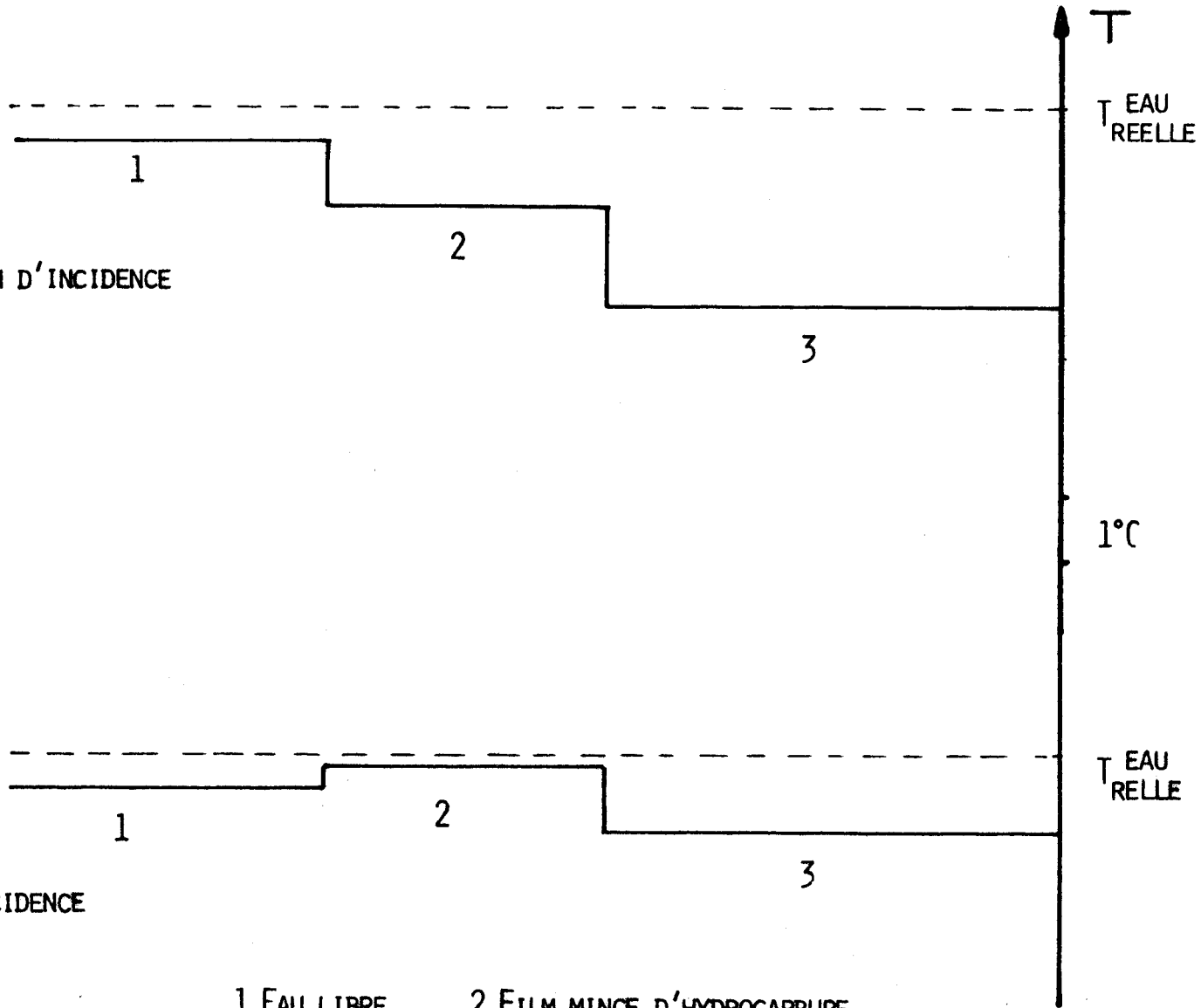
Ainsi, en survolant une nappe d'hydrocarbure et en mesurant la température apparente à l'aide d'un radiomètre polarisé dont la direction privilégiée est perpendiculaire au plan d'incidence et dont l'angle de visée est de 55° environ, nous verrons apparaître tout d'abord les films minces dont l'écart de température avec la surface de l'eau libre sera de l'ordre de $- 1,5^\circ$ C puis la couche épaisse qui présentera un écart de température de l'ordre de $- 3^\circ$ C.

Un deuxième survol de la nappe sera réalisé, le radiomètre étant orienté pour que la direction privilégiée du polariseur soit parallèle au plan d'incidence, et que l'angle de visée soit de 70° environ, nous aurons alors, pour les couches minces un écart de température de $+ 0,3^\circ$ C et pour la couche épaisse un écart de $- 1,2^\circ$ C. La figure 47 montre les courbes de température de surface que nous devrions obtenir.

Cette façon de procéder élimine tout risque d'erreur, en effet une remontée d'eau froide, que l'on pourrait confondre avec une nappe d'hydrocarbure, après le premier survol, se différenciera après le deuxième, car nous n'aurions pas d'écart positif dans ce cas.

D'autre part la méthode proposée ici devrait permettre d'estimer séparément les dimensions de la tache centrale épaisse, et des films très fins qui forment le pourtour de la nappe. Cette méthode demande à être essayée in situ, de façon à pouvoir comparer les précisions de détermination d'étendue obtenues par les différents moyens utilisables.

DIRECTION
PRIVILEGIEE
DU POLARISEUR
PERPENDICULAIRE AU PLAN D'INCIDENCE
 $i = 55^\circ$



DIRECTION
PRIVILEGIEE
DU POLARISEUR
PARALLELE AU PLAN D'INCIDENCE
 $i = 70^\circ$

1 EAU LIBRE 2 FILM MINCE D'HYDROCARBURE
3 COUCHE EPAISSE



FIGURE 47

CHAPITRE V

ESSAIS EN MER DU RADIOMETRE RALI

I - INTRODUCTION

Les différents essais qui ont été faits en laboratoire ont permis de mettre au point une technique de mesure de la température de surface à l'aide d'un radiomètre polarisé. Avant d'effectuer des mesures in situ ils restaient des problèmes à régler, problèmes liés au fait que :

- la température extérieure n'est jamais constante, le modulateur, filtre et polariseur du radiomètre vont donc voir leur température varier, donc leurs coefficients de réflexion et de transmission vont se modifier. Ce point ne sera pas abordé ici, il est traité par J.C. VANHOUTTE (réf. 11).

- la surface de l'océan est rarement rigoureusement plane, or nous avons vu que le choix de l'angle d'incidence a une grande importance, nous avons donc étudié l'influence de l'agitation de la surface sur la précision des mesures.

Nous avons ensuite comparé les résultats de RALI à ceux que l'on peut obtenir en appliquant une méthode de correction de l'erreur de réflexion proposée par P.M. SAUNDERS.

Dans ce chapitre nous étudierons donc dans une première partie l'influence de l'état de la mer, dans une deuxième partie les résultats obtenus par la méthode de P.M. SAUNDERS et les résultats obtenus avec RALI en mer.

II - INFLUENCE DE LA NON PLANEITE DE LA SURFACE VISEE SUR LA MESURE

Les vagues qui agitent la surface de la mer, sous l'effet du vent, provoquent une variation de l'angle de visée du radiomètre ; nous avons vu (chap. III-§I) que le choix de l'angle d'incidence a une grande importance, les vagues provoquant une variation de cet angle de visée doivent influencer sur la mesure.

L'effet de ces variations a été étudié par P.Y. DESCHAMPS, P. LECOMTE et J.C. VANHOUTTE (réf. 17). Nous rappellerons l'influence de la vitesse du vent sur le coefficient d'amélioration β_l , nous savons en effet que ce coefficient ne dépend pas de la température de l'eau, et que connaissant ces variations nous pouvons recalculer les variations de ΔT^l , pour des conditions déterminées (T_{eau} et $I_{\lambda_s}(i)$).

Nous avons introduit (réf. 16) dans le calcul une distribution de pentes de vagues définie par COX et MUNK :

$$p(z_x, z_y) dz_x dz_y = \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp - \frac{z_x^2 + z_y^2}{\sigma^2} dz_x dz_y$$

la variance σ^2 étant liée à la vitesse du vent par la formule :

$$\sigma^2 = 0,003 + 5,12 \cdot 10^{-3} \cdot V$$

V est la vitesse du vent exprimée en mètre par seconde.

Les résultats obtenus sont rappelés sur la figure 48, où on a porté les variations du coefficient d'amélioration β_λ en fonction de l'angle d'incidence i , pour différentes valeurs de vitesse de vent.

Ces courbes amènent à faire plusieurs remarques ;

- tout d'abord nous constatons une augmentation de β_λ avec la vitesse du vent, c'est à dire que notre mesure va perdre de sa précision au fur et à mesure de l'augmentation de l'agitation de la surface de l'eau ;
 - nous pouvons constater ensuite que l'angle le plus favorable à la mesure change avec l'augmentation de la vitesse du vent, il passe en effet de 50° pour une mer calme à 45° pour une mer agitée (vent de 15 m.s^{-1}).
- Néanmoins le facteur d'amélioration β_λ reste inférieur à 1 même pour les vents les plus forts, quand l'angle d'incidence reste fixé à 50° , la mesure sera donc toujours meilleure avec un radiomètre polarisé incliné à 50° qu'avec un radiomètre classique visant la surface à l'incidence normale.

Cette variation de β_λ explique une partie des erreurs que nous avons constatées dans les expériences effectuées en laboratoire (chap. III §I), l'agitation de la surface, que nous étions obligés de maintenir pour supprimer les possibilités de gradient superficiel, correspondant à un vent de 3 ou 4 m.s^{-1} environ. En conclusion de ce calcul nous pouvons voir que lors de mesures en mer nous constaterons une perte de précision dans la mesure de la température de surface de l'océan, la surface de la mer n'étant en effet jamais rigoureusement plane.

III - EXPERIENCE EFFECTUEE A BORD DU NAVIRE METEOROLOGIQUE STATIONNAIRE

FRANCE II

Afin d'essayer notre radiomètre dans des conditions réelles, nous avons monté une expérience à bord de N.M.S. FRANCE II qui partait pour une campagne d'observation au point Kilo (45N , 16W) qui se trouve, à 300 nautique environ du Cap Finistère, du 26 décembre 1973 au 24 janvier 1974 .

