

50376

N° d'ordre 161

1974

170

50376

1974

170

THESE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES
ET DES TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR INGENIEUR
Spécialité Physique appliquée

par

J.C. VANHOUTTE

*

AMELIORATIONS APPORTEES A LA MESURE RADIOMETRIQUE
DE LA TEMPERATURE DE L'OCEAN

ETUDE, REALISATION ET ESSAIS

D'UN RADIOMETRE INFRAROUGE A LUMIERE POLARISEE



Soutenue le Déc. 1974 devant la Commission d'examen

Membres du Jury

M.^{me} LENOBLE

Président

M. HERMAN

Rapporteur

M. LOUAGE

Examineur

M. VITUREAU

Membre invité

M. ROUSSEL

Membre invité.

U. E. R. DE PHYSIQUE FONDAMENTALE

A ma Femme.

A mes Enfants.

Ce travail entre dans le cadre d'une convention, financée par le Centre National pour l'Exploitation des Océans (C.N.E.X.O.) et passée avec le Laboratoire d'Océanographie Physique du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris et le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille I.

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 aussi Monsieur HERMAN, Monsieur LOUAGE, Monsieur ROUSSEL et Monsieur VITUREAU qui ont accepté de juger mon travail.

Ce travail n'aurait pu être mené correctement à son terme sans la précieuse collaboration de :

Monsieur LECOMTE qui a défini les orientations de cette recherche et nous a conseillé tout au long de ce travail.

Monsieur DESCHAMPS qui participa à la recherche des erreurs instrumentales et à la mise en application du dispositif.

Monsieur VERWAERDE, Monsieur PANHALEUX et Mademoiselle DEROO dont la collaboration technique fût indispensable.

Madame THEROUX, Monsieur RAFFAU et le personnel technique du Département de Physique, qui dans leur spécialité respective, m'ont toujours assuré du meilleur de leur service.

Que tous trouvent ici mes plus sincères remerciements.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I - Principe de la mesure de température par radiométrie infrarouge

CHAPITRE II - Erreurs phénoménologiques liées aux techniques de radiométrie infrarouge

- II-1 - Effet de la transmission atmosphérique
 - II-1-1 - Le gaz carbonique
 - II-1-2 - La vapeur d'eau
 - II-1-3 - L'ozone
- II-2 - Effet de la réflexion à la surface de l'eau

CHAPITRE III - Etude et choix des divers composants du radiomètre Rali

- III-1 - Choix du détecteur
 - III-1-1 - Critères de choix
 - III-1-2 - Ensemble des détecteurs proposés
 - III-1-3 - Etude du détecteur pyroélectrique
- III-2 - Choix du filtre
- III-3 - Le polariseur
- III-4 - Choix d'une optique
- III-5 - Choix du modulateur
- III-6 - Choix du corps noir et de son système de stabilisation
- III-7 - La tête optique du radiomètre

CHAPITRE IV - Electronique associée au radiomètre Rali

- IV-1 - Amplification et détection
- IV-2 - Chaîne d'asservissement du corps noir
- IV-3 - Dispositifs annexes
 - Base de temps, horloge
 - Pont de mesure des températures

CHAPITRE V - Essais du radiomètre

- V-1 - Mesure de la sensibilité du radiomètre
- V-2 - Mesure du champ de visée de l'appareil
- V-3 - Mesure des avantages du radiomètre polarisant
- V-4 - Etude des dérives à long terme
- V-5 - Tests de l'appareil en opération
- V-6 - Utilisation du radiomètre en corps noir asservi

CONCLUSION

INTRODUCTION

Le milieu océanique est le théâtre de phénomènes physiques chimiques, dynamiques, biologiques, géologiques qui réagissent entre-eux {1}.

A sa surface, l'océan reçoit l'essentiel de l'énergie qui le fait fonctionner, (même à ses niveaux les plus profonds), et qui est à l'origine de la vie ; la part d'énergie qu'il cède à l'atmosphère est le principal moteur de cette dernière. Par elle aussi il reçoit des substances chimiques. Certaines sont indispensables à la vie océanique, mais d'autres, déversées par l'homme, peuvent lui nuire.

Connaître le milieu, ses lois, ses mécanismes, élucider les interactions des phénomènes océaniques de toute nature, est un impératif aussi bien pour déterminer le rôle de l'océan dans l'évolution géophysique et biologique de notre planète que pour comprendre et prédire le comportement de l'océan et même du fait de son influence sur les conditions climatiques, que pour prévoir l'évolution de tout notre environnement fluide - océan-atmosphère - que l'action de l'homme est désormais capable de modifier.

extrait de : L'océanographie au C.N.R.S.

Voies de recherche prioritaires 1973.

- Les chiffres entre { } correspondent aux références citées en fin de thèse.

L'interaction océan-atmosphère joue un rôle important dans les domaines de la météorologie et de l'océanographie. L'ensemble soleil + atmosphère fournit à l'océan une énergie que celui-ci absorbe. Une partie de cette énergie sert directement à élever la température de l'eau, une autre partie est transformée en énergie cinétique (courants marins) une autre partie est renvoyée dans l'atmosphère sous forme d'énergie latente (évaporation) ou sous forme de rayonnement infrarouge.

Pour comprendre le mécanisme complexe qui régit les échanges océan-atmosphère, il est nécessaire de connaître les gradients de température existant dans la couche limite océan-atmosphère. Il est donc indispensable de connaître avec précision la température de surface de l'océan.

Etant donné la nature de cette surface, une mesure directe de température est irréalisable. D'une part, il n'est pas certain que cette température soit la même que celle que l'on relève à l'aide d'une sonde placée à quelques centimètres en-dessous de la surface. D'autre part, une mesure de température de l'océan par un moyen conventionnel (thermomètre) se prête mal à l'établissement de cartes de températures sur un espace étendu. C'est pour ces raisons que les techniques de mesure de température à distance ont été développées (2).

De plus, il est actuellement évident que des mesures ponctuelles ne suffisent plus pour appréhender l'ensemble des phénomènes qu'étudient les océanographes physiciens, biologistes ou les météorologues maritimes. Une connaissance spatiale des phénomènes est de plus en plus nécessaire, et des moyens aéroportés tels que l'avion, le ballon, le dirigeable ou le satellite sont maintenant couramment les vecteurs des différentes techniques de télédétection que l'on utilise.

L'étude que nous présentons ici porte sur la mise au point et l'essai de diverses améliorations apportées à la réalisation d'un radiomètre infrarouge utilisé pour la mesure précise, à faible distance, de la température de l'océan. (Ex: d'une bouée ou sur un avion à basse altitude). Dans un premier temps nous rappellerons le principe de la mesure de température par radiométrie infrarouge. Ensuite nous passerons en revue les différentes sources d'erreur de la mesure et les diverses améliorations possibles pour réduire ces erreurs. Puis nous décrirons le radiomètre

réalisé, que nous appellerons "RALI" ; en faisant ressortir les différences avec les appareils commercialisés.

Dans un dernier temps nous expliquerons les essais faits pour tester l'appareil ainsi que les mesures effectuées au cours des différentes missions pendant lesquelles fut utilisé le radiomètre.

CHAPITRE I

PRINCIPE DE LA MESURE DE TEMPERATURE
PAR RADIOMETRIE INFRAROUGE

On sait, depuis les travaux des physiciens effectués à la fin du XIX siècle, que tous les corps, dès qu'ils quittent le zéro absolu, rayonnent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques.

Pour un corps noir, la loi de STEFAN indique que cette puissance rayonnée augmente comme la puissance quatrième de la température absolue.

$$W_{CN} = \sigma T^4$$

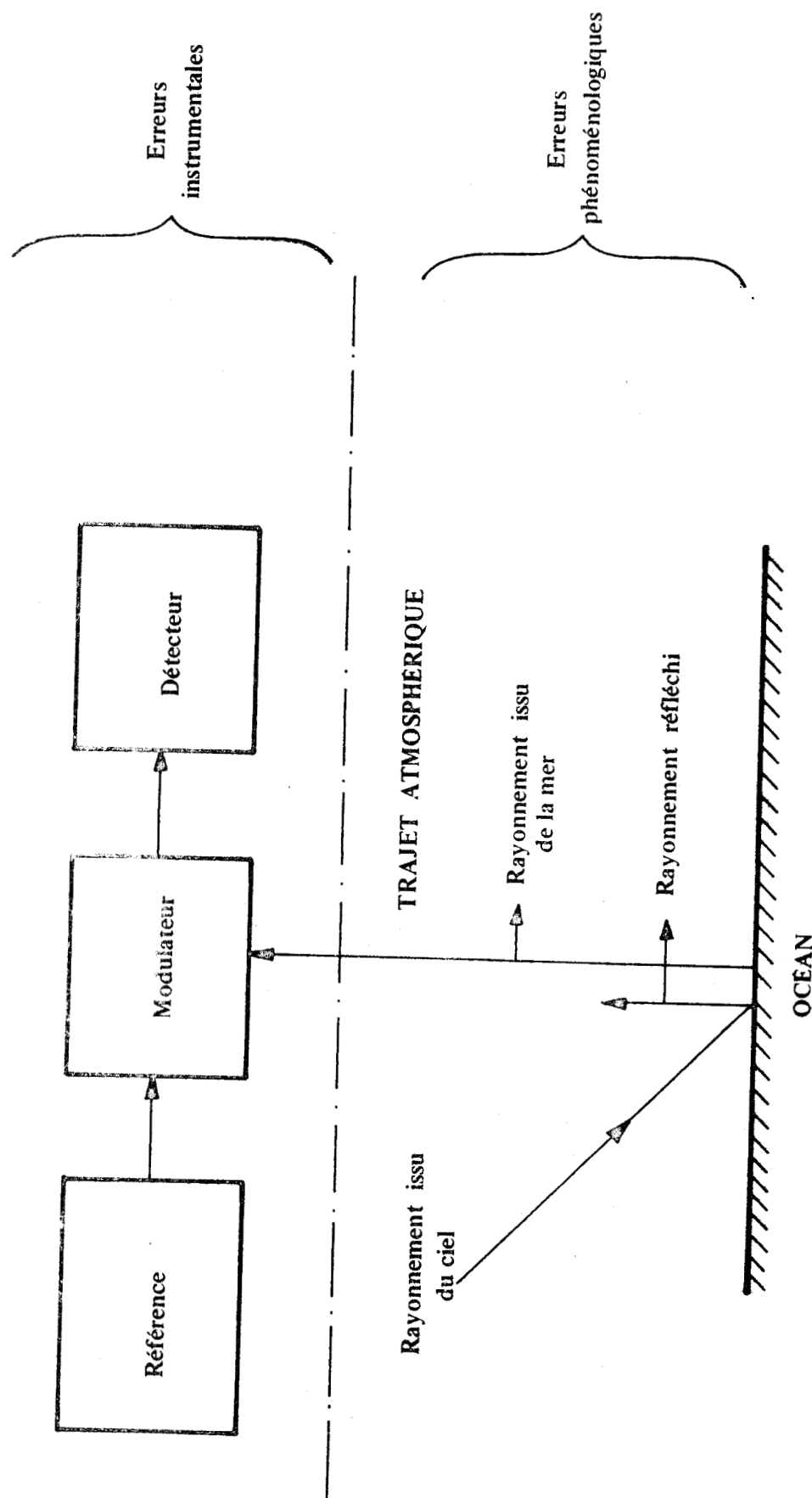
dans cette formule W_{CN} est l'énergie émise par le corps noir portée à la température absolue T ; et σ est la constante de STEFAN.

La loi de PLANCK précise, toujours pour un corps noir, la distribution spectrale de cette énergie. On peut donc déduire la température d'un corps noir grâce à l'énergie qu'il rayonne, soit dans l'ensemble du spectre, soit dans un intervalle spectral déterminé.

Lorsque l'objet à observer est porté à une température voisine de la température ambiante, on effectue généralement les mesures dans le domaine spectral des longueurs d'onde comprises entre 4 et 20 microns. Cette zone correspond, en effet au voisinage du maximum de la fonction de PLANCK. Dans cette zone, on sélectionne, de préférence, un intervalle de longueur d'onde correspondant à une fenêtre de transmission atmosphérique.

La figure I-1 donne le principe de la mesure radiométrique de la température de surface de la mer (3). Le rayonnement issu de la mer est comparé au rayonnement d'un corps noir de référence au moyen d'un modulateur qui envoie alternativement sur un détecteur approprié le rayonnement issu de la source et celui du corps de référence. On peut déterminer l'intervalle spectral dans lequel s'effectuera la mesure en ajoutant un filtre, généralement placé entre le détecteur et le modulateur. Le détecteur émet alors un signal électrique qui est amplifié et enregistré.

Chaque élément de cette chaîne participe à la précision de la mesure et, de leurs caractéristiques, dépendent ce que nous appellerons les erreurs instrumentales. Le détecteur sera principalement caractérisé par sa détectivité et sa fiabilité. Le modulateur, généralement composé de pièces réfléchissantes sera caractérisé par le coefficient de réflexion. Pour le corps noir de référence deux caractéristiques interviennent



Mesure de la température de surface de l'océan par radiométrie infrarouge. Erreurs inhérentes à la mesure.

FIGURE 1 1



suivant le cas, son émissivité et sa stabilité en température en fonction du temps.

Par ailleurs, à ces erreurs instrumentales s'ajoutent deux erreurs liées au phénomène à étudier (4). Dans notre cas, la mer n'étant pas un corps noir parfait une partie du rayonnement du ciel est réfléchi à la surface de l'eau, et la précision de la mesure sera fonction de la différence d'énergie entre celle émise par le ciel et celle émise par la mer. Cette différence est liée en premier lieu à la présence ou non des nuages dans le ciel. La partie d'énergie venant du ciel et réfléchi à la surface dépend aussi de l'état de celle-ci.

Enfin dans aucun intervalle spectral, l'atmosphère n'est totalement transparente et la précision de la mesure dépendra donc de l'altitude de l'appareil et de la densité des différents absorbants que l'on trouvera entre la surface de la mer et le radiomètre, ainsi que de leur température.

Dans les chapitres qui suivent nous analyserons en détail les différentes erreurs citées plus haut et les différentes possibilités de les réduire. Par ailleurs, il est difficile de dissocier totalement chaque élément de l'ensemble du phénomène et il sera souvent nécessaire de faire des compromis pour chacune des solutions adoptées.

CHAPITRE II

ERREURS PHENOMENOLOGIQUES LIEES AUX TECHNIQUES
DE RADIOMETRIE INFRAROUGE

II-1 - EFFET DE LA TRANSMISSION ATMOSPHERIQUE (5)

L'effet du trajet atmosphérique entre la source et le radiomètre ne peut à priori être négligée, ni en première approximation ni même pour de courtes distances. Les facteurs d'absorption que nous rencontrons sont considérables et pour cette raison l'atmosphère constitue de surcroît un émetteur de rayonnement parasite que l'on appelle souvent rayonnement de fond.

Construire un modèle atmosphérique n'est pas aisé en effet.

- La composition atmosphérique en un lieu donné varie dans de grandes proportions en fonction du temps. Les données météorologiques permettent le plus souvent des estimations peu précises et des prévisions à courte échéance.

- La composition atmosphérique varie avec l'altitude.

- les spectres d'absorption ont le plus souvent une structure de raies fines et la forme exponentielle de la loi d'absorption n'est pas valable.