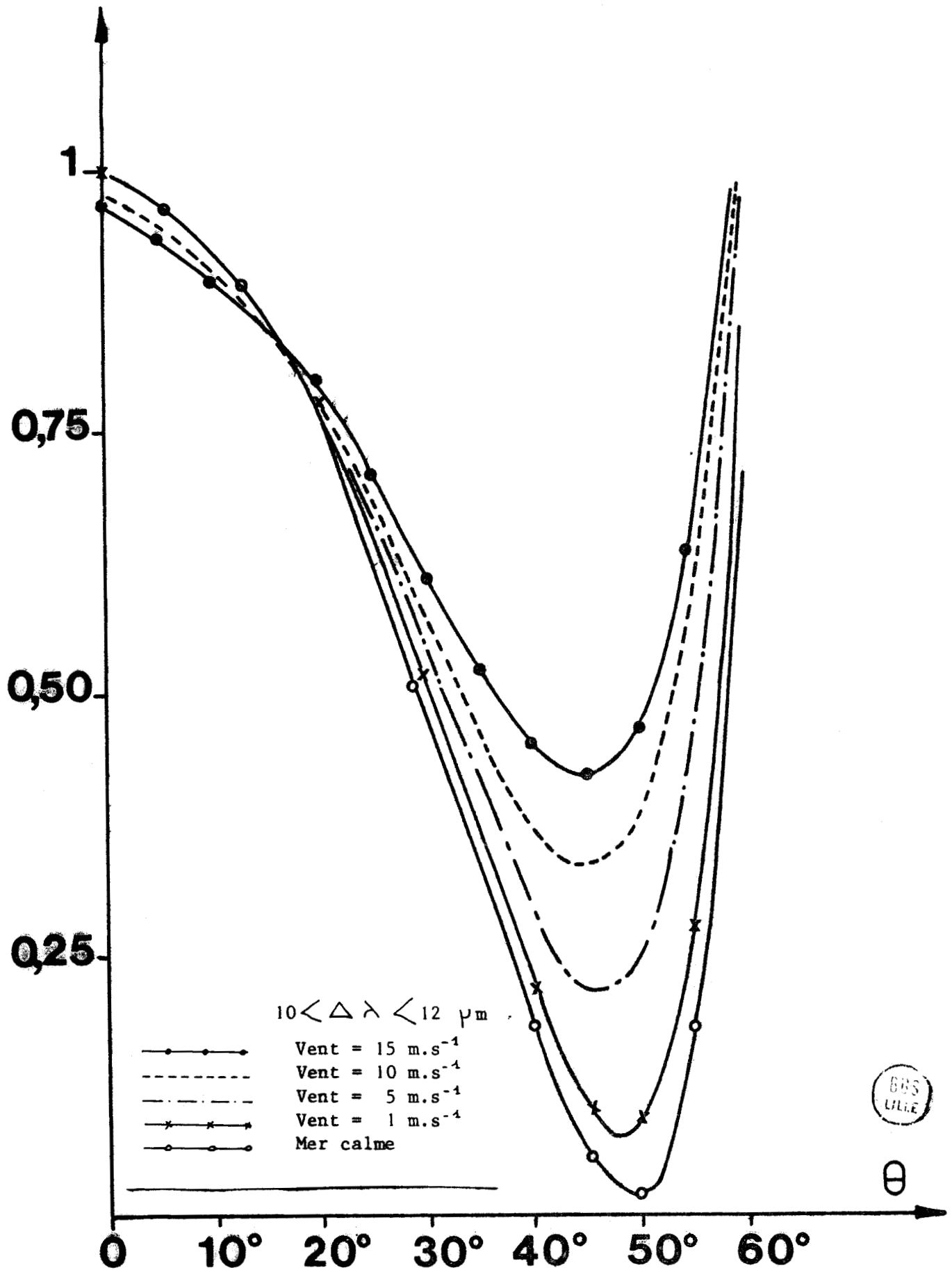


FIGURE 48: FACTEURS DE DIMINUTION D'ERREUR FONCTION DE L'ANGLE Θ POUR UN CIEL CLAIR ET UNE MER AGITEE

a/ Présentation

Le N.M.S. FRANCE II est un bâtiment qui transmet, au Service Météorologique Métropolitain, les résultats d'observations faites en mer. Ce navire effectue des mesures météorologiques toutes les heures, dont certaines nous intéressent particulièrement :

- mesure de la température de l'eau
- observation de la nébulosité
- mesure de la hauteur des nuages
- mesure de la vitesse du vent
- mesure de la hauteur de la houle et de la mer du vent
- calcul de l'humidité relative

Afin de compléter ces mesures, qui sont faites régulièrement, nous avons installé à bord un pyranomètre et un pyrgéomètre ; ces deux appareils mesurent le flux descendant dans un angle solide de 2π , le pyrgéomètre mesure le flux infrarouge, le pyranomètre le flux dans le spectre visible. Nous avons monté, d'autre part, en plus du radiomètre polarisé RALI, un radiomètre classique (BARNES PRT5) et la "thermopile du ciel" . ce dernier étant utilisé pour mesurer le rayonnement infrarouge descendant dans une direction (réf. 6 chap. III §II).

b/ Dispositif expérimental

Les photos 1 et 2 nous montrent l'installation du matériel à bord du N.M.S. FRANCE II, le radiomètre polarisé a été installé à babord vers l'arrière du bâtiment (1), il vise l'eau sous une incidence de 50° environ, grâce à ce montage nous visons une surface peu troublée par la présence ou la passage du bateau.

La thermopile (radiomètre auxiliaire)(2) est fixée sur le même bâti que le radiomètre, elle vise le ciel avec un angle de 50° environ.

Une thermistance (3) nous permet de mesurer la température de l'eau à une profondeur de 1 m environ, cette thermistance est éloignée du bâtiment pour limiter au maximum l'influence de celui-ci sur la mesure. Les pyranomètre (photo 3) et pyrgéomètre (photo 4) ont été installés de façon

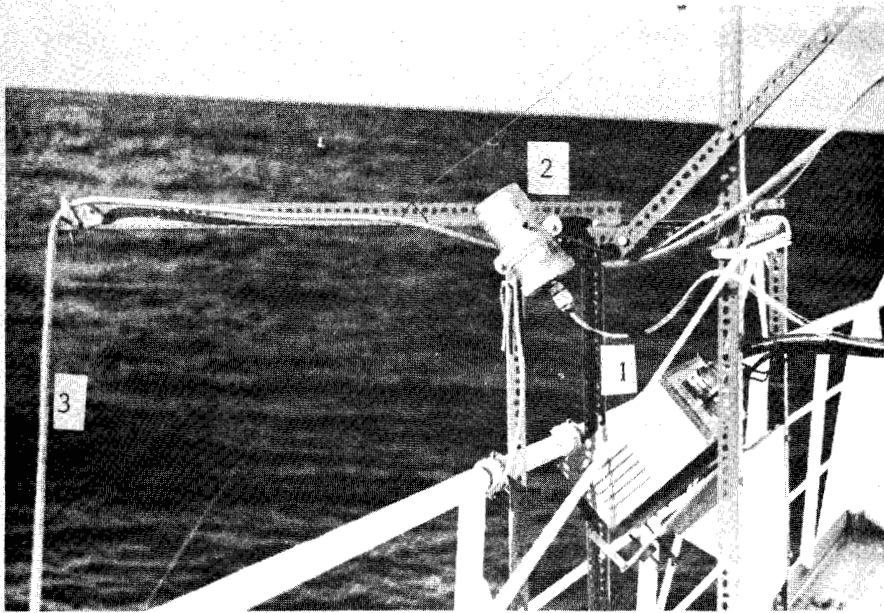


PHOTO N°1
Mesure de la température de surface

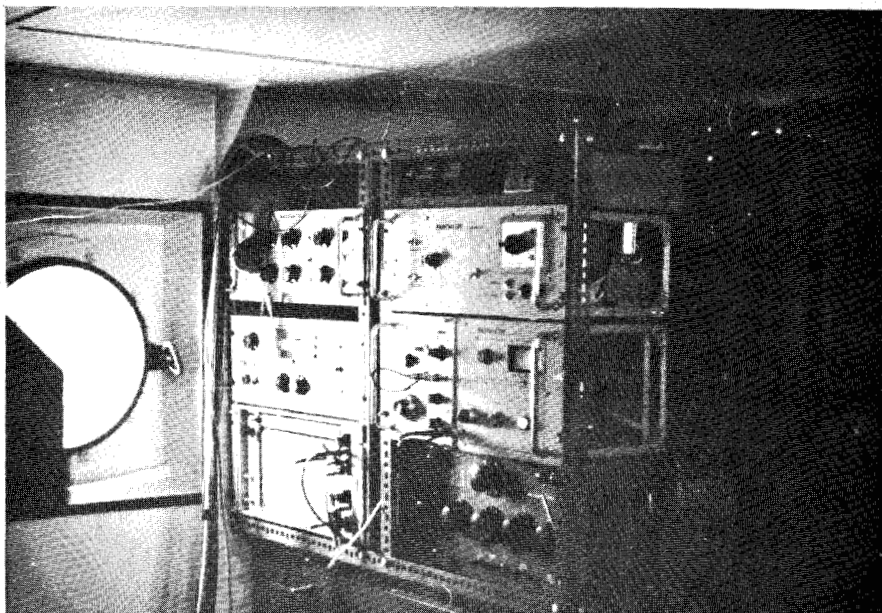


PHOTO N°2
Electronique associée aux mesures de rayonnement

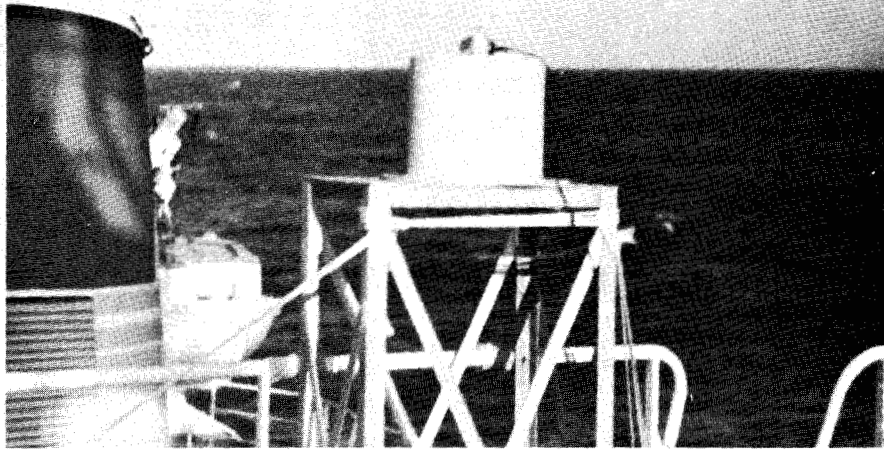


PHOTO N°3
Pyranomètre

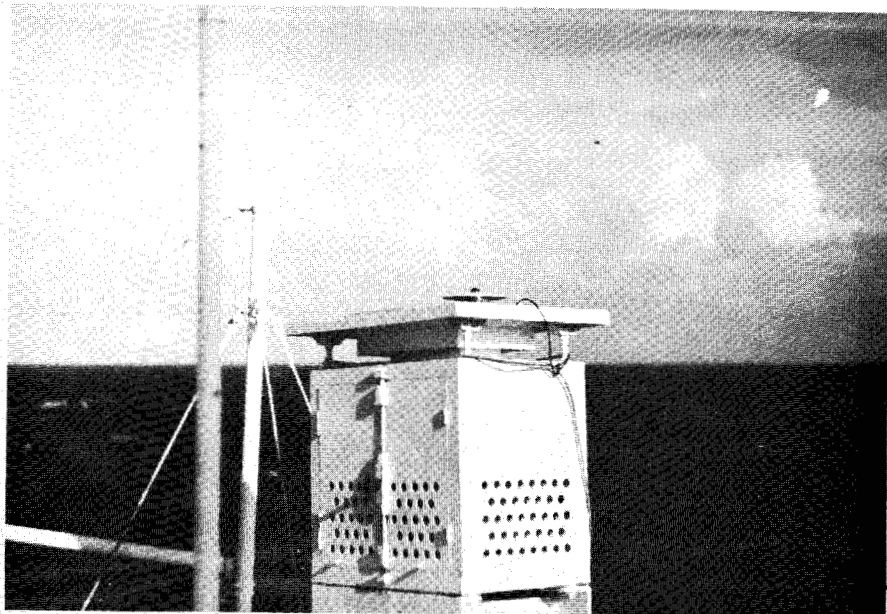


PHOTO N°4
Pyrgeomètre

BUS
LILLE

à avoir un angle de visée le plus dégagé possible.

Le BARNES a été installé sur le même bâti que RALI, son angle de visée pouvant prendre deux valeurs : 35° et 60°.

c/ Résultats

Les très mauvaises conditions atmosphériques qui ont régné au point Kilo durant la plus grande partie de la campagne de mesures ne nous ont pas permis d'exploiter toutes les possibilités des navires météorologiques stationnaires, et un incident mécanique, survenu au radiomètre polarisé, ne nous a permis d'obtenir que très peu de résultats exploitables.

c-1/ Méthode de correction de SAUNDERS

SAUNDERS donne comme méthode de correction pour un radiomètre non polarisé : $\Delta T(60^\circ) = 2 \Delta T(0^\circ)$. Nous avons réalisé l'expérience, les résultats sont reportés sur la figure 49. Nous avons fait le calcul et avons obtenu : $\Delta T(60^\circ) = 1,86 \Delta T(0^\circ)$. Nous n'avons pu mesurer $\Delta T(0^\circ)$ pour des raisons techniques mais par le calcul nous savons que $\Delta T(0^\circ) = 1,13 = \Delta T(35^\circ)$.

Nous pouvons considérer que l'accord entre la théorie et l'expérience est relativement bon, il semble donc que cette méthode de correction puisse être appliquée avec succès, mais notre expérience nous a montré que la dispersion des points expérimentaux est très importante, nous ne pourrions donc pas déduire la correction à appliquer en réalisant deux mesures successives l'une à 0°, l'autre à 60°, l'écart instantané entre ces mesures pouvant être fort différent de l'écart moyen $\Delta T(60^\circ) - \Delta T(0^\circ)$. Cette méthode demande donc pour être appliquée un grand nombre de points traités de façon statistique. Néanmoins, dans ce cas, cette méthode doit donner de bon résultat. Il faut aussi noter que cette méthode permet de tenir compte de l'erreur de transmission lors de mesures aériennes (réf. 18).

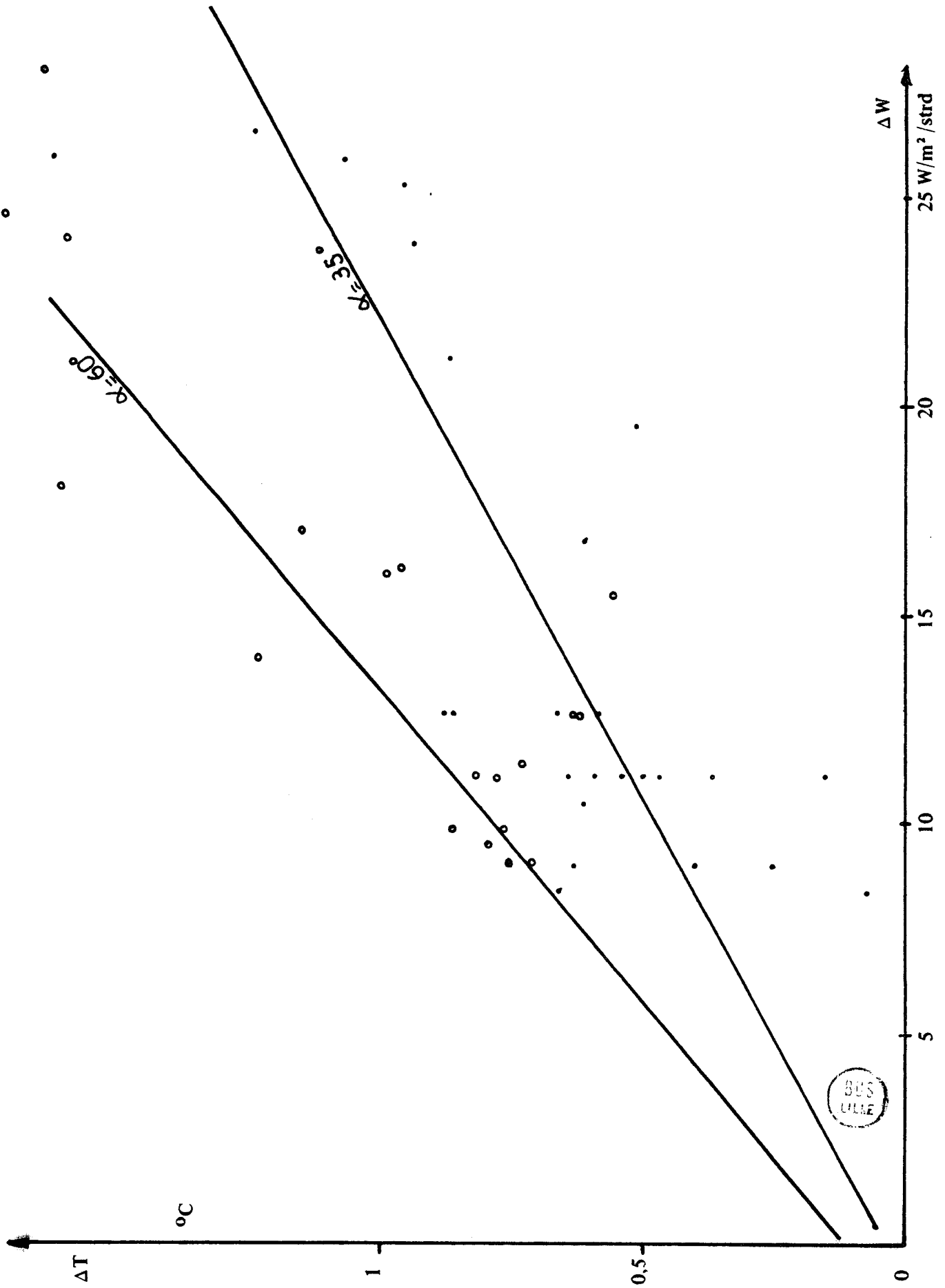


Figure 49

c-2/ Analyse succincte des mesures de température de surface
obtenues à l'aide d'un radiomètre polarisé

Les résultats obtenus avec le radiomètre polarisé ont été reporté sur la figure 50; il est bien évident qu'ils sont en nombre beaucoup trop faible pour que nous puissions en tirer des conclusions définitives quant à la valeur de la méthode.

Nous avons porté, sur la figure 50, les droites calculées représentant l'erreur de réflexion résiduelle en fonction de ΔW , ceci pour deux vitesses de vent. Nous avons d'autre part porté sur cette figure les quelques points expérimentaux obtenus.

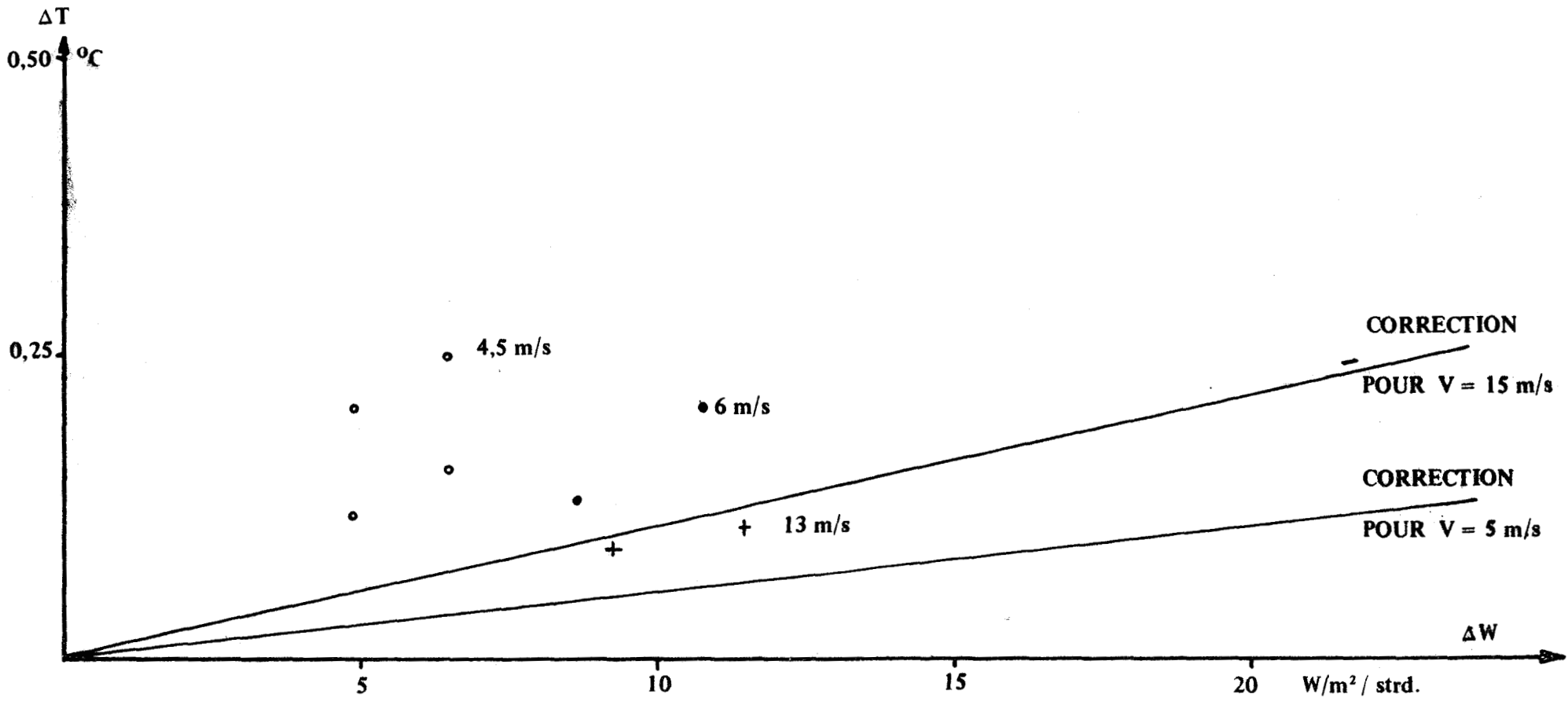
On sait (réf. 4) que pour des vents supérieurs à 18 m/s le refroidissement superficiel est faible, nous devrions donc obtenir comme ΔT , le ΔT_{ref} théorique résiduel ; nous pouvons constater que les points expérimentaux semblent vérifier ce fait.

Pour des vents inférieurs à 8 m/s au contraire il existe un refroidissement superficiel ; nous pouvons constater que c'est bien le cas, nous avons en effet :

$$\Delta T_{exp}(v) > \Delta T_{ref}(v)$$

$\Delta T_{ref}(v)$ est l'erreur de réflexion théorique pour un vent de vitesse v (cf chap. V §II).

En conclusion nous pouvons dire que cette expérience qui s'est déroulée dans de très mauvaises conditions atmosphériques a néanmoins montré que l'installation d'un radiomètre peut-être aisément effectuée à bord des navires météorologiques ; ceci permettrait de disposer de mesures indispensables aux océanographes et aux physiciens qui s'intéressent aux échanges Océan-Atmosphère.



ECART DE TEMPERATURE

$$\Delta T = T_{\text{eau réelle}} - T_{\text{Rali}}$$



Figure 50

CHAPITRE VI

ETUDE DE L'INFLUENCE DU VENT ET DU FLUX PERDU PAR
LA SURFACE DE L'EAU SUR LE REFROIDISSEMENT SUPERFICIEL

I - INTRODUCTION

Nous avons étudié dans un travail précédent (réf. 14) le lien entre le flux perdu par la surface d'une nappe d'eau et le refroidissement superficiel (ΔT_s) de cette surface. La mesure in situ de tels refroidissements superficiels a été effectuée, au cours d'une campagne de mesures à bord de la bouée BOHRA I (réf. 4) ; de telles mesures nécessitent un traitement préalable à toute exploitation, il faut en effet soustraire l'erreur de réflexion du ΔT observé pour obtenir le refroidissement superficiel réel.

La dispersion des points obtenus au cours de ces mesures était très importante et la correction de l'erreur de réflexion assez difficile, il nous a donc semblé que l'emploi d'un radiomètre polarisé devait permettre une mesure plus simple de ce ΔT_s en atténuant l'erreur de réflexion.

Nous ferons quelques rappels avant d'étudier les résultats de l'expérience que nous avons effectuée dans la soufflerie de l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence (I.M.S.T.) à Luminy.

II - RAPPELS

Ces rappels des travaux du laboratoire traitants du refroidissement superficiel peuvent se diviser en deux parties : l'une relative aux variations de ΔT_s en fonction du flux perdu par la surface et l'autre relative aux variations de ce refroidissement superficiel en fonction de la vitesse du vent.

a/ Variation du refroidissement superficiel en fonction du flux perdu par la surface d'une nappe d'eau

Nous avons étudié en laboratoire la relation qui lie le refroidissement superficiel au flux total perdu par la surface d'un liquide en contact avec l'air (réf. 14) ; pour faire cette étude nous avons réalisé une expérience consistant à mesurer le ΔT_s par différence de température apparente entre la surface calme et la surface brassée de façon que la température de l'eau soit homogène. Le flux global était calculé en mesurant la différence de température de l'eau ΔT entre le début et la fin de

l'expérience :

$$Q = m.c. \Delta T, \quad (\text{VI-1})$$

m est la masse d'eau

c est la capacité calorifique de l'eau

ΔT est la différence de température entre le début et la fin de l'expérience.

Le flux global perdu par la surface de l'eau se décompose de la façon suivante :

$$Q = Q_{ev} + Q_{ir} + Q_s \quad (\text{VI-2})$$

Q_{ev} est le flux d'évaporation

Q_{ir} est le flux dû au rayonnement infrarouge de la surface de l'eau

Q_s est le flux de chaleur sensible.

SAUNDERS (réf. 19) a proposé une loi reliant le refroidissement superficiel au flux total perdu par la surface :

$$Q = \beta .(\Delta T_s)^{4/3} \quad (\text{VI-3})$$

dans laquelle β est un coefficient qui a pour expression :

$$\beta = A.k\left(\frac{g\alpha}{KV}\right)^{1/3} \quad (\text{VI-4})$$

avec

k coefficient de conductibilité thermique de l'eau

g accélération de la gravité

α coefficient de dilatation thermique de l'eau

K coefficient de diffusivité thermique de l'eau

V coefficient de viscosité cinématique de l'eau

A est un coefficient donné égal à 0,20 par GLOBE et DROPKIN (réf. 20).