- L'atmosphère peut contenir diverses sortes d'éléments non gazeux, solides (poussières, fumées) liquides (brumes, brouillards) dont l'influence est très complexe.

Comme il n'est pas question d'aborder globalement le problème, il faut procéder à une analyse des phénomènes élémentaires.

Les divers éléments gazeux pouvant apporter dans le domaine infrarouge des absorptions notables sont, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et l'ozone.

Nous allons préciser le dosage de ces éléments en fonction de la température, de la pression et des données météorologiques.

II-1-1 - LE GAZ CARBONIQUE

Le problème est relativement simple : sa concentration dans l'atmosphère est sensiblement constante, quelles que soient l'altitude et la température. Cette concentration est voisine de 0,03 % en volume. C'est dire que sa pression partielle varie comme la pression atmosphérique que l'on peut représenter par la loi approximative

$$p/p_0 = \exp(-z/H)$$

p est la pression à l'altitude

p_0 la pression au niveau de la mer

H est l'échelle de hauteur de 7720 m environ

pour un trajet horizontal donné, (Conditions physiques constantes sur tout le trajet considéré) le coefficient d'absorption A est une fonction de la quantité totale de l'élément absorbant contenu dans un cylindre de section unité et de longueur égale à ce trajet exprimé généralement en kilomètre. Il suffira donc, à une altitude donnée, de calculer ce coefficient pour un trajet équivalent obtenu en réduisant la distance d dans le rapport p/p_0 . Ce dernier rapport est représenté figure II-1 en fonction de z .

II-1-2 - LA VAPEUR D'EAU

La situation est plus complexe. La concentration varie dans des proportions considérables en fonction de la température et des aléas météorologiques.

Il est d'usage de mesurer la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau, par la hauteur d'eau précipitable par unité de trajet : si l'on considère un cylindre dont la hauteur est égale à l'unité utilisée pour mesurer les trajets de propagation (le kilomètre) et dont la section est quelconque, il suffit d'imaginer que l'on a condensé toute la vapeur d'eau contenue dans ce cylindre dans la partie inférieure de celui-ci, soit W la hauteur d'eau ainsi obtenue qui s'exprime en cm/km. W serait uniquement fonction de la température si la concentration de la vapeur d'eau correspondait exactement à la densité de vapeur saturante (exprimée en g/m^3) à cette température : on aurait alors une hauteur W_0 . En général W diffère de W_0 par un facteur h appelé humidité relative exprimée en % qui constitue une donnée météorologique : $W = h W_0$.

La figure II-2 représente W_0 en fonction de la température exprimée en degrés centigrades.

L'absorption due à la vapeur d'eau est en fonction bien définie du produit $W \cdot h$. Comme pour le gaz carbonique, cette quantité est fonction de l'altitude z , tout d'abord par suite de la réduction de pression atmosphérique

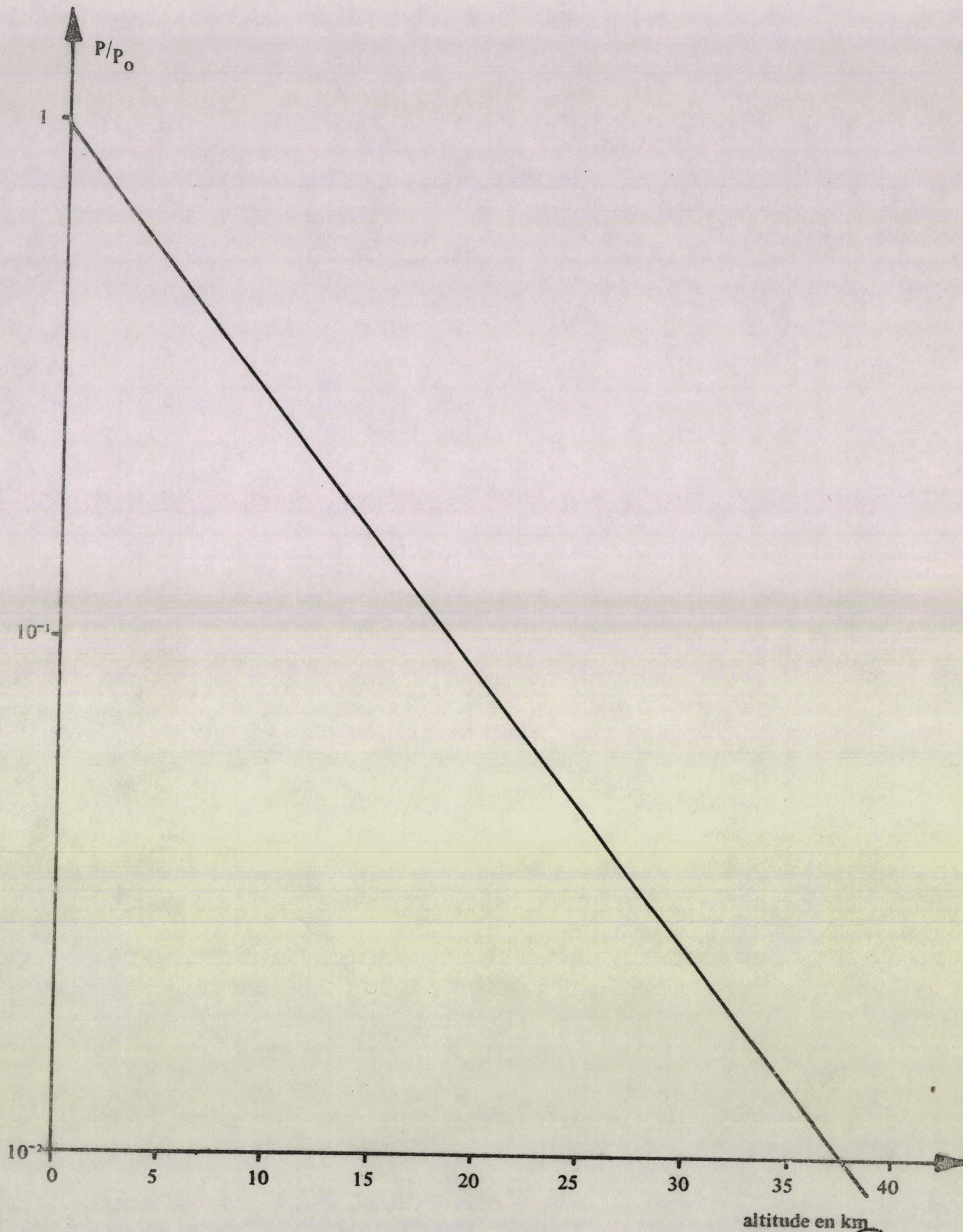


FIGURE II 1



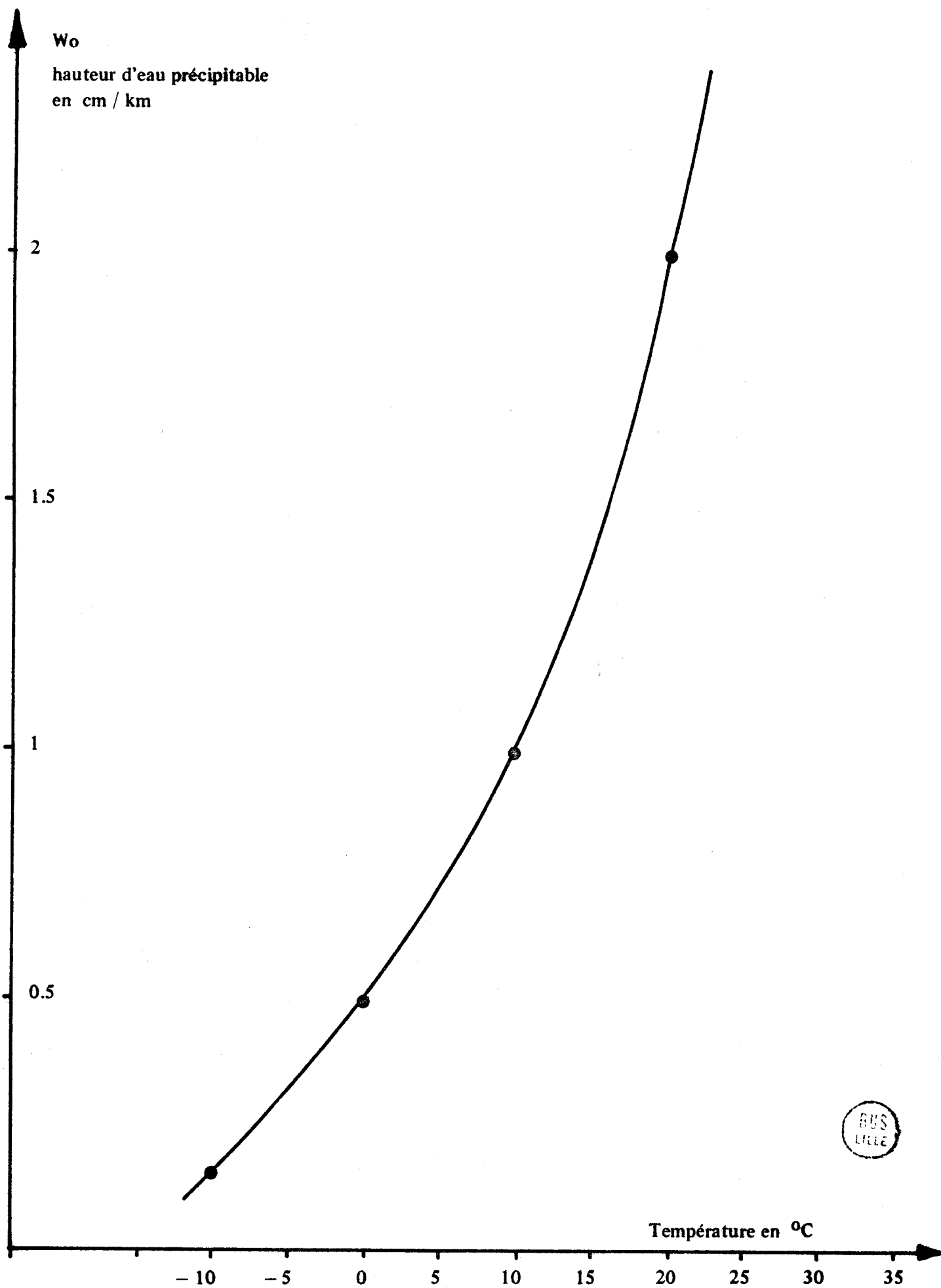


FIGURE II 2

en fonction de z mais surtout parce que la température et l'humidité relative varient très rapidement en fonction de z . Comme il n'est guère possible de représenter commodément l'influence de ces trois facteurs séparément car leurs variations peuvent être grandes et imprévisibles, on trouve des statistiques donnant les variations moyennes probables du contenu de vapeur d'eau pour différentes régions.

-1-3 - L'OZONE

L'ozone O_3 est un absorbant de seconde importance. La présence n'est sensible qu'à des altitudes comprises entre 10 et 40 km avec un maximum vers 25 km.

Pratiquement, pour le cas qui nous intéresse, l'ozone n'intervient pas dans la mesure.

Nous donnons sur la figure II-3 les différents spectres d'absorption à faible résolution de ces composants. On y voit très nettement qu'il existe des zones où l'absorption est faible. Ces zones appelées fenêtres atmosphériques sont centrées sur 1-1,6-2,25-4 et 10 μm . C'est évidemment dans ces fenêtres que nous avons intérêt à faire nos mesures de manière à limiter l'erreur due à la transmission de l'atmosphère.

Sur la figure II-4 nous avons reporté ces zones de transparence de l'atmosphère et nous y avons associé les courbes d'énergie du corps noir, l'une à 500° K et l'autre à 300° K. Dans le cas qui nous intéresse, qui est la mesure de la température de la mer, les températures à mesurer sont voisines de 285° K. Nous sommes donc amenés à choisir de préférence la fenêtre 8-14 μm .

Nous verrons dans le chapitre traitant choix du détecteur que cette zone convient parfaitement pour nos mesures.

Remarque

Nous trouvons ici un des compromis dont nous parlions en introduction.

En effet pour le radiomètre à construire, l'intervalle spectral doit être choisi en fonction de deux éléments contradictoires