Nous avons cherché à comparer nos résultats à ceux obtenus par la théorie de SAUNDERS ; la figure 51 nous montre les résultats obtenus, nous pouvons constater un écart entre les résultats expérimentaux et théoriques qui va en croissant avec le flux ; l'explication que nous avons avancée est que cet écart est dû aux variations des coefficients de dilatation thermique et de viscosité cinématique de l'eau avec la température, en effet pour obtenir des flux importants nous devons augmenter l'écart de température

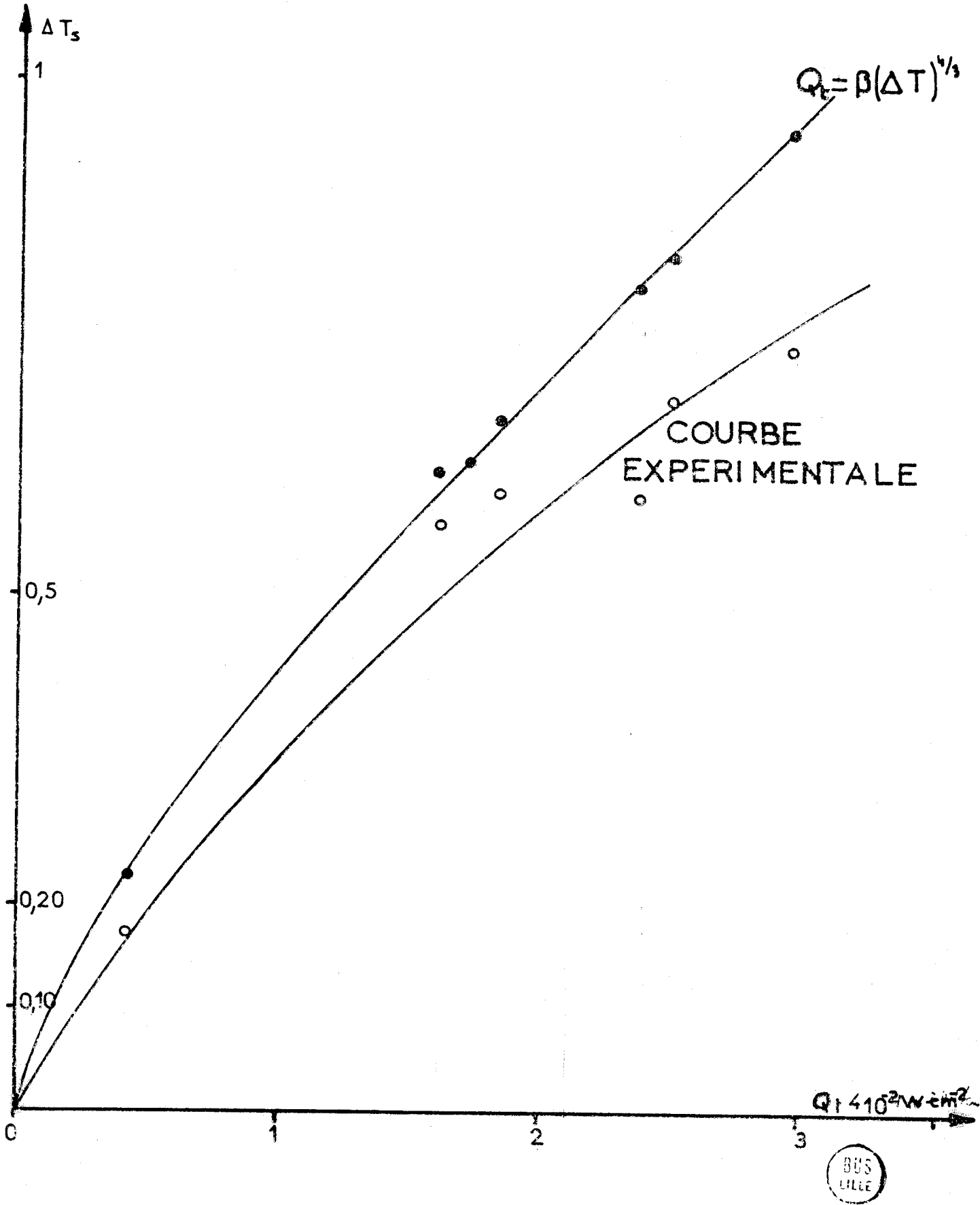


FIG 51

entre l'eau et l'air donc augmenter la température de l'eau. Pour vérifier notre hypothèse nous avons réalisé une expérience dans laquelle la température de l'eau reste constante, la variation du flux étant obtenue par variations de m la température de l'air ambiant ; les résultats de cette expérience sont représentés sur la figure 52 nous pouvons constater que l'accord est meilleur entre la théorie de SAUNDERS et l'expérience, ce qui semble valider notre hypothèse.

Après ces expériences nous connaissons donc approximativement la loi qui lie le refroidissement superficiel au flux perdu par la surface d'une nappe d'eau quand il n'y a pas de vent.

Nous allons maintenant rappeler les principaux résultats obtenus dans l'étude de l'influence du vent sur le refroidissement superficiel.

b/ Variations du ΔT_s en fonction de la vitesse du vent.

Les résultats d'une campagne de mesure en Méditerranée à bord de la Bouée Laboratoire ont été exposés précédemment (réf. 4). La figure 53 présente les résultats de cette campagne qui nous intéressent, nous pouvons constater que le refroidissement superficiel décroît quand la vitesse du vent augmente. Le refroidissement superficiel (ΔT_s) a été porté sur cette courbe en fonction de ΔW (cf. chap.II §I) ; ce ΔW nous permet d'estimer le flux infrarouge perdu par la surface mais il ne nous permet pas de déterminer les autres flux (Q_s et Q_{ev}).

Après ces expériences nous sommes donc en possession de résultats intéressants mais incomplets : dans l'une nous pouvons mesurer les flux mais nous ne pouvons étudier l'action du vent, dans l'autre nous connaissons l'action du vent mais nous ne pouvons déterminer les flux ; il nous semblait donc intéressant de pouvoir réaliser une expérience permettant à la fois de mesurer les flux et d'étudier l'action du vent, c'est ce qui nous a permis la soufflerie de l'I.M.S.T.

III - EXPERIENCE EN SOUFFLERIE

a/ Présentation

Les figures 54 et 55 montrent le plan de la soufflerie et les dispositifs permettant de faire varier les différents paramètres :

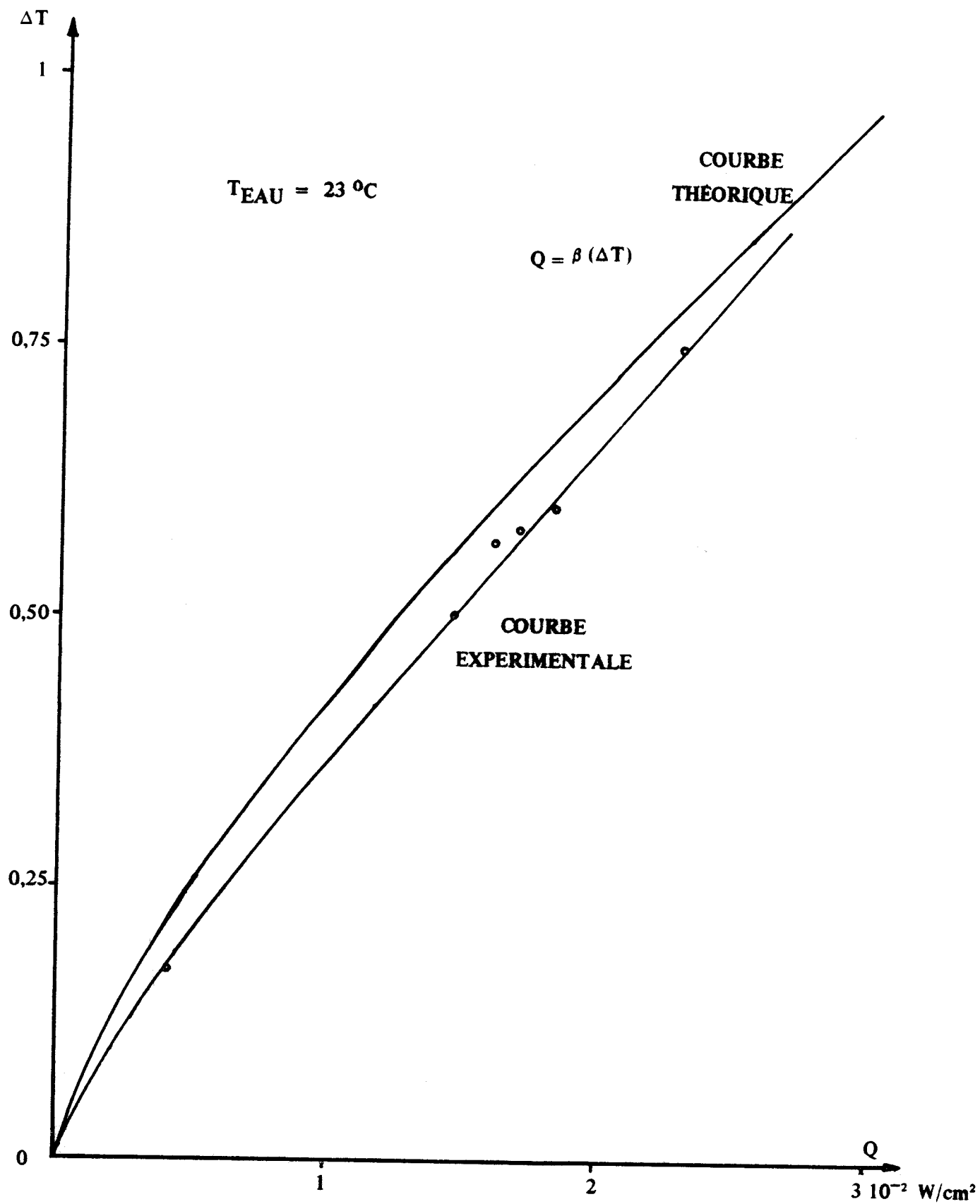
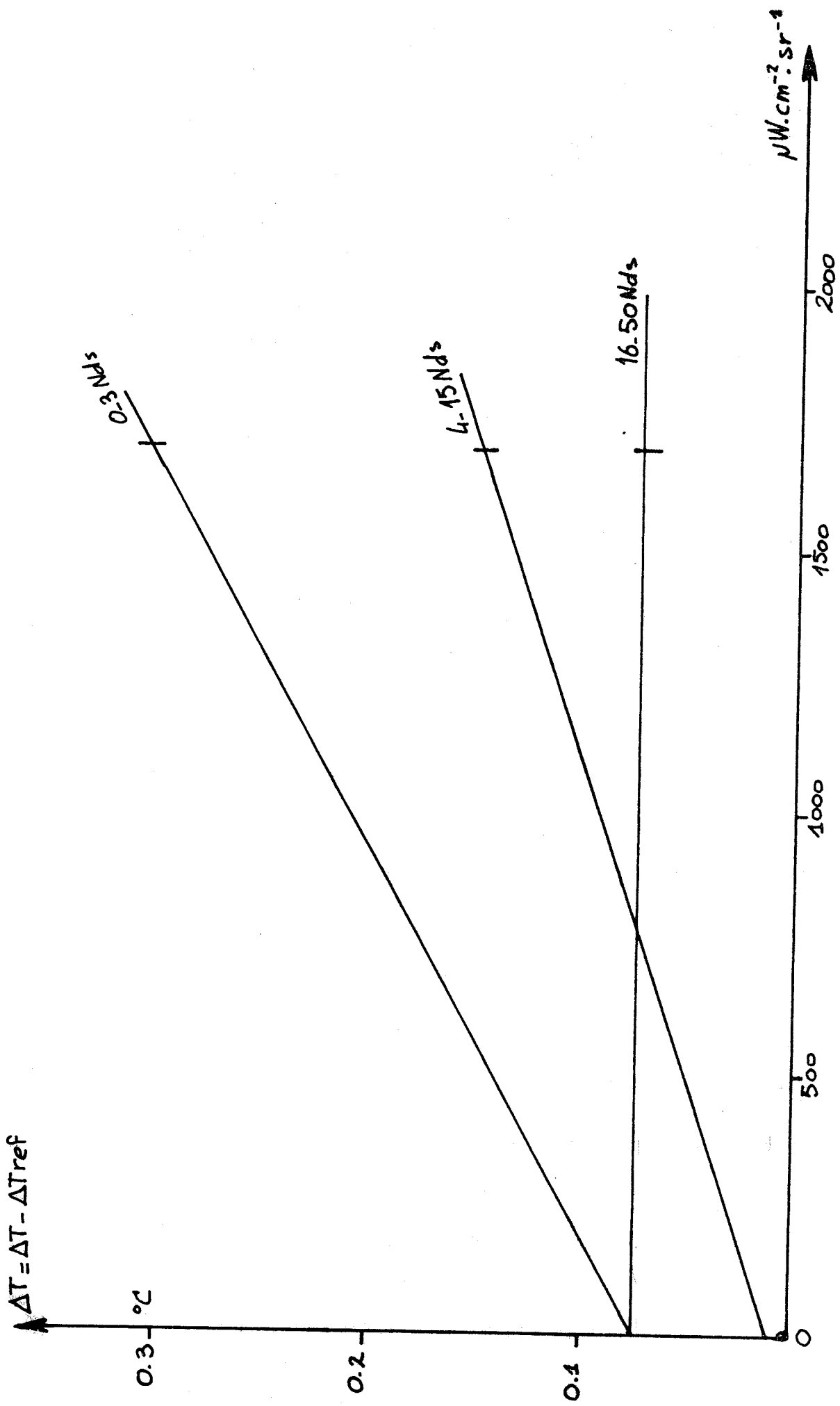


Figure 52





BUS
LILLE

FIG. 53

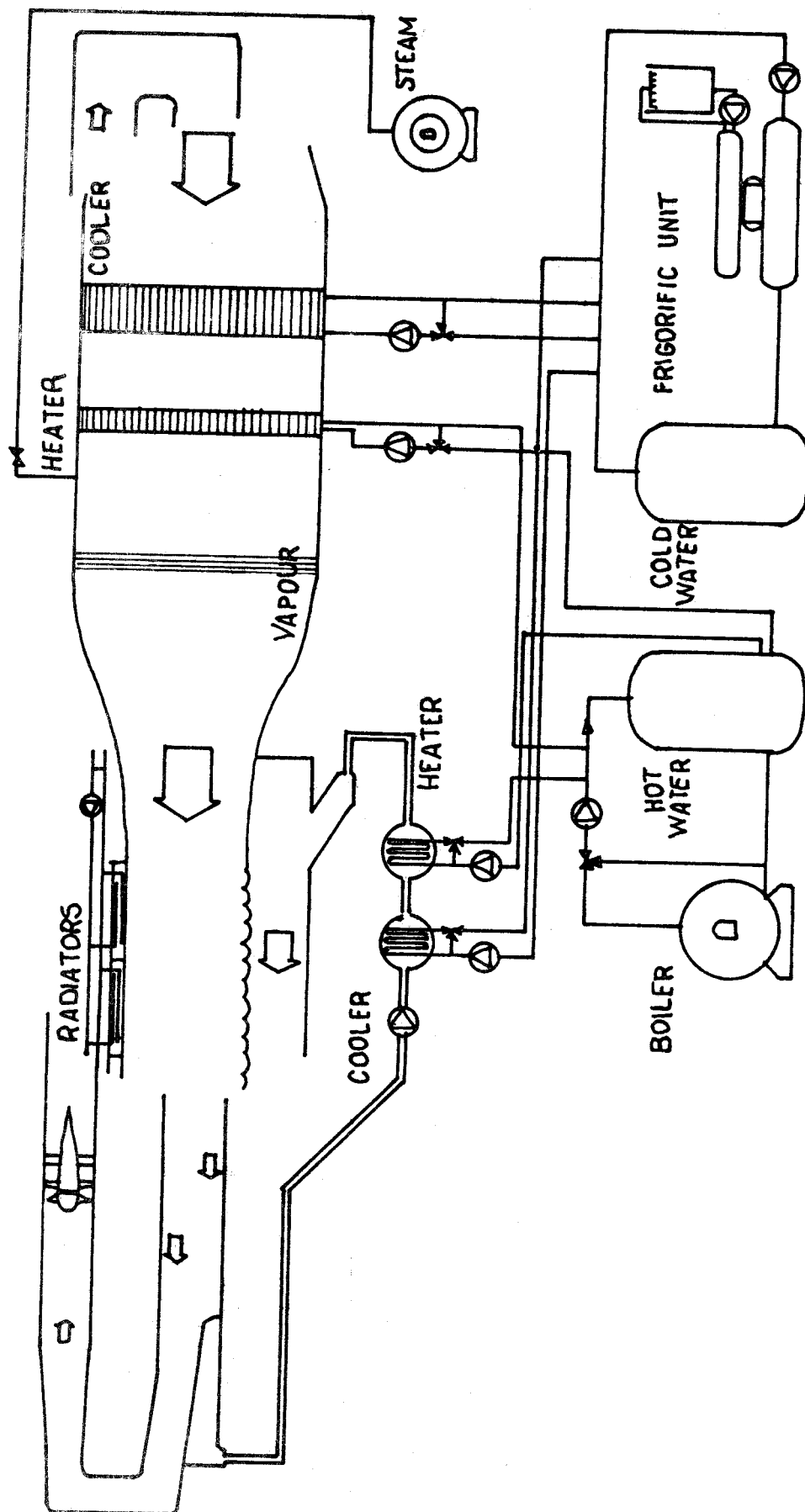


FIG. 54.



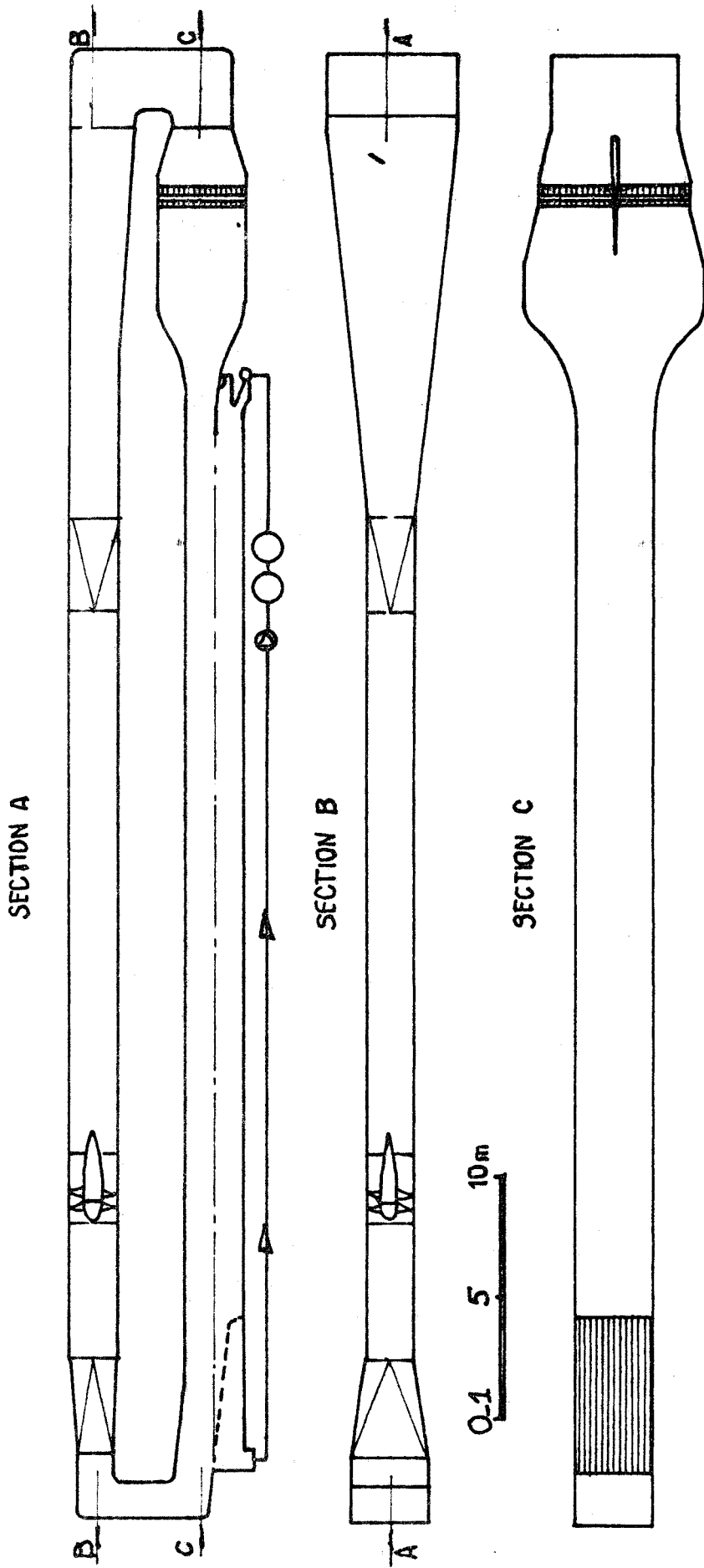


FIG. 55

- Température de l'eau
- Température de l'air
- Vitesse du vent
- Degré hygrométrique de l'air

L'ensemble du canal et de la veine sont calorifugés, le plafond du tunnel est réglable en température dans une ~~gamme~~ assez large grâce à un circuit d'eau chaude ou froide. La longueur du canal est de 40 m, le radiomètre a été placé à environ 20 m du début de la surface de contact air-eau.

b/ Dispositif expérimental

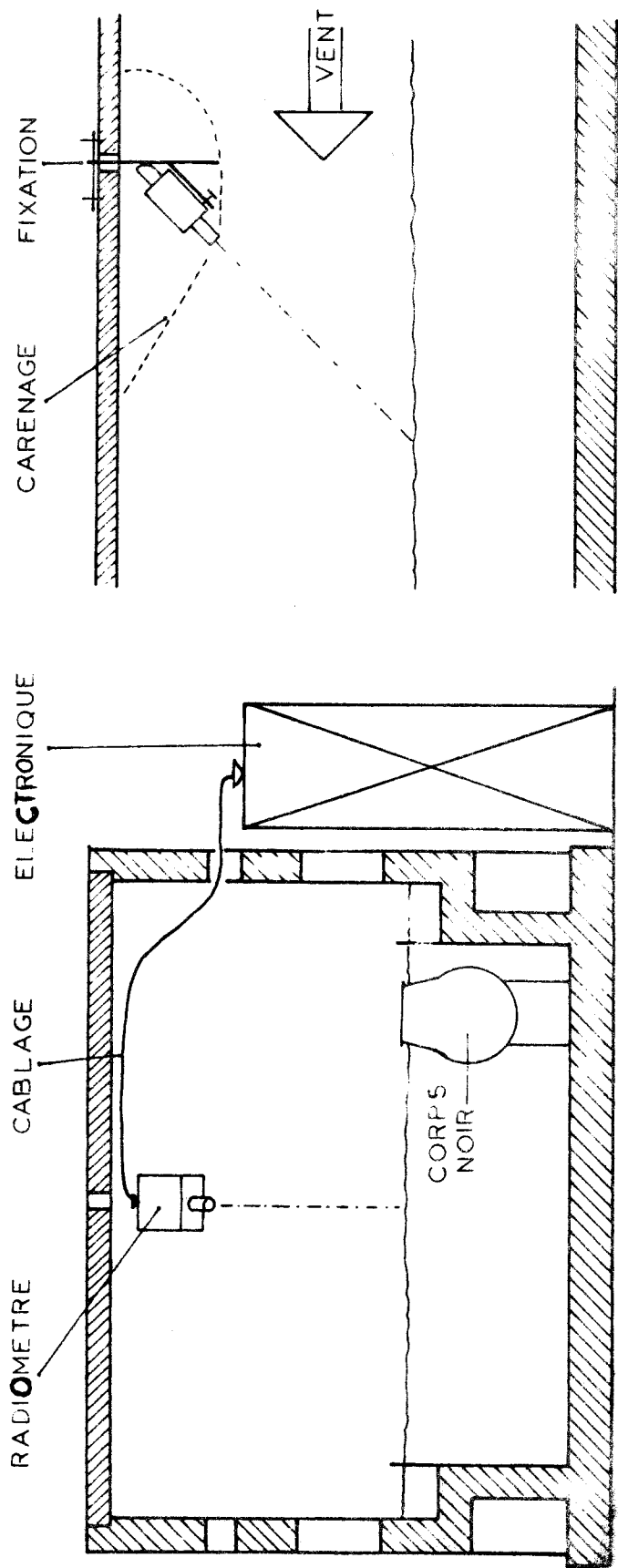
La figure 56 montre le mode de fixation choisi pour le radiomètre polarisé, celui-ci vise la surface de l'eau sous une incidence de 50° environ ; la face arrière du radiomètre a été carénée de façon à ce que sa présence dans la veine trouble le moins possible l'écoulement de l'air. L'emploi d'un radiomètre polarisé limite l'erreur de réflexion ; néanmoins nous avons fixé la température du "ciel" à une valeur proche de celle de l'eau de façon à ce que le rayonnement du "ciel", réfléchi par la surface dont nous voulons mesurer la température, ne trouble pas la mesure.