Absorption par l'atmosphere totale (incidence normale) en %

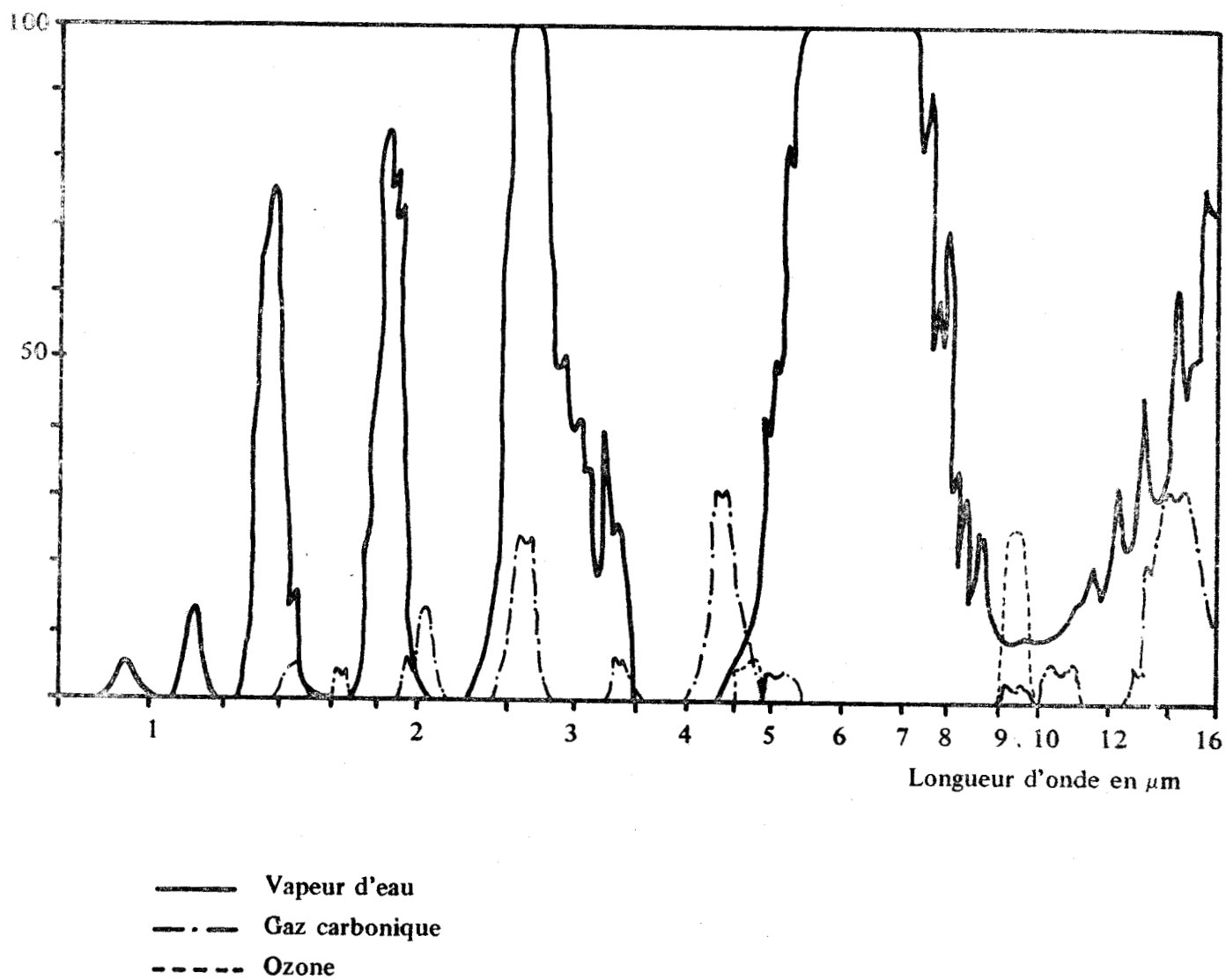


FIGURE II 3

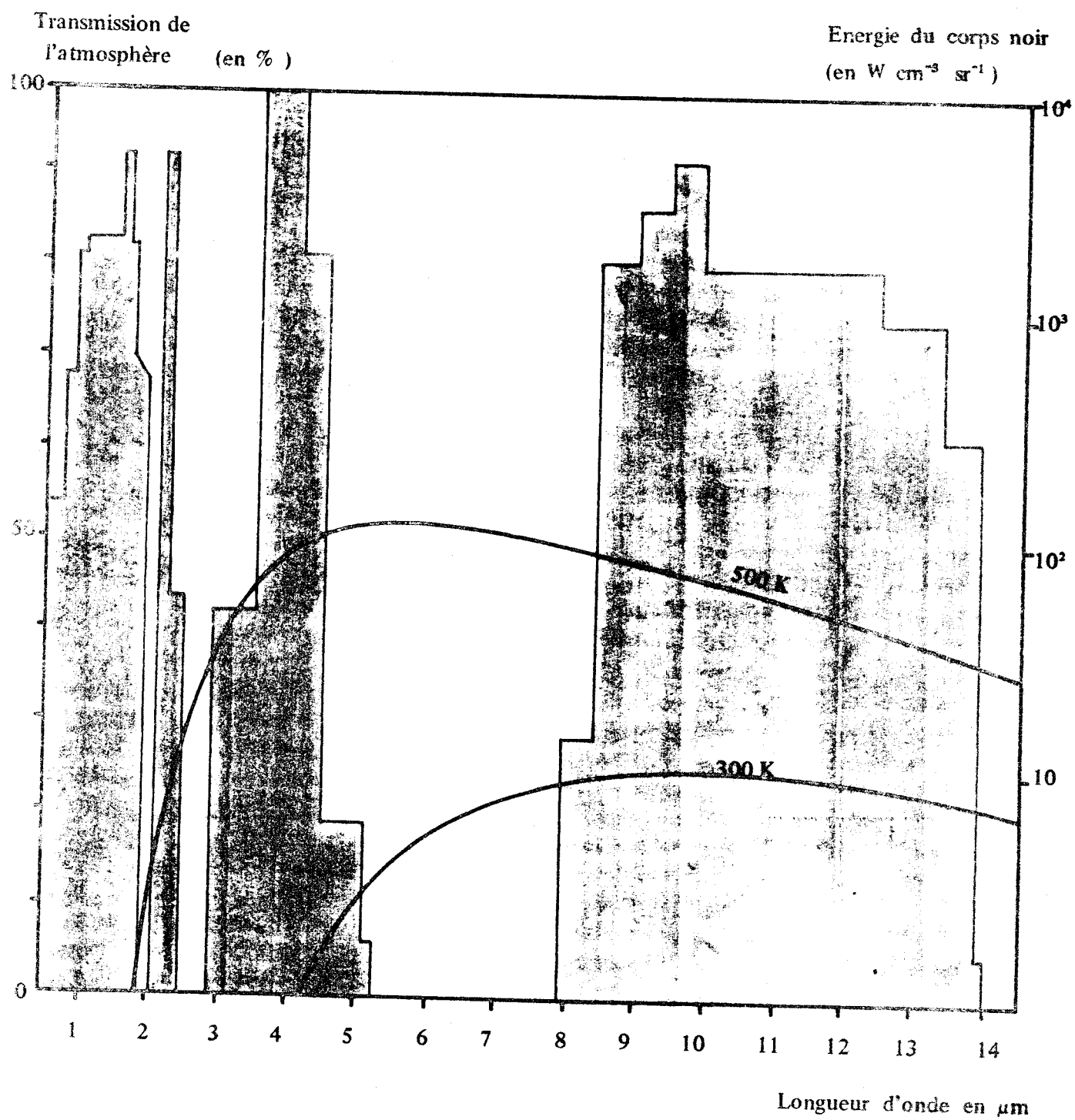


FIGURE II 4



- d'une part, plus l'intervalle spectral choisi est grand, plus l'énergie atteignant le détecteur est grande ; et meilleure sera la précision de la mesure

d'autre part, plus cet intervalle est grand, plus l'erreur de transmission sera grande.

- De plus l'erreur de transmission est liée à l'altitude à laquelle on effectue la mesure. Mais l'expérience a prouvé (6) que pour des missions de longue durée et à cause du genre d'avion que l'on emploie couramment, l'altitude de 1000 pieds (environ 300 mètres) est une limite basse de vol. C'est pour cette altitude que nous avons déterminé (chap. III) la bande passante optimum.

II-2 - EFFET DE REFLEXION A LA SURFACE DE L'OCEAN (7)

Les mesures radiométriques de la température de surface de l'océan montrent généralement qu'une différence de température (ΔT) existe entre la température apparente mesurée au radiomètre et celle mesurée au sein de la masse d'eau. La figure II-5 montre les enregistrements effectués lors de missions sur la Bouée-Laboratoire.

T_{eau} (radiomètre) est la température apparente radiométrique et ΔW est la différence entre l'énergie émise par la mer (W_w) et celle reçue du ciel (W_s). Les fluctuations de ΔW sont dues aux passages de nuages. La corrélation entre les écarts de température ΔT et ΔW a été analysée en détail au cours de plusieurs missions sur la Bouée-Laboratoire. La figure II-6 montre les droites de corrélation trouvées en fonction de la vitesse du vent. On peut y voir qu'une partie importante de cet écart de température est due à la réflexion, à la surface de l'eau, du rayonnement issu du ciel.

En effet, la mer n'étant pas un corps noir parfait le rayonnement à la longueur d'onde reçu par le radiomètre λ est

$$\begin{aligned} I'_{\lambda}(T) &= \epsilon_{\lambda} I_{\lambda}(T) + (1-\epsilon_{\lambda}) I_{\lambda s} \\ &= I_{\lambda}(T) + (1-\epsilon_{\lambda}) (I_{\lambda s} - I_{\lambda}(T)) \end{aligned}$$

$I_{\lambda}(T)$ est la luminance énergétique monochromatique du corps noir à la

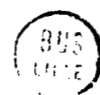
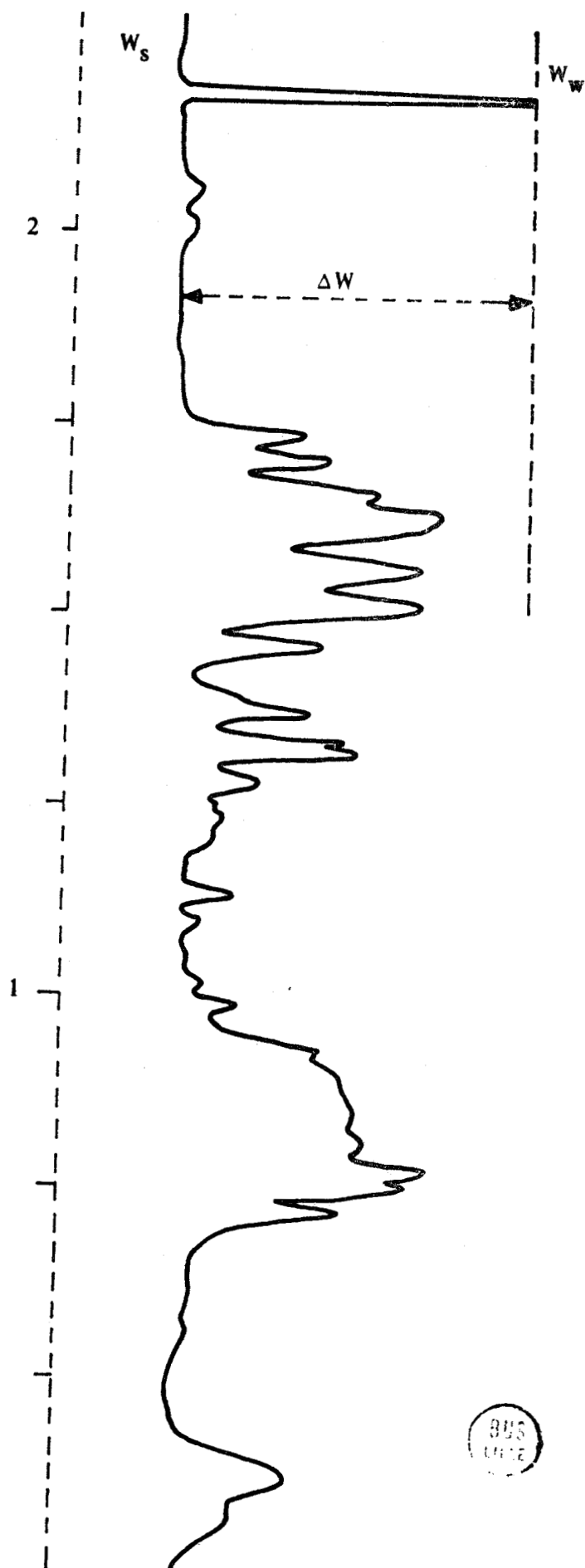
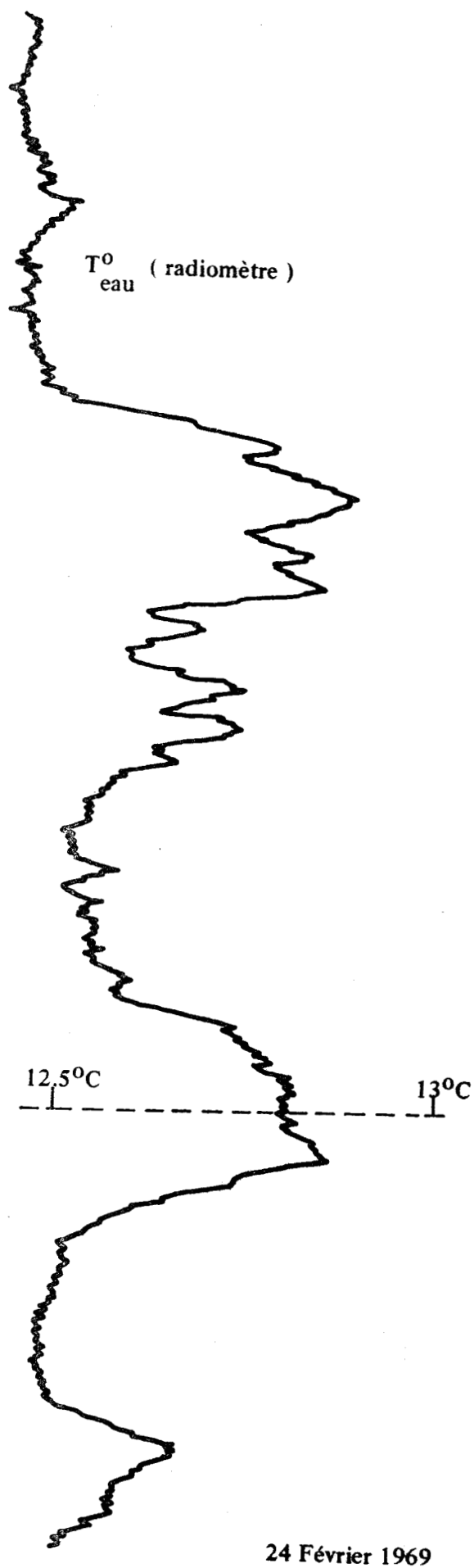
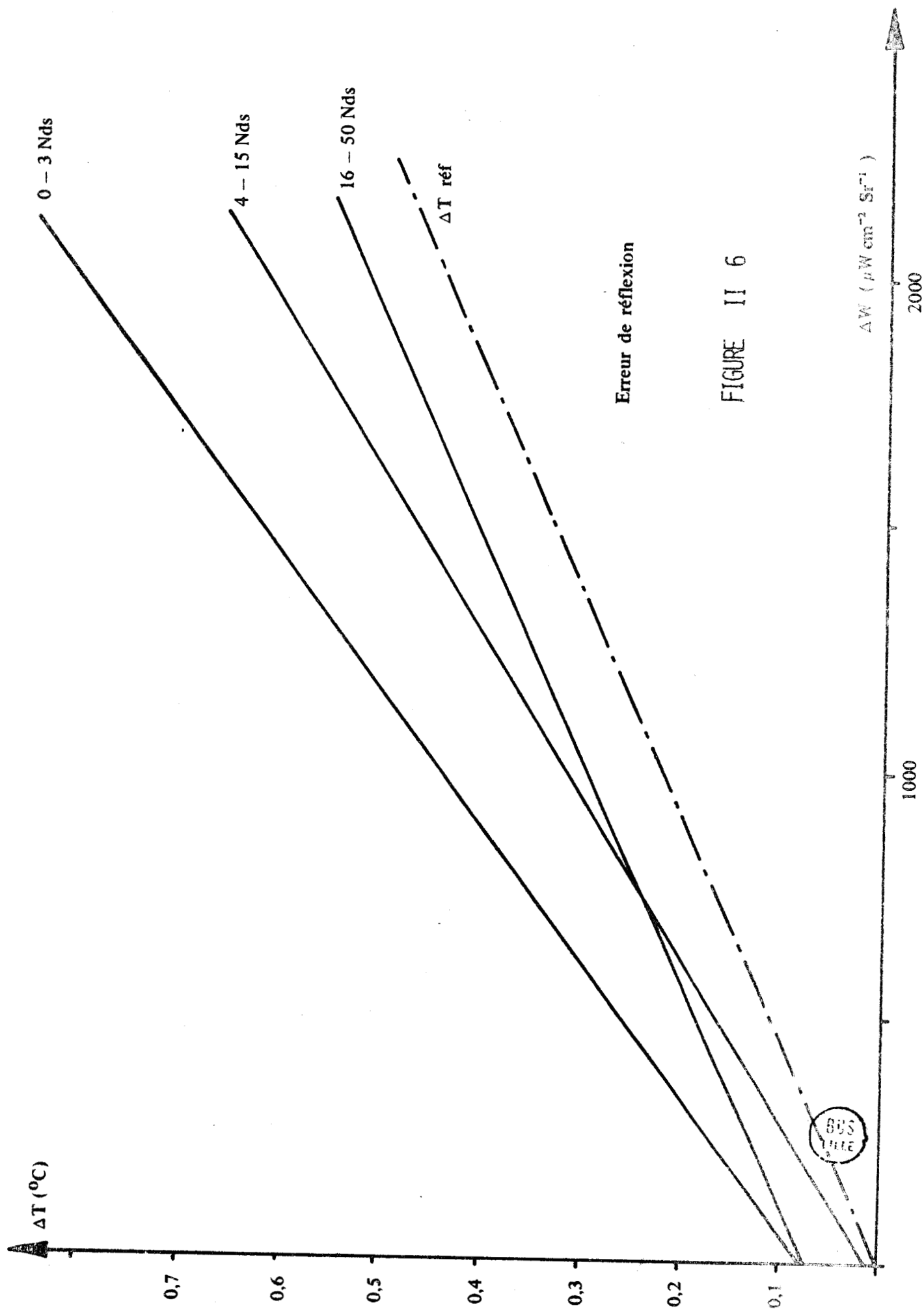


FIGURE II 5



température T.