Un corps noir d'étalonnage a été placé dans le canal afin de permettre des recalages du radiomètre, en effet nous pouvons voir, sur la figure 57, que les différents étalonnages effectués se décalent les uns par rapport aux autres, par contre la sensibilité du radiomètre reste constante (égale à $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/mm}$) ; au cours des expériences que nous avons effectuées nous avons peu utilisé cette possibilité de recalage les mesures de refroidissement étant faites de façon relative (cf. §II a).

c/ Calculs des flux

La mesure des paramètres de la soufflerie permet de calculer les flux perdus par la surface de l'eau du canal. Il existe plusieurs méthodes de calculs :

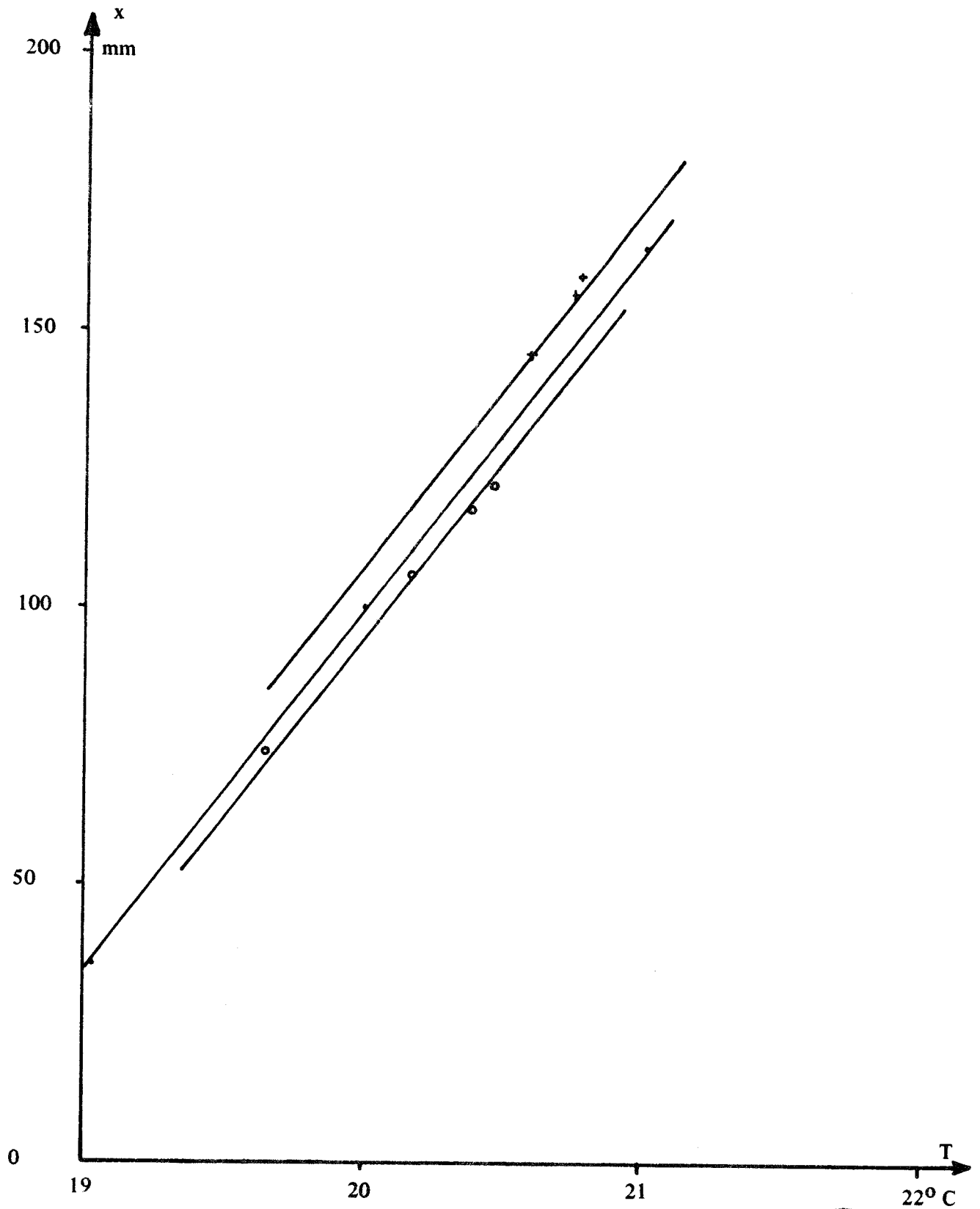
- la méthode intégrale
- la méthode des profils
- une méthode de calcul moins précise que les précédentes mais qui nécessite beaucoup moins de mesures. Elle fait intervenir des coefficients qui



SOUFFLERIE DE L'IMST
INSTALLATION D'UN RADIOMETRE I.R.

FIGURE 56





ETALONNAGES DU RADIOMETRE



Figure 57

ont été calculés par M. COANTIC ; nous avons utilisé cette méthode que nous allons exposer brièvement.

Le flux de rayonnement Q_{IR} est nul dans notre expérience, la température du "ciel" étant égale à celle de l'eau.

Soit J_o la masse d'eau qui s'évapore par unité de surface et par unité de temps, le flux de chaleur latente a pour expression :

$$Q_{ev} = J_o \cdot \mathcal{L} \quad (VI-5)$$

\mathcal{L} est la chaleur latente de vaporisation de l'eau en J/kg.

Nous pouvons exprimer J_o (en $kg/m^2 \cdot s$) à partir du nombre de NUSSELT hygrométrique ; en effet nous avons :

$$Nu' = \frac{J_o L}{\rho D \Delta F}$$

soit

$$J_o = \frac{Nu' \rho D \Delta F}{L} \quad (VI-6)$$



De même nous pouvons calculer Q_s à partir du nombre de NUSSELT thermique Nu :

$$Nu = \frac{Q_s L}{k \Delta \theta}$$

soit

$$Q_s = \frac{Nu k \Delta \theta}{L} \quad (VI-7)$$

Pour la soufflerie dans laquelle nous avons travaillé les nombres de NUSSELT thermique et hygrométrique sont liés au nombre de REYNOLDS par la loi :

$$\begin{aligned} Nu &= 0,08 (Re)^{0,75} \\ Nu' &= 0,08 (Re)^{0,75} \end{aligned} \quad (VI-8)$$

Le nombre de REYNOLDS est égal à :

$$Re = \frac{u L}{\nu} \quad (VI-9)$$

Dans ces formules nous avons :

L est la longueur d'échange en m

ρ est la densité de l'air en kg/m^3

D est la diffusivité massique de la vapeur d'eau dans l'air en m^2/s

k est la conductibilité thermique de l'air en W/m/K

ν est la viscosité cinématique de l'air en m^2/s

F est l'humidité spécifique de l'air en $\frac{\text{kg de vapeur d'eau}}{\text{kg d'air humide}}$

θ est la température en K

u est la vitesse du vent en m/s

ΔF est la différence d'humidité spécifique entre la couche d'air qui se trouve au contact de l'eau, et la couche d'air située nettement au-dessus (un mètre environ) ; ce ΔF est calculable à l'aide de la température de l'eau et des données de $T_{\text{batterie froide}}$ et T_{air}

$\Delta\theta$ est la différence de température entre l'eau et l'air.

Nous obtenons donc comme expression pour les flux :

$$Q_s = \frac{k \cdot \Delta\theta}{L} \frac{L^{0,75}}{\nu^{0,75}} 0,08 \cdot u^{0,75} \quad (\text{VI-10})$$

$$Q_{\text{ev}} = J_o = \frac{\rho \cdot D \cdot \Delta F}{L} \frac{L^{0,75}}{\nu^{0,75}} 0,08 \cdot u^{0,75} \quad (\text{VI-11})$$

soit pour le flux total Q (en W/m^2) :

$$Q = J_o + Q_s \quad (\text{VI-12})$$

$$Q = L^{-0,25} \frac{0,08}{\nu^{0,75}} u^{0,75} (\rho \cdot D \cdot \Delta F + k \cdot \Delta\theta) \quad (\text{VI-13})$$

Connaissant la température et l'humidité de l'air, la température de l'eau et la vitesse du vent, nous pouvons calculer le flux perdu par la surface. Nous nous sommes placés dans différentes conditions, pour obtenir divers Q et avons mesuré le refroidissement superficiel.

d/ Expérience réalisée à la soufflerie de l'I.M.S.T.

Les conditions choisies pour les paramètres de la soufflerie sont les suivantes :

$$T_{\text{eau}} = 20^{\circ} \text{ C}, T_{\text{plafond}} = 20^{\circ} \text{ C}$$

L'humidité est fixée à l'aide d'une batterie "froide" dont la température a été fixée à 5° C pour un vent de $0,7 \text{ m/s}$, pour des vents dont la vitesse est plus élevée la température de la batterie froide se fixera à une valeur comprise entre 5° C et $12,3^{\circ} \text{ C}$. Les humidités obtenues pour les différentes valeurs de température de la batterie froide ont été reportées sur la figure 58 en fonction de la vitesse du vent.

Nous avons tout d'abord essayé de travailler avec un flux de chaleur sensible nul c'est-à-dire en prenant la température de l'air égale à la température de l'eau ($T_{\text{eau}} = 20^{\circ} \text{ C}$), les refroidissements superficiels obtenus étant faibles, même pour des vents faibles, nous avons été obligé d'augmenter l'écart entre T_{eau} et T_{air} nous avons choisi :

$$T_{\text{air}} = 15^{\circ} \text{ C}$$

Nous avons fait varier la vitesse du vent de $0,7 \text{ m/s}$ à 10 m/s .

e/ Résultats

Les résultats des expériences effectuées ont été reporté sur la figure 59 , nous y avons porté en abscisse le flux total perdu par la surface de l'eau Q et en ordonnée le refroidissement superficiel observé ΔT_s . Si nous comparons cette courbe à celle obtenue en laboratoire, sans vent, il semble que nous obtenons des résultats opposés, pour l'une quand le flux augmente le refroidissement superficiel augmente (fig. 52), pour l'autre le ΔT_s diminue quand Q croît (fig. 59). Cette opposition n'est qu'apparente en effet dans le cas de la figure 59 la vitesse du vent croît en même temps que le flux nous avons donc deux effets qui jouent en sens contraire :

- l'augmentation du flux tend à faire croître le ΔT_s
 - l'augmentation de la vitesse du vent tend à diminuer le ΔT_s .
- Afin de mettre en évidence l'influence du vent, nous avons tracé $\frac{\Delta T_s}{Q}$ en fonction de u sur la figure 60.