ϵ_λ est l'émissivité monochromatique de la mer

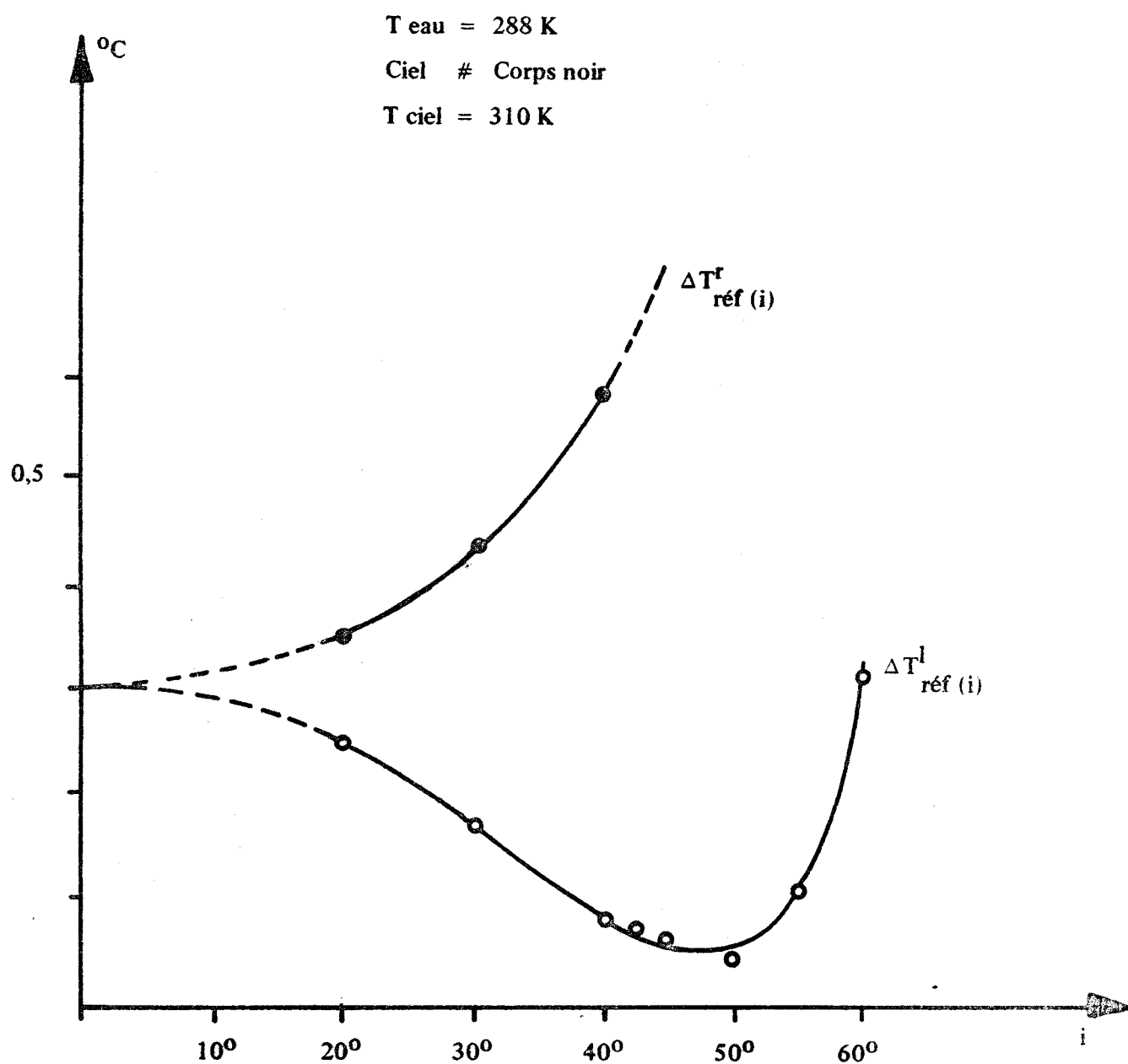
$I_{\lambda s}$ est la luminance énergétique monochromatique du rayonnement émis par le ciel et reçu à la surface de la mer.

A partir de cette équation, il est donc possible de déduire l'erreur due à la réflexion du rayonnement émis par le ciel. C'est à la surface de l'eau que l'on calcule cette erreur

$$\Delta T_{(ref)} = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda (1 - \epsilon_\lambda) (I_{\lambda s} - I_\lambda(T)) d\lambda}{\int_0^\infty \tau_\lambda \frac{dI_\lambda(T)}{dT} d\lambda}$$

τ_λ est la transmission du filtre utilisé pour définir l'intervalle spectral de la mesure. Pour les mesures effectuées à bord de la Bouée-Laboratoire, l'intervalle était de 8-15 μ . Comme on peut le voir dans la formule donnée ci-dessus ΔT_{ref} est directement proportionnel à $(1 - \epsilon_\lambda)$ qui représente le facteur de réflexion de la mer. Par ailleurs la surface de la mer ayant un caractère polarisant dans le domaine de longueur d'onde choisi, il est apparu très judicieux {8} de faire les mesures en lumière polarisée.

La figure II-7 montre les résultats obtenus en faisant varier l'angle d'incidence de la visée pour les deux composantes, l'une longitudinale et l'autre transversale du rayonnement émis par la mer. On aperçoit très nettement que pour un angle compris entre 45° et 55° le ΔT_{ref} est fortement diminué en utilisant la composante parallèle. La figure II-8 donne le facteur d'amélioration en fonction de l'angle d'incidence et pour deux intervalles spectraux (8-13,5 μ) et (10-12 μ). Ces résultats ont amené le laboratoire à reconsidérer la technique de mesure de la température de la surface de l'eau en introduisant un polariseur sur le chemin du rayonnement émis par la mer et atteignant le détecteur. Pour des raisons que nous expliquerons en détail lors de la description du radiomètre, le polariseur est placé entre le modulateur et le détecteur.



Mesures radiométriques en lumière polarisée

FIGURE II 7



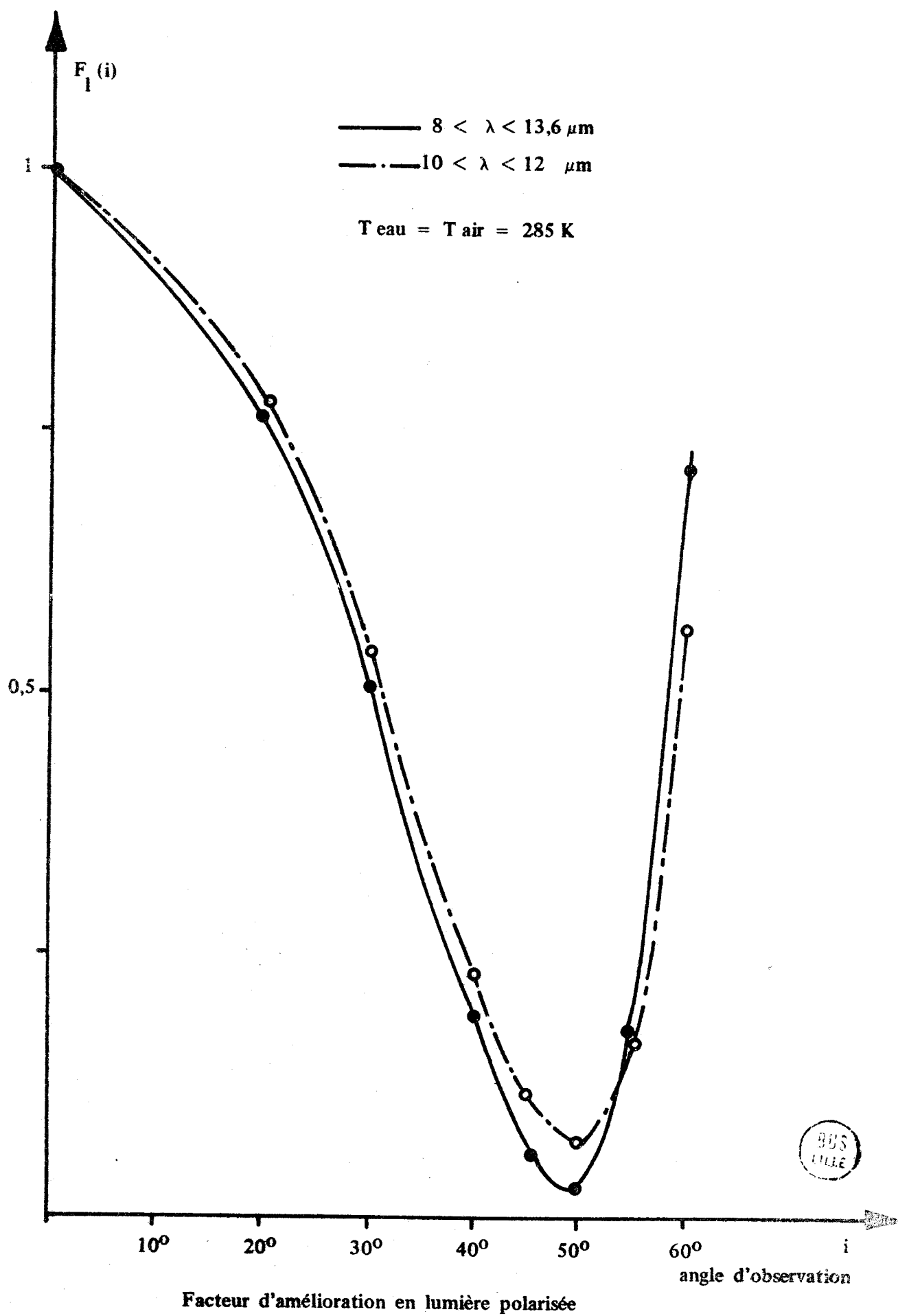


FIGURE II 8

CHAPITRE III

ETUDE ET CHOIX DES DIVERS COMPOSANTS
DU RADIOMETRE RALI

Avant d'étudier en détail les différents composants du radiomètre infrarouge RALI nous rappellerons brièvement le principe de l'appareil radiométrique. Pour éviter les erreurs de mesure dues aux variations de la température ambiante, un système de modulation permet au détecteur de viser alternativement la source à étudier et un corps noir de référence placé à l'intérieur du radiomètre.

figure III-1 indique le principe de cette mesure. Dans ce cas le signal de sortie est enregistré et il est nécessaire d'étalonner l'appareil à l'aide d'un corps noir extérieur de manière à transformer la tension de sortie en température apparente radiométrique. On voit tout de suite que ce signal de sortie est directement proportionnel à la sensibilité du détecteur et au gain de l'amplificateur. Les caractéristiques de ces éléments pouvant varier dans le temps, il est donc nécessaire de faire fréquemment des réétalonnages.

Il est théoriquement possible d'éviter ces réétalonnages en employant le principe de la figure III-2 (9). Dans ce cas le signal, après amplification, sert à ajuster la température du corps noir de référence de manière à ce que le rayonnement de la source et le rayonnement du corps noir soient identiques. Moyennant quelques précautions, la température radiométrique de la source est directement mesurable par la température du corps noir. Cette mesure peut alors être effectuée à l'aide de n'importe quel thermomètre classique, électronique ou numérique.

Un polariseur permet comme on l'a vu au chapitre II de diminuer fortement l'erreur de réflexion.

Nous allons maintenant étudier séparément chacun des composants utilisés, de manière à déterminer l'influence de leurs caractéristiques sur la précision de la mesure. Il s'agira essentiellement du détecteur, du filtre, du polariseur, de l'optique associée au détecteur, du modulateur, et du corps noir.

III-1 - CHOIX DU DETECTEUR (5)

Le choix du détecteur est très important car il va conditionner la sensibilité et la fiabilité de la mesure.

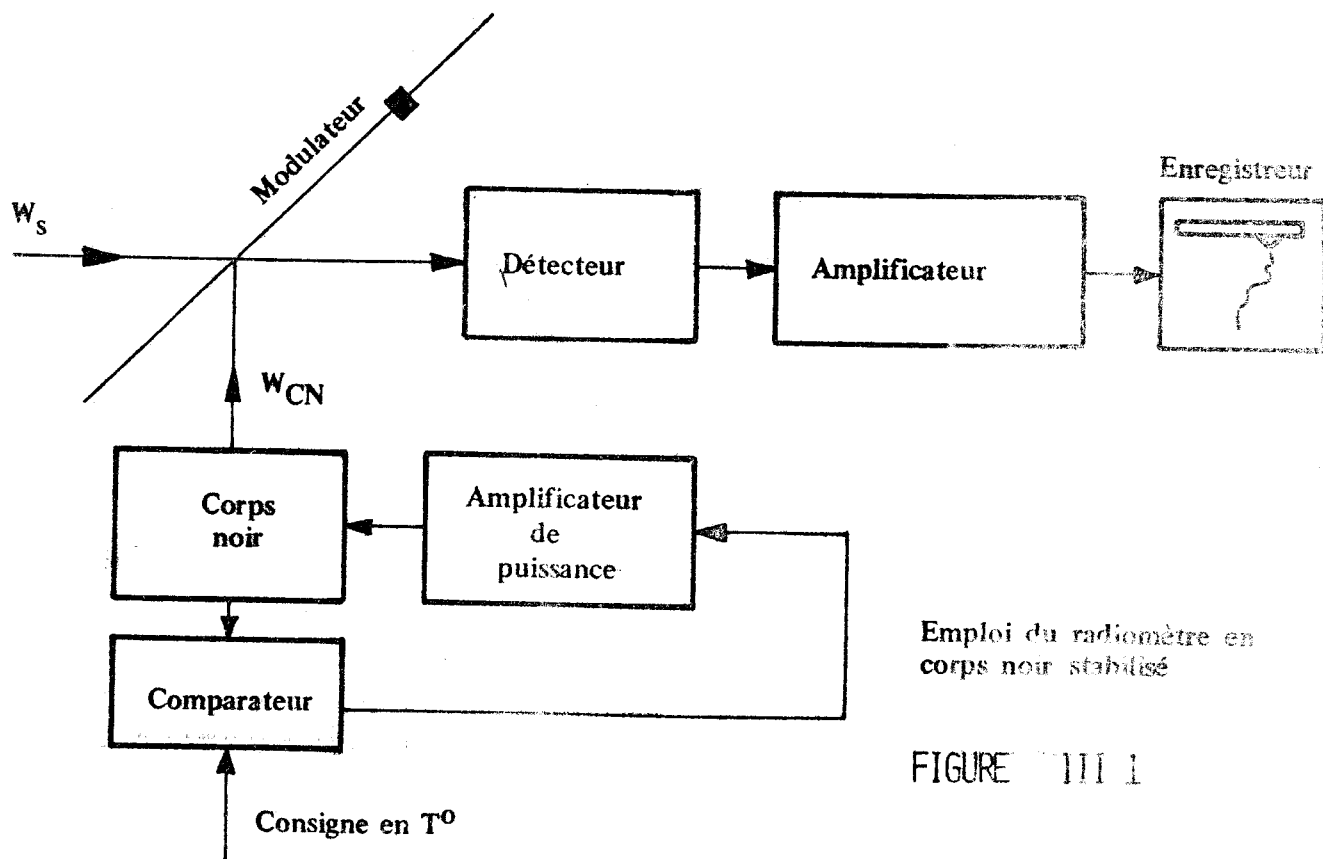
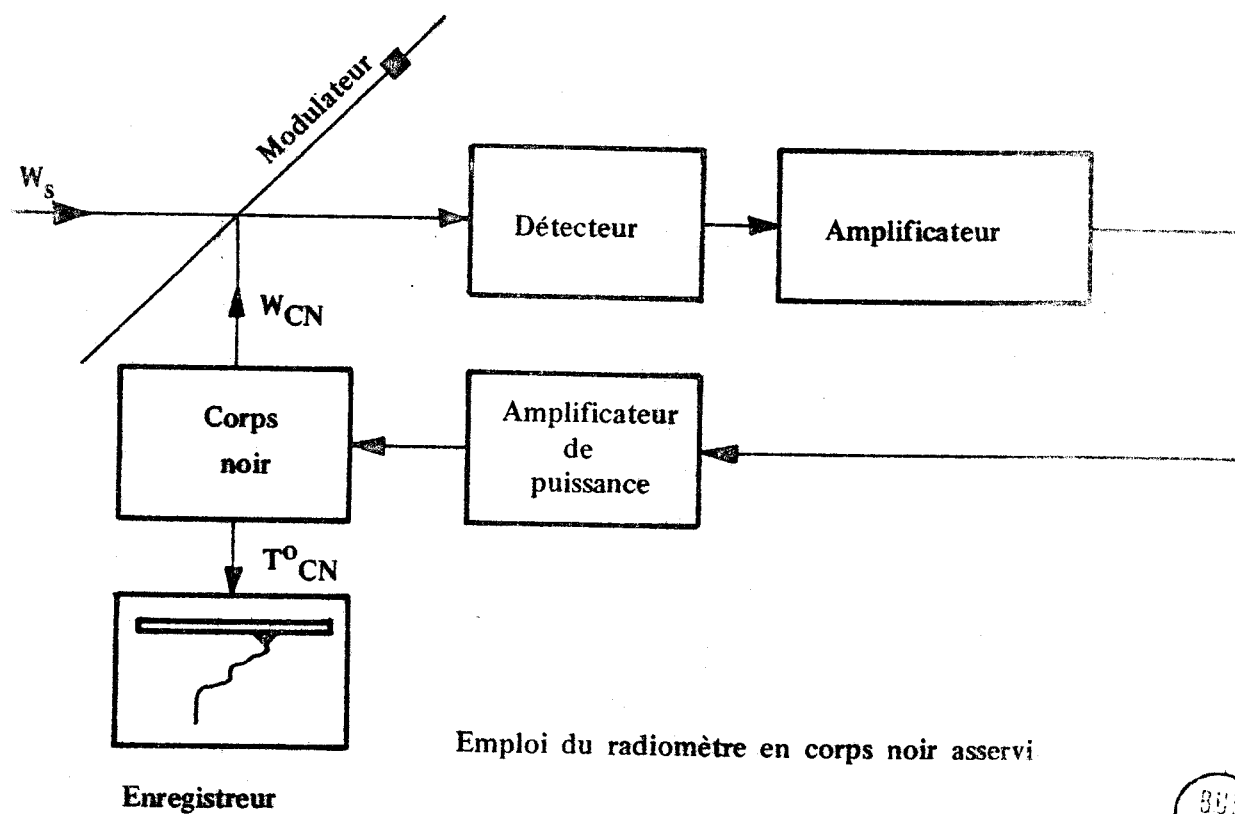