Nous pouvons constater que, pour une flux constant, le refroidissement

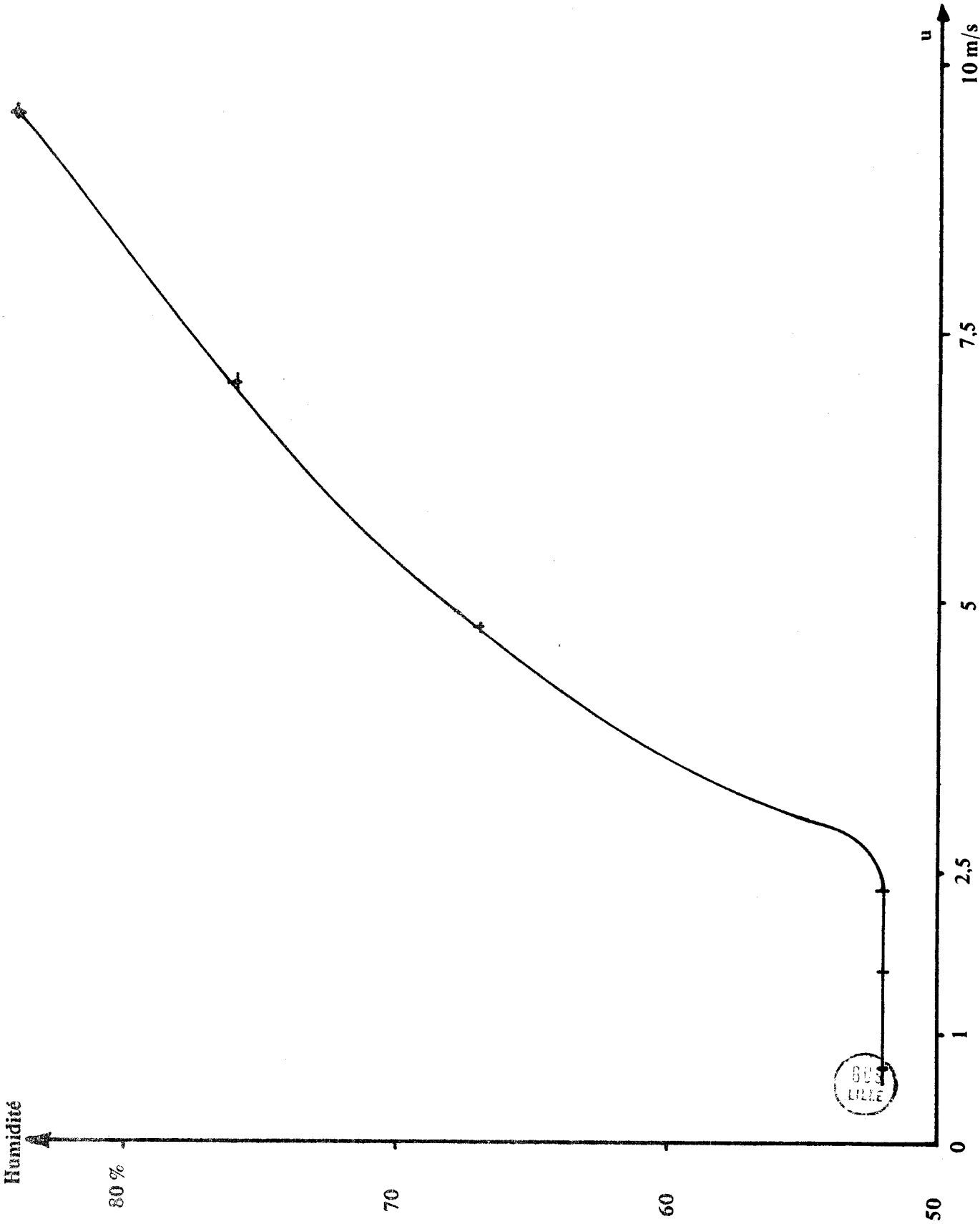


Figure 58

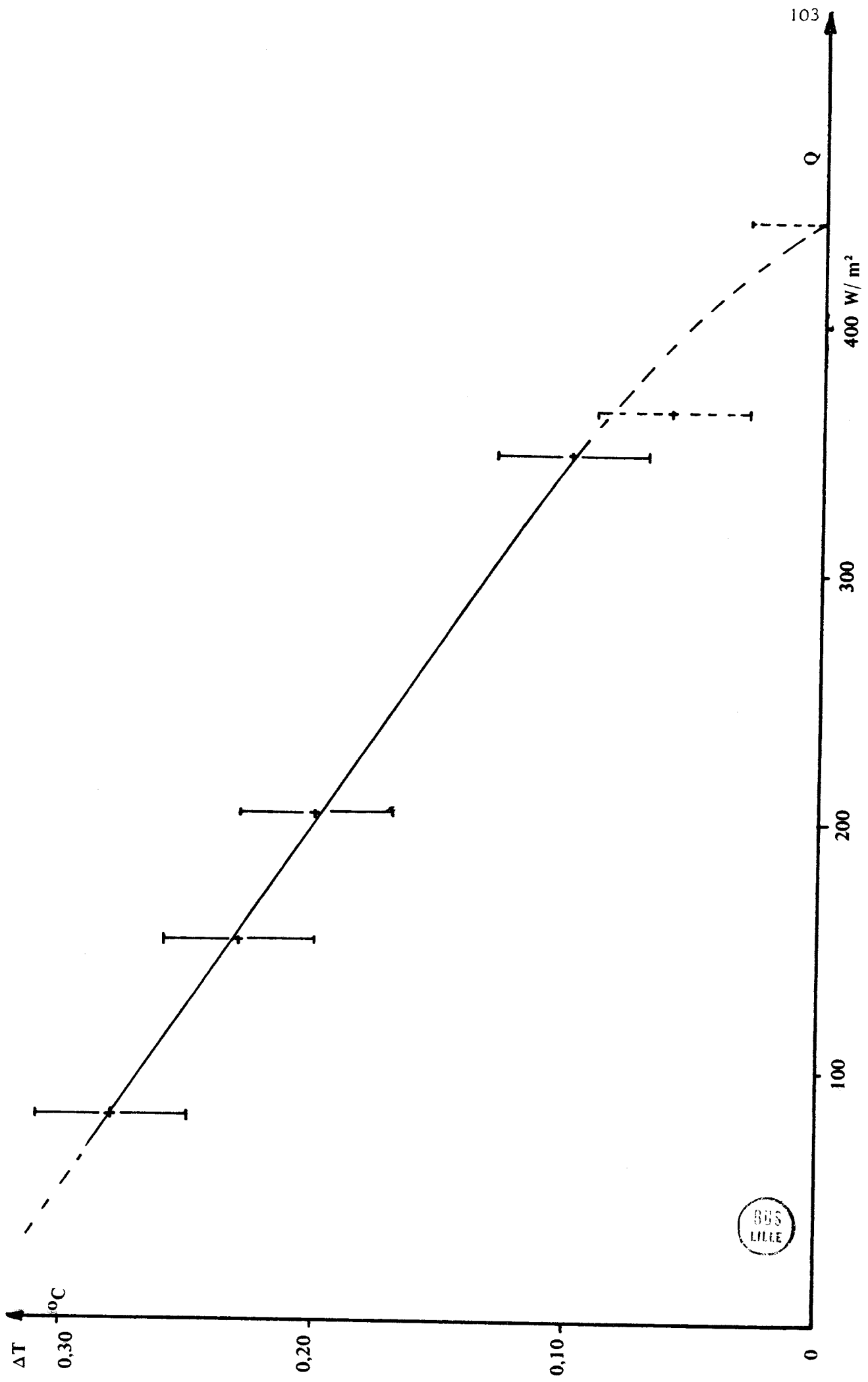


Figure 59



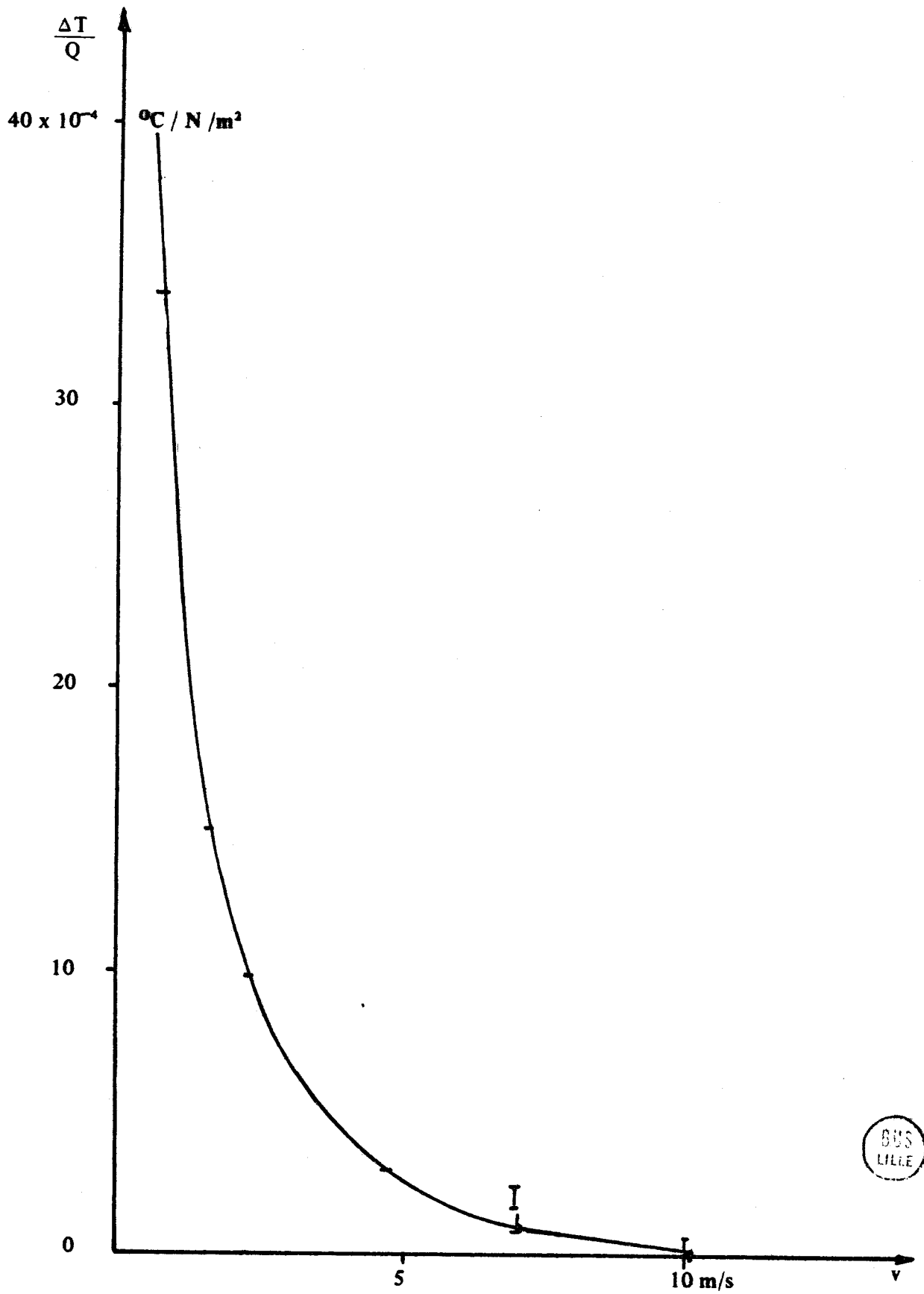


Figure 60



superficiel décroît rapidement quand la vitesse du vent croît. Cet effet avait été mis en évidence par les mesures effectuées à bord de la Bouée Laboratoire (réf. 4) et rappelées au § II-b) ; nous avons reporté sur la figure 60 bis les ΔT_s obtenus sur la bouée, pour un flux infrarouge constant, en fonction de la vitesse du vent. Nous pouvons constater que les courbes ont la même allure. Nous ne pouvons pousser les comparaisons plus loin car nous ne connaissons pas les flux autre que Q_{IR} pour les expériences Bouée.

IV - CONCLUSION

En conclusion de cette expérience nous pouvons dire que les mesures que nous avons faites vérifient bien les résultats précédemment obtenus. Nous avons pu tracer la courbe représentant les variations de ΔT_s en fonction du vent, pour un flux constant ; nous avons ainsi pu mettre en évidence la décroissance de ΔT_s très rapide, pour des vitesses de vent comprises entre 0,5 m/s et 4 m/s. La détermination des flux perdus par la surface de l'eau ne pourra donc se faire que si l'on connaît avec précision la vitesse du vent au moment où la mesure est effectuée.

Il serait intéressant de reprendre ces mesures dans la soufflerie en prenant d'autres conditions d'hygrométrie et d'autres températures d'air, nous pourrions ainsi étudier, pour une vitesse de vent constante, l'influence relative des flux dans le refroidissement superficiel.

D'autre part il serait intéressant de choisir quelques valeurs de flux perdu par la surface et d'étudier pour chacune de ces valeurs la variation du refroidissement superficiel en fonction de la vitesse du vent, ce qui nous permettrait de mieux comprendre les phénomènes complexes régissant les échanges Océan-Atmosphère.

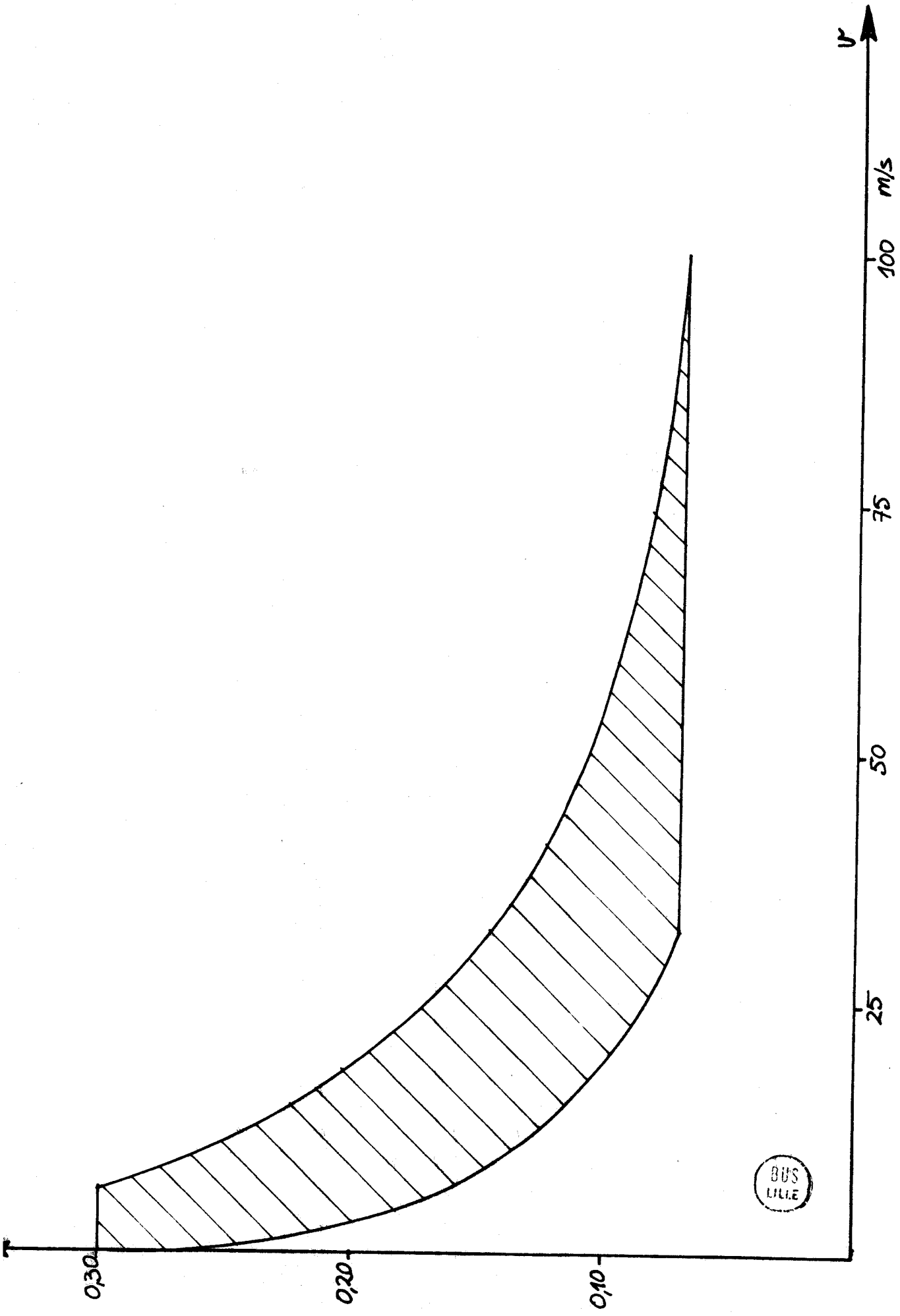


FIG. 60bis

BUS
LILLE

ANNEXE

CALCUL DU COEFFICIENT DE REFLEXION

Le coefficient de réflexion $R(i)$ dépend de l'indice du milieu réflecteur et de l'angle d'incidence.

L'expression de ce coefficient est :

$$R_{\lambda}^r(i) = \left| \frac{Z - N \cdot \cos i}{Z + N \cdot \cos i} \right|^2 \quad R_{\lambda}^l(i) = \left| \frac{Z - \cos i}{Z + \cos i} \right|^2$$

avec

$$Z = (N^2 - \sin^2 i)^{1/2}$$

et

$$N = n - i.k \quad n = \text{indice de réfraction de la surface considérée}$$

$$k = \text{indice d'absorption du milieu réfléchissant}$$

En posant $Z = a - i.b$ il vient :

$$R_{\lambda}^r(i) = \frac{a^2 + b^2 - 2.a.\cos i + \cos^2 i}{a^2 - b^2 + 2.a.\cos i + \cos^2 i}$$

et

$$R_{\lambda}^l(i) = \frac{(a - (n^2 - k^2)).\cos i)^2 + (b - 2.n.k.\cos i)^2}{(a + (n^2 - k^2)).\cos i)^2 + (b + 2.n.k.\cos i)^2}$$

avec

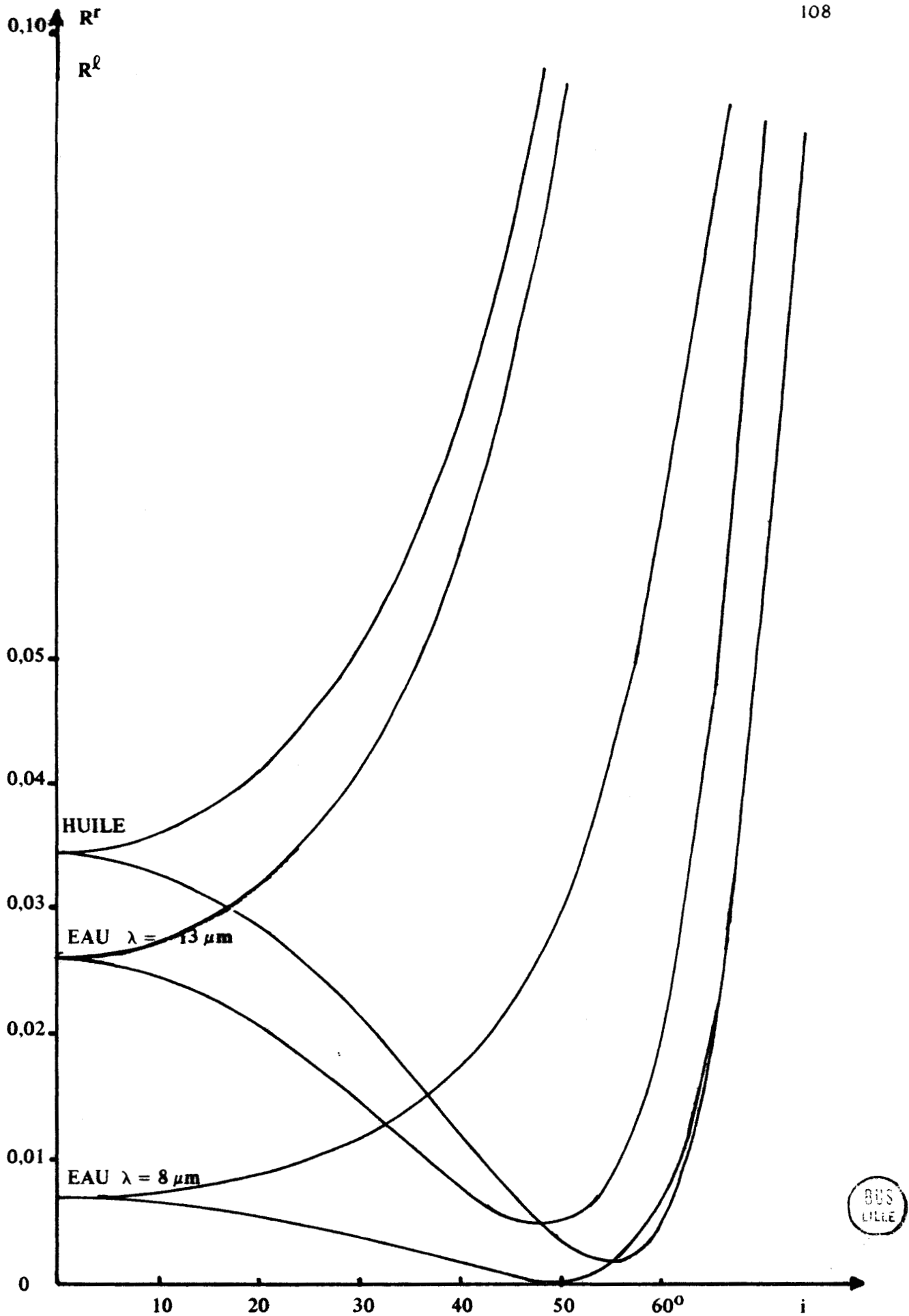
$$a_{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left[(n^2 - k^2 - \sin^2 i)^2 + 4 u^2 k^2 \right]^{1/2} + u^2 - k^2 - \sin^2 i \right\}^{1/2}$$

$$b_{\lambda} = \frac{nk}{a}$$

Les valeurs de n et k que nous avons utilisé pour l'eau sont celles données par Pontier et Dechambenoy (ref. 21).

Les résultats obtenus pour R_{λ}^r et R_{λ}^l sont représentés sur la figure 61, nous avons pris pour l'eau deux valeurs : $\lambda = 8 \mu\text{m}$ et $\lambda = 13 \mu\text{m}$.

Il est à remarquer que k étant différent de zéro le minimum correspondant à l'angle de Brewster n'est pas nul, d'autre part sa position varie avec



COEFFICIENTS DE REFLEXION DE L'EAU ET DE L'HUILE

Figure 61

la longueur d'onde.

Le calcul a été fait également pour des hydrocarbures dont M. Viollier a mesuré les indices n et k (ref. 15), les résultats obtenus ont été reporté sur la même figure 61.

Ce travail nous a permis de vérifier le bon fonctionnement du radiomètre dans des conditions diverses et de chiffrer expérimentalement le gain apporté à la mesure de la température de surface par l'utilisation d'un radiomètre infrarouge polarisé.

Nous avons d'autre part proposé une méthode de détection des hydrocarbures en mer, utilisant des leviers aériens de température de surface par radiométrie.

Nous avons entrepris une étude en soufflerie du refroidissement superficiel qui a confirmé les résultats préliminaires obtenus en mer et en laboratoire. Nous envisageons de poursuivre cette étude en approfondissant l'influence du vent sur la couche froide de surface.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - ROMER J. - Variation de la temperature de la mer au voisinage de la surface. - MET MAR N°65
- 2 - ICHIRO IMAI - Collection and Dissemination of Sea Surface Temperature Data for the North-West Pacific, and their utilisation for fisheries. - Note technique de l'O.M.M. N° 103
- 3 - LECOMTE P. - Contribution à l'étude des échanges Océan Atmosphère. - THESE FACULTE DES SCIENCES DE LILLE Juillet 1966
- 4 - DESCHAMPS P.Y. - LECOMTE P. - VANHOUTTE J.C. - Mesure radiometrique de la temperature de l'océan. - RAPPORT D'ACTIVITE 1^{er} Octobre 1970
- 5 - LECOMTE P. - DESCHAMPS P.Y. - Mesure de la temperature superficielle de l'océan au moyen d'un radiomètre infrarouge; 1^{ère} partie : Résultats de deux series de mesures. - CAHIERS OCEANOGRAPHIQUES XXII,2,Fevrier 1970
- 6 - LECOMTE P. - DESCHAMPS P.Y. - Mesure de la temperature superficielle de l'océan au moyen d'un radiomètre infrarouge; 2^{ème} partie : Influence du rayonnement du ciel. - CAHIERS OCEANOGRAPHIQUES XXII,2,Fevrier 1970
- 7 - PAULSON - PARKER - Cooling of a Water Surface by Evaporation, Radiation and Heat Transfer. - Journal of Geophysical Research 1972 vol 77 N° 3
- 8 - HASSE - On the Cooling of the Sea Surface by Evaporation and Heat Transfer. - TELLUS 1963 Vol 15 N°4
- 9 - EWING - MAC ALLISTER - On the thermal Boundary Layer of the Ocean SCIENCE 1960 Vol 131
- 10 - LASNE J. - Radiomètre infrarouge dans le domaine 8 μm - 14 μm , réalisation d'un corps noir asservi en temperature, Application à l'océanographie physique. - Memoire présenté au CNAM LILLE 1971
- 11 - VANHOUTTE J.C. - THESE FACULTE DES SCIENCES DE LILLE (à paraitre)
- 12 - DESCHAMPS P.Y. - LECOMTE P. - VANHOUTTE J.C. - Mesures aériennes de la temperature de surface (MEDOC 1972). - Rapport interne
- 13 - DEROO Ch. - Rapport de stage I.U.T. mesures physiques LILLE 1973
- 14 - FUSEY F.X. - Contribution à l'étude du refroidissement superficiel de l'eau et de divers hydrocarbures. - Rapport D.E.A. LILLE 1972
- 15 - VIOLLIER M. - Mesure des facteurs de reflexion de produits petroliers dans la gamme 2 μm - 14 μm . - Rapport D.E.A. LILLE 1972

- 16 - COX - MUNK - Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter. - J.O.S.A. Vol 44 N° 11 1954
- 17 - DESCHAMPS P.Y. - LECOMTE P. - VANHOUTTE J.C. - Améliorations apportées à la mesure de la température de surface par l'utilisation d'un radiomètre infrarouge polarisé. - APPLIED OPTICS Vol 12 N° 9 1973
- 18 - SAUNDERS P.M. - Aerial Measurement of Sea Surface Temperature in the Infrared. - Journal of Geophysical Research Vol 72 N° 16
- 19 - SAUNDERS P.M. - The Temperature of the Ocean Air Interface. Journal of Atmospheric Sciences Vol 24 1967
- 20 - GLOBE - DROPKIN - Effect of Spin on Natural Convection in Mercury heated from below. - Journal of Applied Physics Vol 36 N° 1
- 21 - PONTIER - DECHAMBENOY - Détermination des constantes optiques de l'eau liquide entre 1 μm et 40 μm , application au calcul de son pouvoir réflecteur et de son émissivité Ann. de Géophysique 1966 22