FIGURE III 1



Emploi du radiomètre en corps noir asservi

FIGURE III 2



III-1-1- CRITERES DE CHOIX

Dans un détecteur infrarouge, si l'on suppose que le flux apté (P) est une fonction périodique du temps de fréquence f, sinusoïdale, obtenue par modulation, le facteur de réponse d'un détecteur s'exprime par le rapport : signal de sortie S (en Volts) sur le flux d'énergie reçu P (en Watts)

$$F = S/P$$

Si ce détecteur est suivi d'un filtre limitant le bruit propre du détecteur (B) à une certaine bande passante Δf , on peut définir un autre paramètre du détecteur P_B , c'est à dire la puissance de rayonnement incident pour laquelle la valeur efficace du signal à la sortie est égale à la valeur efficace du bruit engendré dans le détecteur, dans des conditions de fonctionnement données

$$P_B = B/F$$

P_B est généralement exprimé dans la littérature technique sous les initiales NEP (noise equivalent power). Enfin l'inverse de P_B s'appelle la détectivité D

$$D = 1/P_B \text{ exprimé en Watt}^{-1}$$

Par ailleurs comme il existe de nombreux types de détecteurs, il est avantageux de pouvoir comparer entre eux des détecteurs de type totalement différents. Pour effectuer ces comparaisons, il est utile de disposer d'un facteur indépendant d'une part de la surface du détecteur (A) et d'autre part de la bande passante de l'amplificateur utilisé (Δf).

Pour un détecteur, D est inversement proportionnel à la racine carrée de sa surface et inversement proportionnel à la racine carrée de la bande passante:

$$D = D^* / \sqrt{A} \sqrt{\Delta f} ;$$

on obtient ainsi pour une famille de détecteurs une quantité D^* indépendante de A et de Δf .

D^* est appelé détectivité spécifique et peut se définir comme la détectivité simple d'un détecteur de surface 1 cm^2 et pour une bande passante d'utilisation égale à l'unité (1 Hz). Elle s'exprime donc en $\text{watt}^{-1} \text{Hertz}^{1/2} \text{ cm}$.

Afin de choisir le détecteur le mieux approprié à notre cas nous allons calculer, pour les différentes fenêtres atmosphériques la détectivité minimum nécessaire à un détecteur pour déceler une variation de $1/100^\circ \text{ K}$ autour de 300° K . Pour cela nous supposerons que la mer est un corps noir parfait et nous calculerons dans les divers intervalles spectraux possibles la différence d'énergie provoquée par l'augmentation de $1/100^\circ \text{ K}$ autour de 300° K .

La formule de PLANCK donne la répartition spectrale de la brillance énergétique du corps noir

$$B_{\lambda}^{\text{CN}} = \frac{2h c^2 \lambda^{-5}}{\exp (hc/k\lambda T) - 1}$$

où h est la constante de PLANCK : $h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J.S.}$
et k est la constante de BOLTZMAN $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K.}$

Dans notre cas on cherche

$$\Delta B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}^{300} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda}^{300+\Delta T} d\lambda$$

Nous calculerons successivement ΔB pour les différentes fenêtres atmosphériques $7,5-13,5 \mu\text{m}$, $3,5-4 \mu\text{m}$ et $2 \text{ à } 2,25 \mu\text{m}$.

Les tables du corps noir donnent B_{λ} en fonction de la longueur d'onde et pour une température donnée

B_{λ} en $\text{W.cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$

T \ λ	300	320
8	$9.1 \cdot 10^{-4}$	$13.2 \cdot 10^{-4}$
7	9.85	13.8
10	9.94	13.4
11	9.59	12.6
12	8.98	11.6
13	8.24	10.4

Soit
$$\int_{7,5}^{13,5} B_{\lambda}^{300} d\lambda = 55,7 \cdot 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$$

$$\int_{7,5}^{13,5} B_{\lambda}^{320} d\lambda = 75 \cdot 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$$

$$\Delta B \text{ pour } 20^{\circ} \text{ K} = 19,3 \cdot 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$$

$$\underline{\Delta B \text{ pour } 1/100^{\circ} \text{ K} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}}$$

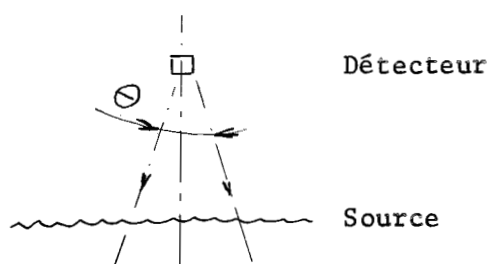
Le même calcul a été fait pour l'intervalle 3-5 μ où l'on trouve

pour $1/100^{\circ} \text{ K}$
$$\underline{\Delta B = 1 \cdot 10^{-7} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}}$$

Pour l'intervalle spectral 2 à 2,25 μm on trouve

pour $1/100^{\circ} \text{ K}$
$$\underline{\Delta B = 1,15 \cdot 10^{-10} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}}$$

Pour passer aux détectivités minimums des détecteurs à choisir dans les différentes fenêtres il est nécessaire de connaître "l'angle de collecte" du détecteur



Pour des raisons que nous expliquerons plus loin nous nous sommes limité à $\theta = 10^{\circ}$

$$\Omega \text{ en stéradian} = 2 \pi (1 - \cos \theta)$$

soit pour

$$10^{\circ} = \theta \quad \Omega = 0,095 \text{ sr}$$

On a donc

$$\begin{aligned} \Delta B(7,5 < \lambda < 13,5) &= 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ W cm}^{-2} \\ \Delta B(3 < \lambda < 5) &= 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ W cm}^{-2} \\ \Delta B(2 < \lambda < 2,25) &= 1,09 \cdot 10^{-11} \text{ W cm}^{-2} \end{aligned}$$

Les détectivités nécessaires pour les diverses fenêtres atmosphériques sont donc

$$D^x = \frac{1}{\Delta B} = 1,1 \cdot 10^{+9} \text{ cm W}^{-1} \text{ H}^{1/2} \text{ pour la fenêtre } 10 \mu$$

$$D^x = 5,2 \cdot 10^{+9} \text{ cm W}^{-1} \text{ H}^{1/2} \text{ pour la fenêtre } 4 \mu$$

$$D^x_{\text{max}} = 9 \cdot 10^{+12} \text{ cm W}^{-1} \text{ H}^{1/2} \text{ pour la fenêtre } 2 \mu$$

Ces résultats sont reportés figure III-3.

III-1-2 - ENSEMBLE DES DETECTEURS PROPOSES (10)

Nous pouvons donc nous reporter aux courbes de la figure III-4. Cette figure présente l'ensemble des principaux détecteurs infrarouges que l'on trouve sur le marché.

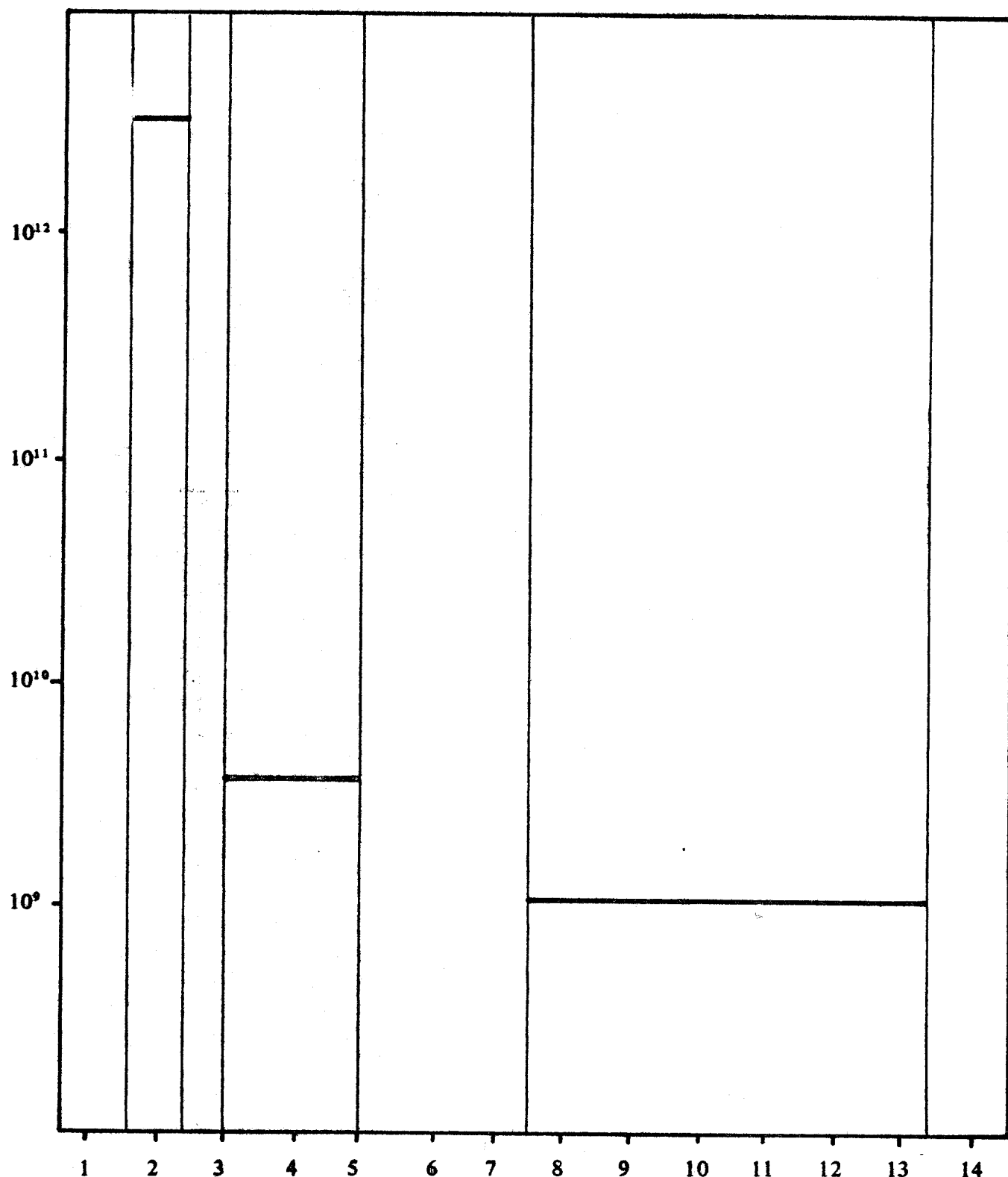
En comparant les D^x minimum calculées plus haut et celles présentées sur la figure III-4 on peut tout de suite éliminer la bande à 2μ qui présente par ailleurs l'inconvénient de comprendre une partie du rayonnement solaire.

Comme on peut le voir le choix est assez grand mais les réponses spectrales sont très différentes ainsi que les conditions d'emploi.

En effet les détecteurs (1,2,3,4,5,6,7,12) ne sont utilisables qu'à la température 77° K . Cette température est atteinte à l'aide de l'azote liquide et nécessite un matériel lourd et peu opérationnel pour des missions de longue durée. Les détecteurs (8,9,10,11) sont par contre utilisables à 300° K et c'est sur eux que notre choix s'est porté. Etant donné la détectivité désirée, nous n'avons à choisir qu'entre le type 8 et le type n° 11 et nous travaillerons dans la fenêtre atmosphérique $10 \mu\text{m}$. Le détecteur n° 11 est un détecteur pneumatique de type GOLAY et nous l'avons éliminé à cause de son effet microphonique, car l'avion ou même le bateau ou la bouée sont des vecteurs dont les vibrations sont parfois intenses et risqueraient donc de perturber fortement le fonctionnement du détecteur.

Il ne reste donc plus que le détecteur 8. C'est ce détecteur que nous avons installé sur le radiomètre.

D^* en $\text{cm W}^{-1} \text{H}^{1/2}$

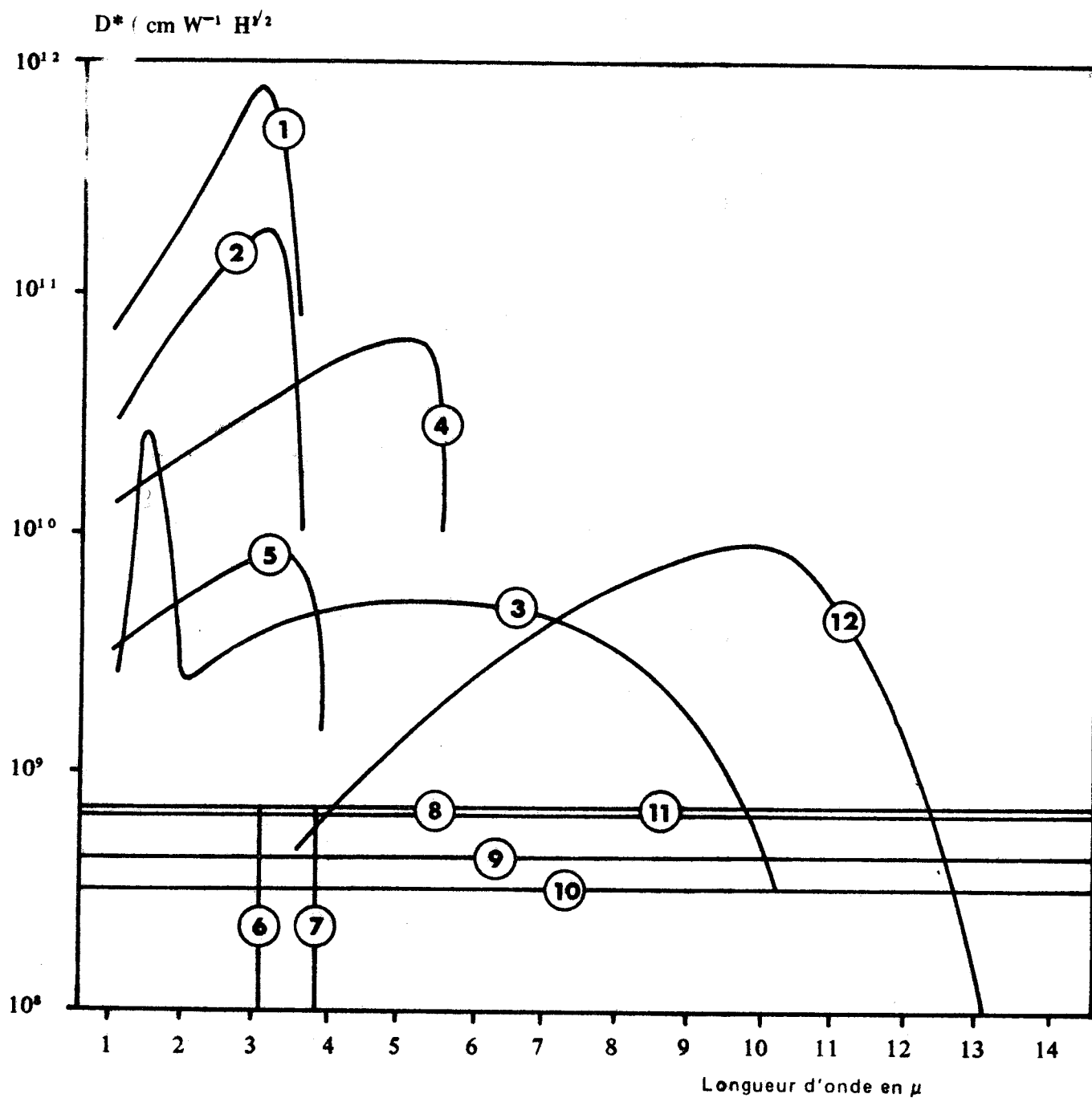


Longueur d'onde
en μm



Délectivité minimum nécessaire dans chaque fenêtre atmosphérique pour détecter une variation de température de $1/100$ °C autour de 285°K .

FIGURE III 3



1 - In As 77°K
 2 - In As 196°K
 3 - Au Ge 77°K
 4 - In Sb 77°K
 5 - In As 300°K
 6 - In As 77°K

7 - In As 77°K
 8 - Pyroélectrique 300°K
 9 - Thermistor 300°K
 10 - Thermopile 300°K
 11 - Golay 300°K
 12 - Pb SN Te 77°K



FIGURE III 4

Défectivité des détecteurs infrarouge

Nous allons maintenant examiner ses caractéristiques complètes afin de déterminer les conditions optimum de son emploi.

1-1-3 - ETUDE DU DETECTEUR PYROELECTRIQUE

Le détecteur pyroélectrique est un nouveau type de détecteur thermique ayant plusieurs caractéristiques uniques qui font qu'il est particulièrement bien adapté à notre application.

Les détecteurs thermiques perçoivent les radiations par l'élévation de température produite dans un récepteur absorbant. Cette augmentation de température est généralement transformée en signal électrique à l'aide de matériaux qui possèdent un fort effet thermo-électrique: par exemple une thermistance ou un thermo-couple. Le détecteur pyroélectrique utilise une fine pellicule de diélectrique sur les faces desquelles une charge électrostatique varie quand la température change. Des électrodes sont disposées sur ces faces pour collecter la charge. Le détecteur se présente donc essentiellement comme une capacité aux bornes de laquelle une tension varie quand il est exposé au rayonnement. Cette pellicule est faite à partir d'un cristal de la classe des pyroélectriques.

Quand un champ électrostatique est appliqué à un diélectrique, il apparaît une polarisation électrique dont l'amplitude est fonction des constantes diélectriques. Pour la plupart des matériaux cette polarisation disparaît quand le champ est supprimé. Mais, dans une certaine classe de cristaux, il reste une importante polarisation résiduelle. Ces cristaux sont appelés ferroélectriques par analogie avec les résiduelles magnétiques dans les matériaux ferromagnétiques. Les charges de surface produites par cette polarisation sont souvent rapidement neutralisées par les fuites à l'intérieur du cristal, mais dans certains cristaux ferroélectriques la polarisation résiduelle est fortement sensible à la température. Quand la température change, la modification relative à la polarisation résiduelle fait apparaître une nouvelle charge qui sera positive ou négative suivant le sens de la variation de température. De tels ferroélectriques sont appelés pyroélectriques et leur coefficient pyroélectrique" est défini par la dérivée de la polarisation par rapport à la température, il s'exprime en coulombs /cm² °C.

Le détecteur pyroélectrique est donc électriquement une capacité. Ses avantages sont les suivants :

Il possède une grande sensibilité sur une large bande passante.

Aucune cryogénie n'est nécessaire.

Il a une meilleure détectivité aux hautes fréquences que beaucoup d'autres détecteurs thermiques.

Il ne nécessite aucune polarisation fortement régulée.

La réponse en tension croît aux basses fréquences.

Par contre :

- Il est actuellement difficile de faire des surfaces plus petites que 0,25 x 0,25 mm.

- Les ferroélectriques perdent toute polarisation si leur température dépasse une limite connue sous le nom de point de Curie. Pour le triglycine de sulfate (T.G.S.) le point de curie est de 49° C et sa réponse décroît rapidement au dessus de 45° C. Le détecteur n'est pas détruit si le point de Curie est dépassé; mais il doit être repolarisé.

La figure III-5 montre la présentation mécanique du détecteur. La surface sensible est protégée par une fenêtre en KRS5. Un tel détecteur se présentant électriquement comme une capacité, sa résistance interne est très grande. En fait dans le boîtier le signal est appliqué à la "gate" d'un transistor à effet de champ qui joue le rôle d'adaptateur d'impédance. Pour l'utilisateur le détecteur se présente donc comme un générateur d'impédance interne de 2 K Ω . La figure III-6 donne le détail de l'association détecteur + transistor à effet de champ. Une source de polarisation de 24 V est nécessaire à son fonctionnement.

Nous avons porté sur la figure III-7 la réponse de détecteur en fonction de la longueur d'onde. Comme on peut le voir, dans le domaine spectral choisi, la courbe de réponse est relativement constante.

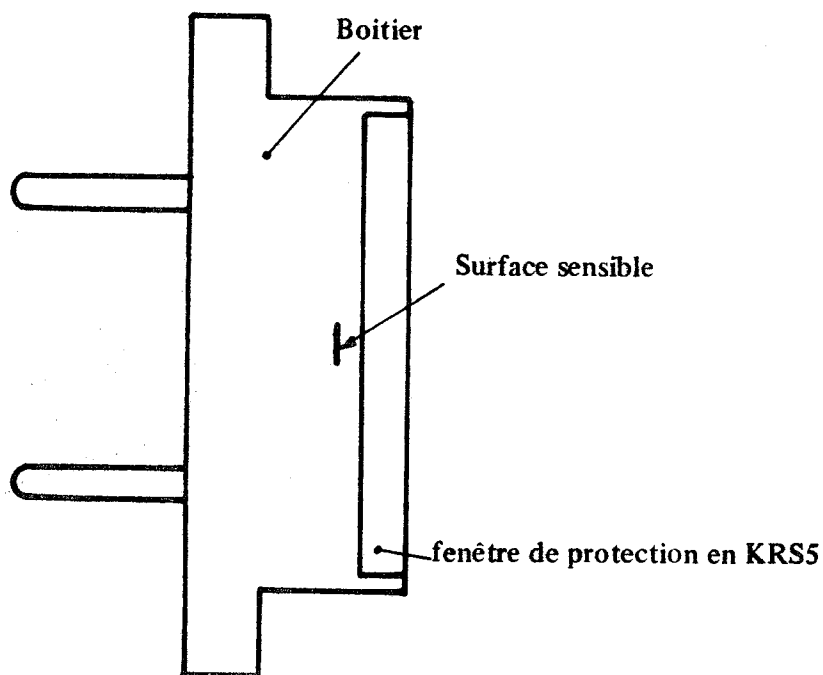
Nous allons maintenant examiner les différentes caractéristiques du détecteur pour diverses valeurs de la fréquence de modulation.

La figure III-8 récapitule ces caractéristiques pour deux fréquences 10 et 100 Hz, en fonction de la surface du détecteur.

Le fabricant offrait deux types principaux de détecteur :

- un détecteur dont la surface est de 0,2 x 2 mm
- un détecteur dont la surface est de 2 x 2 mm.

échelle 5



Détecteur pyroélectrique présentation mécanique

FIGURE III 5

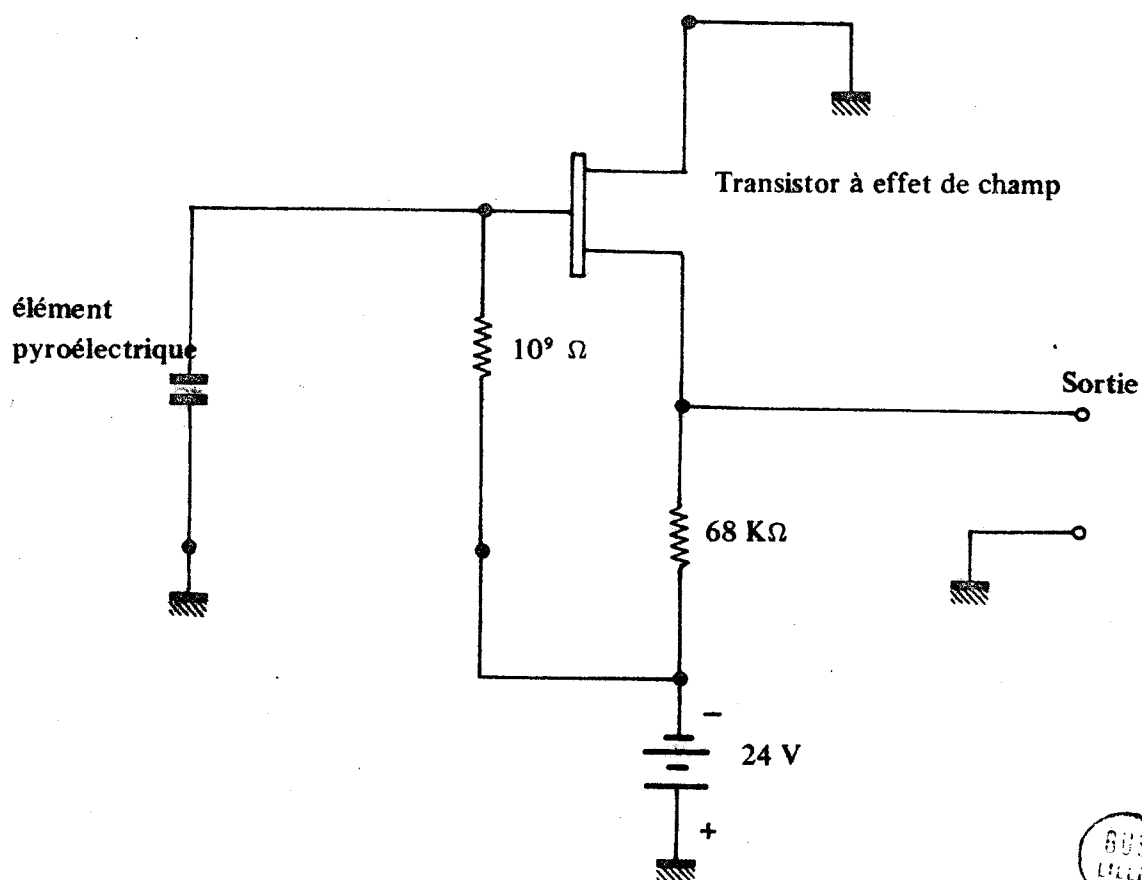
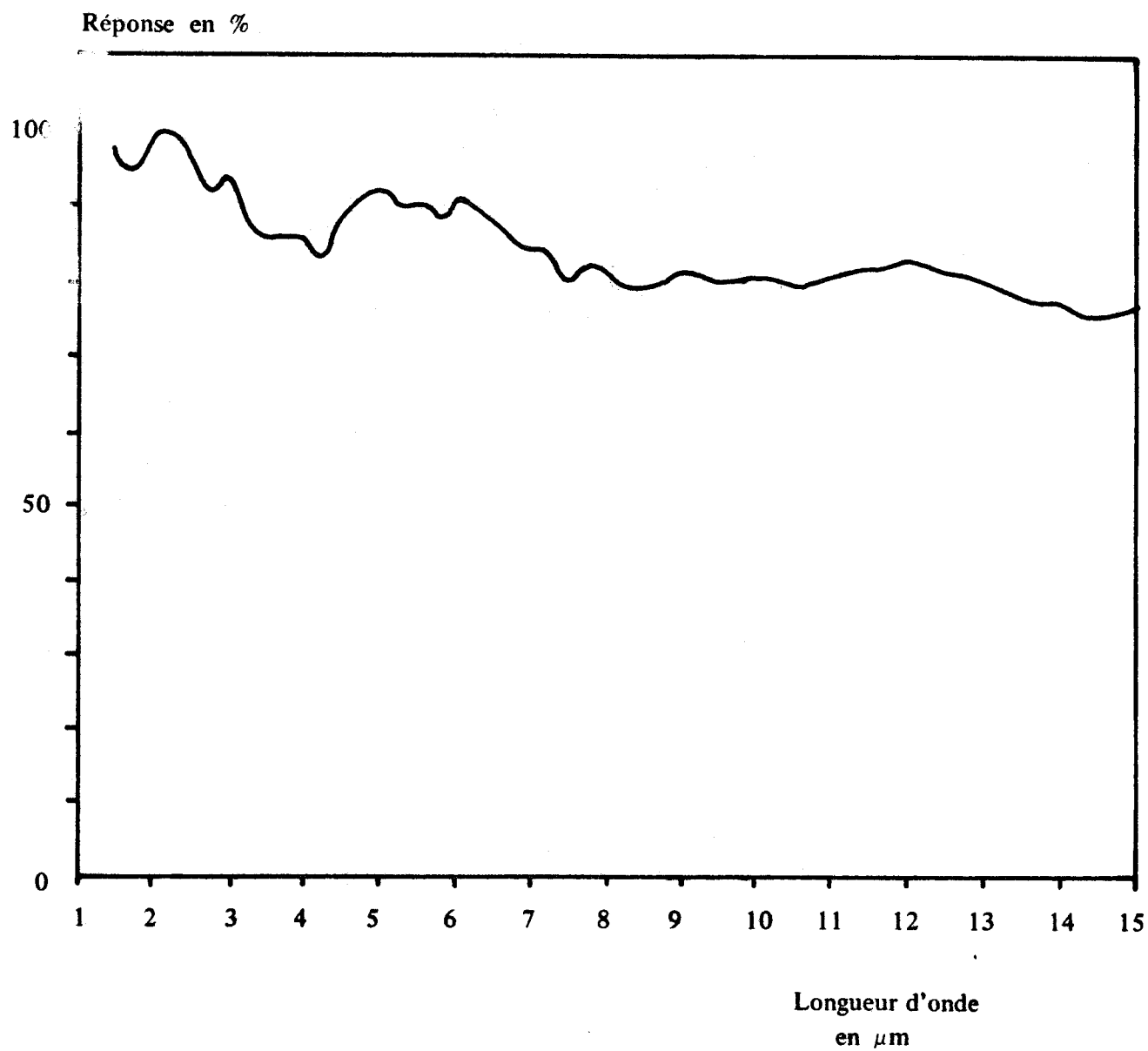


Schéma d'utilisation du détecteur

FIGURE III 6

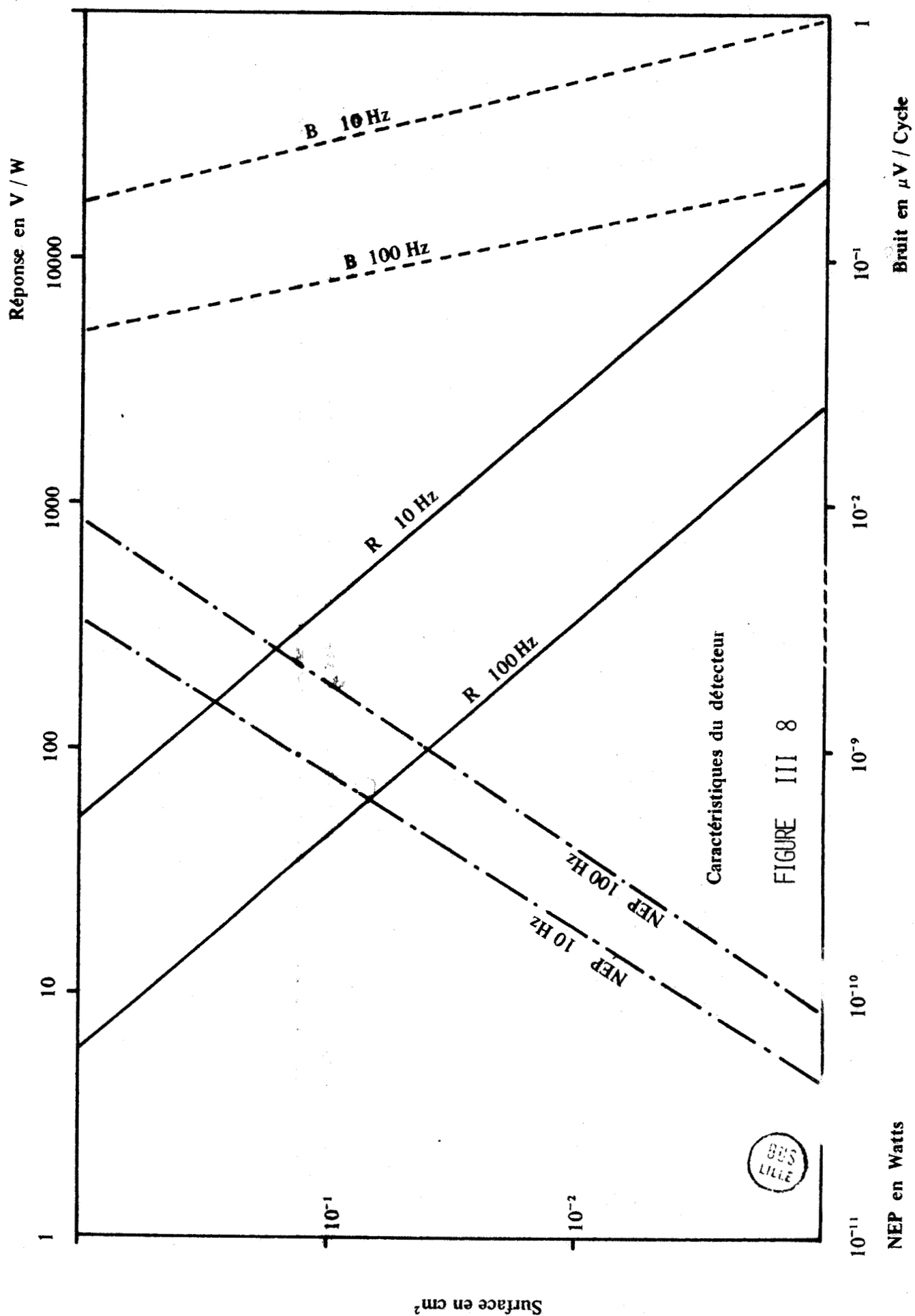




Réponse du détecteur en fonction de la longueur d'onde

FIGURE III 7





Les angles d'ouverture de l'appareil envisagé nous ont fait préférer le détecteur de 2 x 2 mm.

Pour un tel détecteur nous avons reporté sur la figure III-9, en fonction de la fréquence de modulation, les trois caractéristiques principales du détecteur, le bruit en $\mu V H^{1/2}$, la réponse en V/Watts et la détectivité. On peut y voir que la détectivité augmente quand la fréquence de modulation baisse.

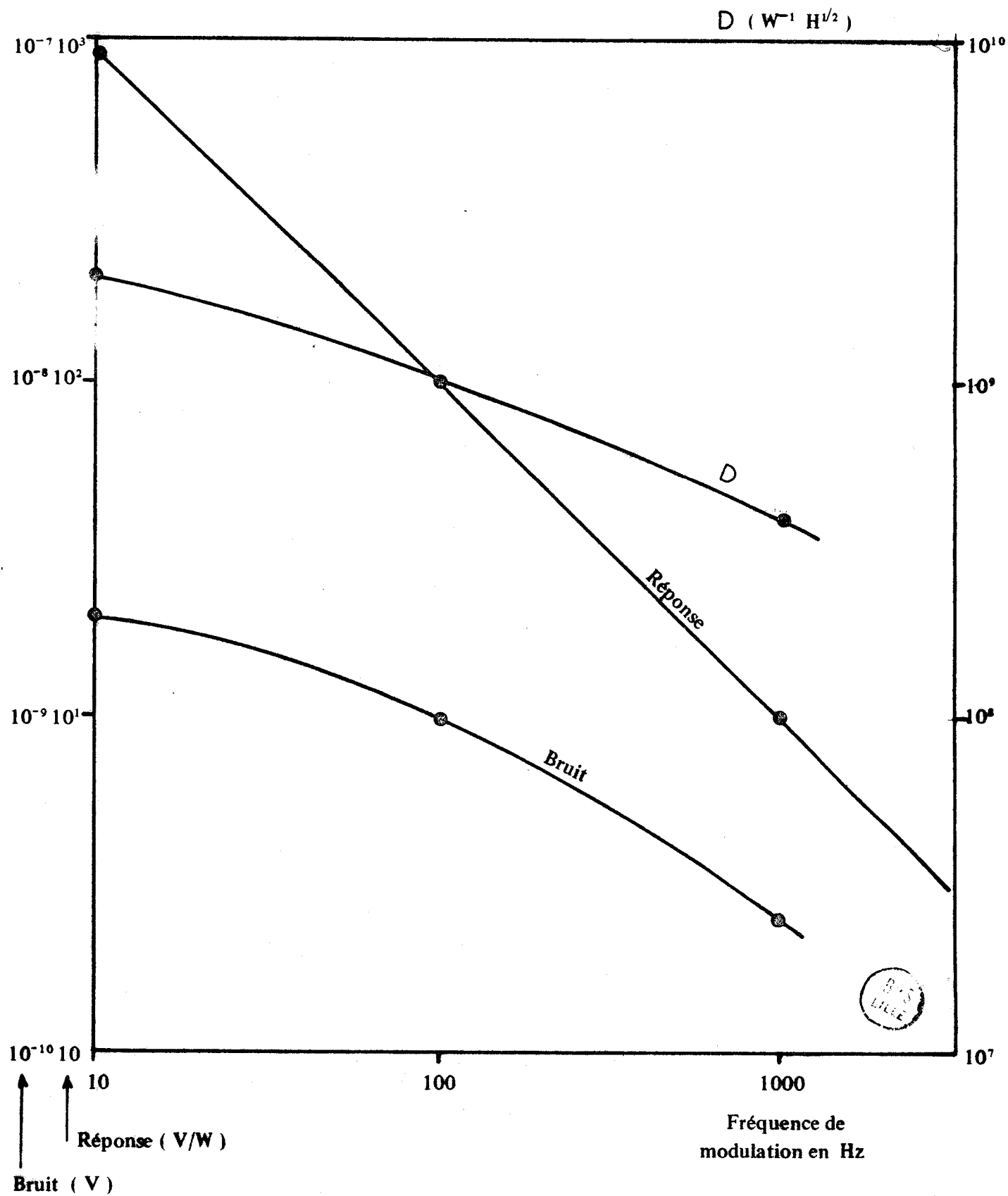
Pour notre problème, la variation de température des phénomènes à étudier étant relativement lente (de l'ordre de 10 à 30 secondes), nous ne sommes pas obligés de travailler avec des vitesses de modulation rapides.

Par ailleurs, les types de détection généralement adoptés pour sortir le signal du bruit dans la chaîne d'amplification éliminent les harmoniques pairs du signal. Nous avons donc intérêt à moduler notre faisceau à une fréquence sous harmoniques pairs du secteur (25-12,5-8,33-6,25 Hz etc). Par contre, nous sommes limités en fréquences basses par les systèmes d'amplification qui présentent un bruit ramené à l'entrée en $1/F$. Nous nous sommes donc fixé pour un compromis à 8,33 Hz. Il reste une dernière caractéristique de ce détecteur à examiner: c'est sa courbe de réponse relative en fonction de sa température d'emploi, comme le montre la figure III-10. Elle est pratiquement constante et maximum pour des températures variant de 10 à 30° C et chute brutalement à partir de 40° C. Cette caractéristique est très importante car elle nous oblige à éliminer tout élément chauffant de la proximité immédiate du détecteur. Ce sera le cas notamment du moteur qui entraîne le modulateur.

III-2 - CHOIX DU FILTRE (12)

Pour cela, nous allons porter sur un même graphique d'une part la précision instrumentale de la mesure, d'autre part l'erreur de transmission en fonction d'un intervalle spectral centré sur 10 μ .

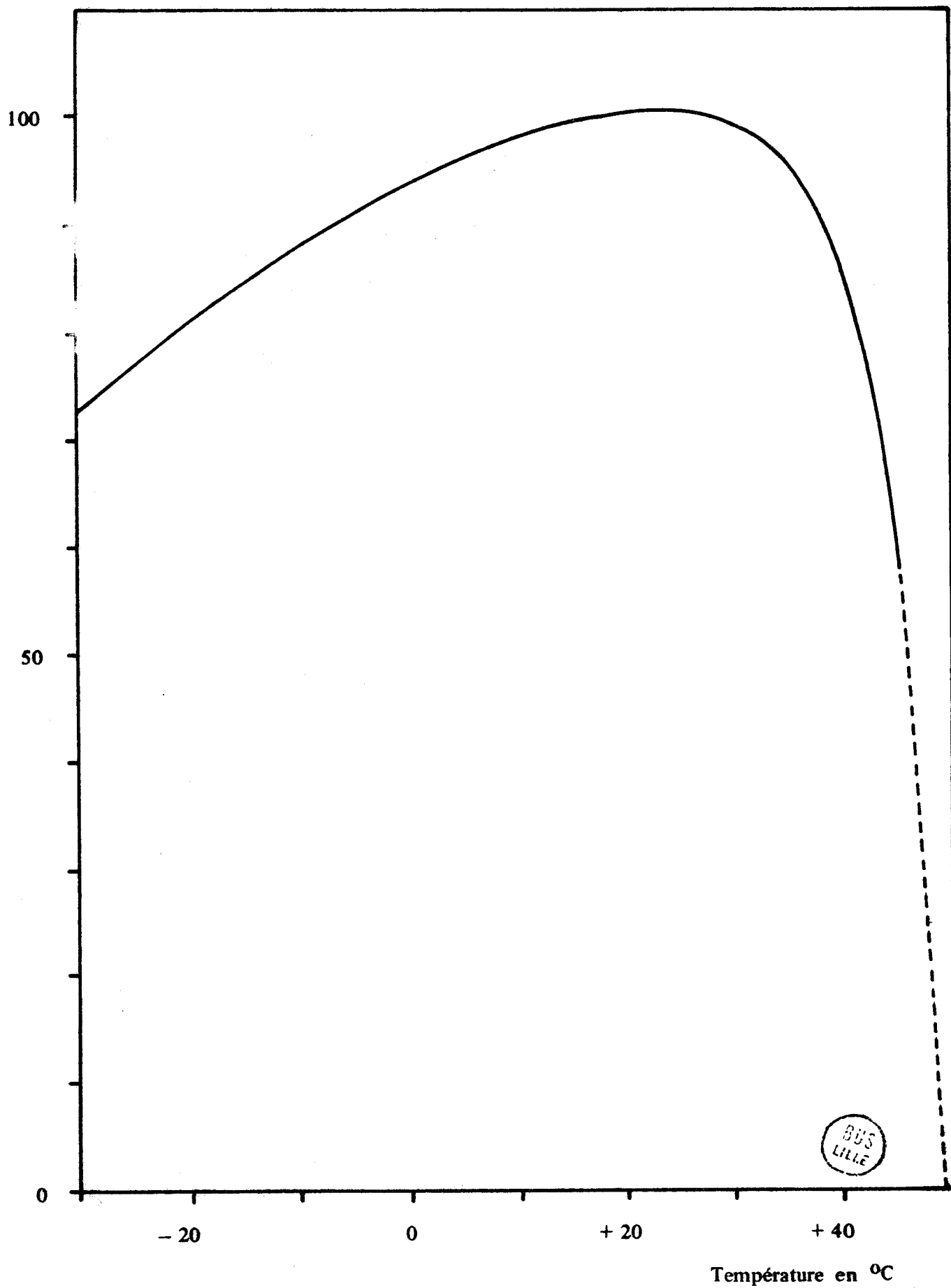
Pour la précision de la mesure, nous allons prendre les éléments suivants: un détecteur de D^x de $5 \cdot 10^8$ de surface 4 mm^2 et un angle de collecte de $2 \times 10^\circ$ ($NEP=4.5 \cdot 10^{-10}$). Il faut tenir compte aussi de l'ensemble du



Caractéristiques du détecteur utilisé $S = 2 \times 2$ mm

FIGURE III 9

Réponse du détecteur (en %)



Réponse du détecteur en fonction de la température.

FIGURE III 10

taux de transmission de l'optique de l'appareil qui est en moyenne, pour le cas présent, de 20 % sur l'ensemble de l'intervalle spectral étudié.

les tables du corps noir donnent les énergies B_λ exprimées en $10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ pour un intervalle de longueur d'onde de $1 \mu\text{m}$

λ	7	8	9	10	11	12	13
T = 300°K	7,53	9,107	9,85	9,94	9,59	9,98	8,24
T = 280°K	4,61	5,93	6,72	7,04	7	6,72	6,29

On peut donc calculer la différence d'énergie W correspondant à une différence de température de 1°C , pour un intervalle spectral donné IS.

ΔW doit être pondérée par la transmission τ_λ de l'optique utilisée. Nous verrons plus loin qu'il faut compter sur un τ moyen de 20 %. En tenant compte des caractéristiques du détecteur utilisé :

$$D^* = 5 \cdot 10^8$$

$$S = 4 \text{ mm}^2$$

On peut calculer pour un intervalle spectral donné IS un $\text{NET} = \frac{1}{D \cdot W}$ où W est l'énergie reçue par le détecteur visant la source, sous un angle de 2×10^{-2} ($9,5 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$) et D la détectivité du détecteur utilisé, pour une bande passante de 1 Hz.

On trouve pour :

IS₁ tel que $9,5 < \lambda < 10,5$ soit $\Delta\lambda = 1 \mu\text{m}$ NET = 0,045° C

IS₂ $8,5 < \lambda < 11,5$ $\Delta\lambda = 3 \mu\text{m}$ NET = 0,013° C

IS₂ $7,5 < \lambda < 12,5$ $\Delta\lambda = 5 \mu\text{m}$ NET = 0,009° C

IS₃ $6,5 < \lambda < 13,5$ $\Delta\lambda = 7 \mu\text{m}$ NET = 0,006° C

Ces valeurs sont reportées figure III-11.

Nous allons maintenant évaluer et reporter sur cette même figure III-11 l'erreur due à la transmission pour les mêmes intervalles spectraux.

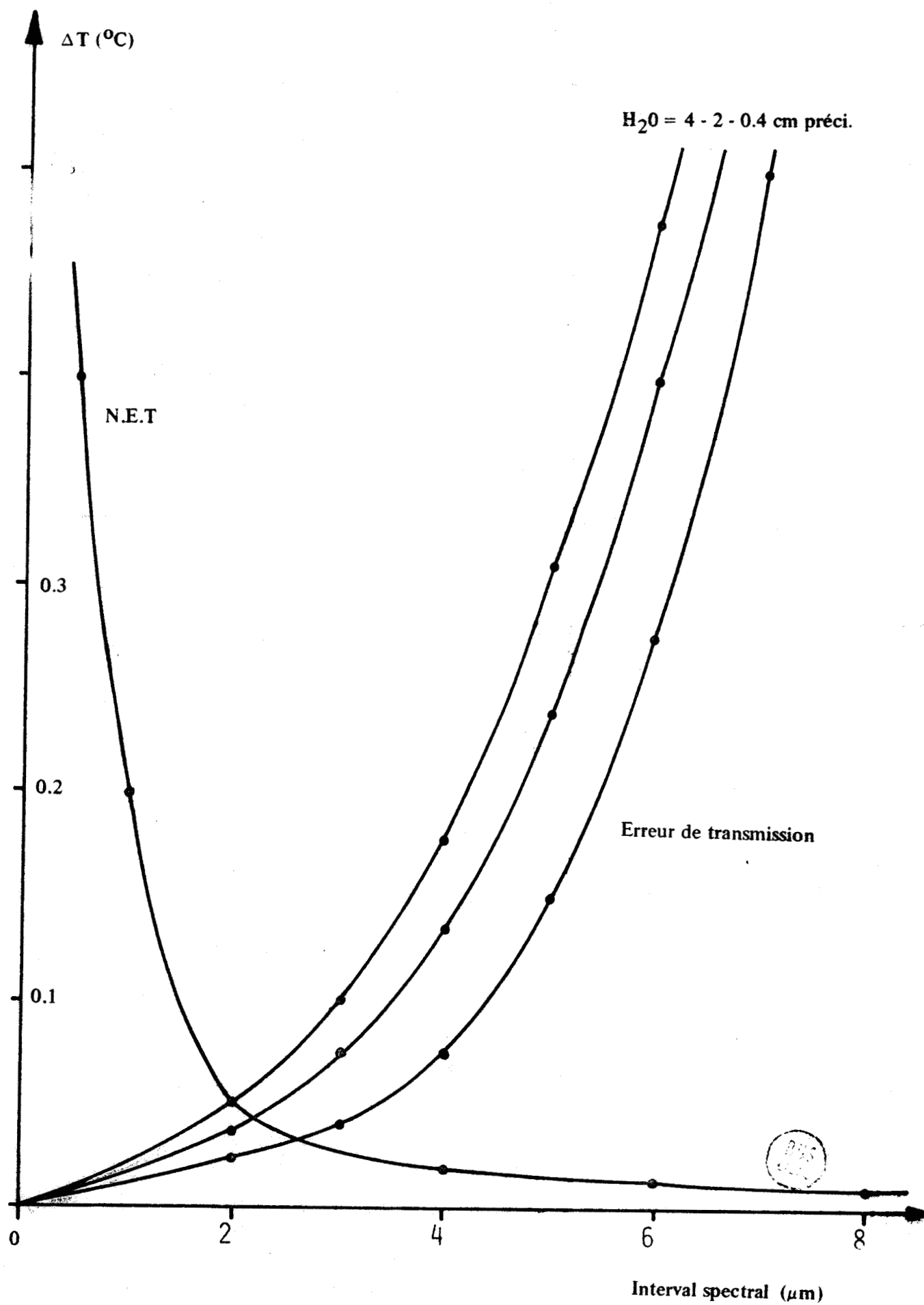


FIGURE III 11

Erreur de transmission (300 m)

Le calcul sera fait pour 300 mètres d'altitude et en évaluant l'absorption de la façon suivante.

gaz carbonique

Nous avons pris les caractéristiques suivantes :

- Concentration $3 \cdot 10^{-4}$
- Echelle de hauteur 8 km
- Pression au sol 1 atmosphère

dans ce cas l'épaisseur réduite est

$$\omega(o, z, u) = C P \Theta H (1 - e^{-\frac{z}{H}})$$

Soit en atm cm si z est en km

$$\omega \text{ CO}_2 = 30z$$

Les tables de WYATT et PLASS (réf. 12) donnent l'absorption pour le gaz carbonique en fonction de ω et de λ .

Vapeur d'eau

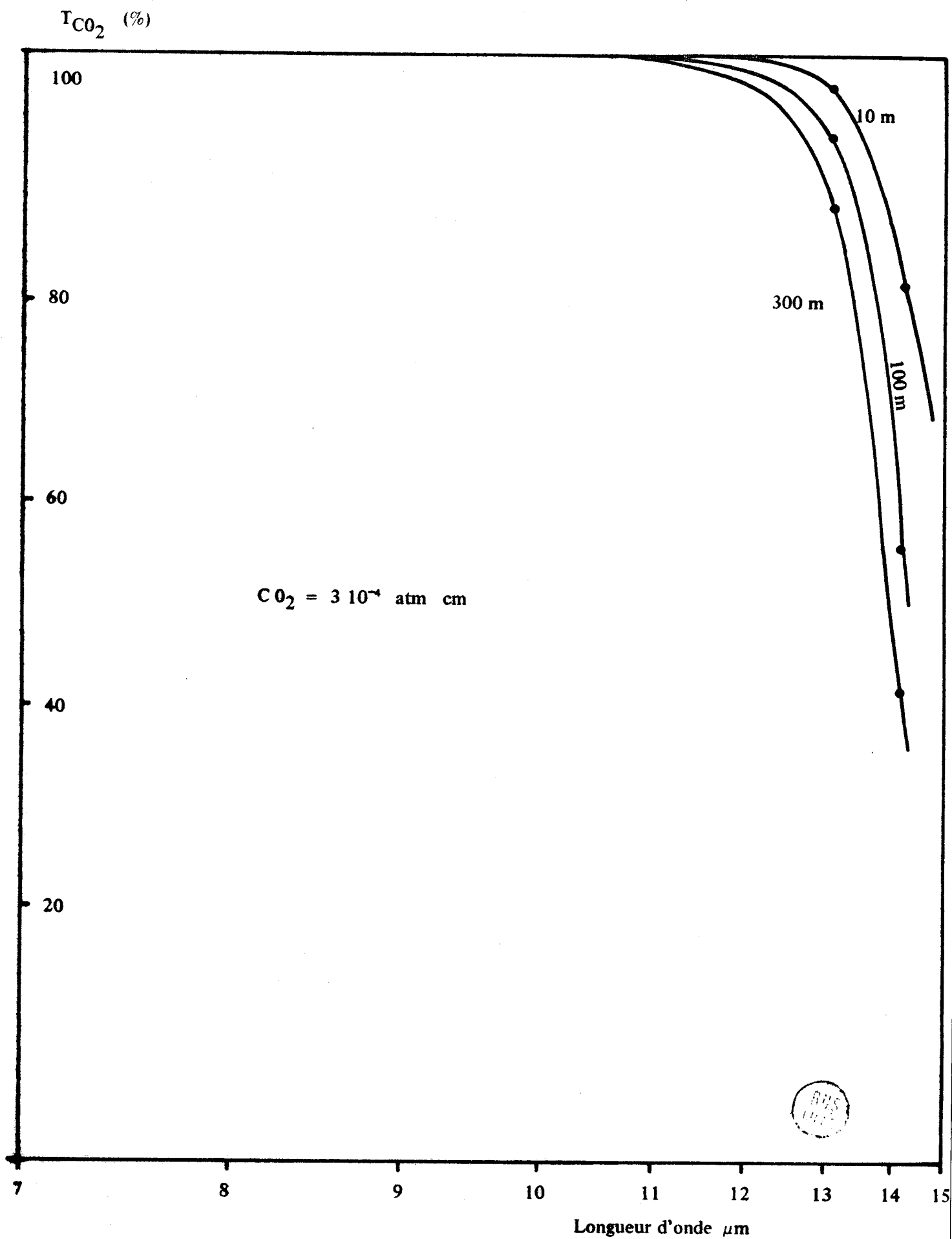
Nous avons fait (12) le calcul pour 3 concentrations types (4-2-0,4 cm précipitables) correspondant respectivement à la concentration minimum en période sèche, à la concentration moyenne et à la concentration maximum en période humide sur le 45e parallèle Nord.

Les figures III-12, 13, 14, 15 donnent les courbes de transmission ainsi calculées aux altitudes 10, 100 et 300 mètres.

Ce sont les coefficients de MOSKALENKO (réf. 12) qui ont été introduits dans le calcul.

Pour calculer l'erreur de transmission nous rappellerons (4) que le rayonnement réellement reçu par le radiomètre est

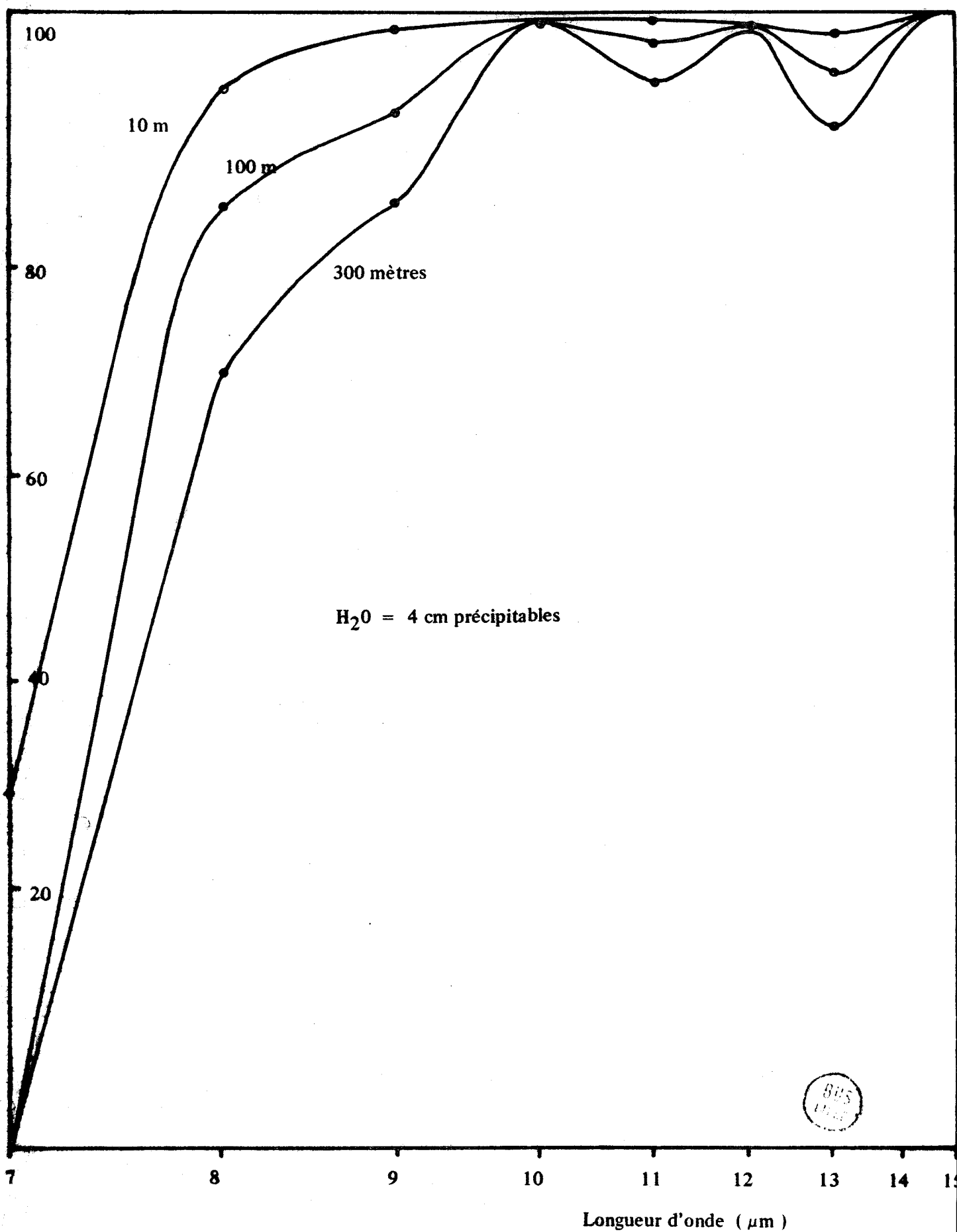
$$I_{\lambda}^R(T) = \tau_{\lambda o}(z) (I_{\lambda}(T)) - \int_0^z I_{\lambda}(T_o(\xi)) \frac{d\tau_{\lambda o}(\xi)}{d\xi} d\xi$$



Transmission du gaz carbonique

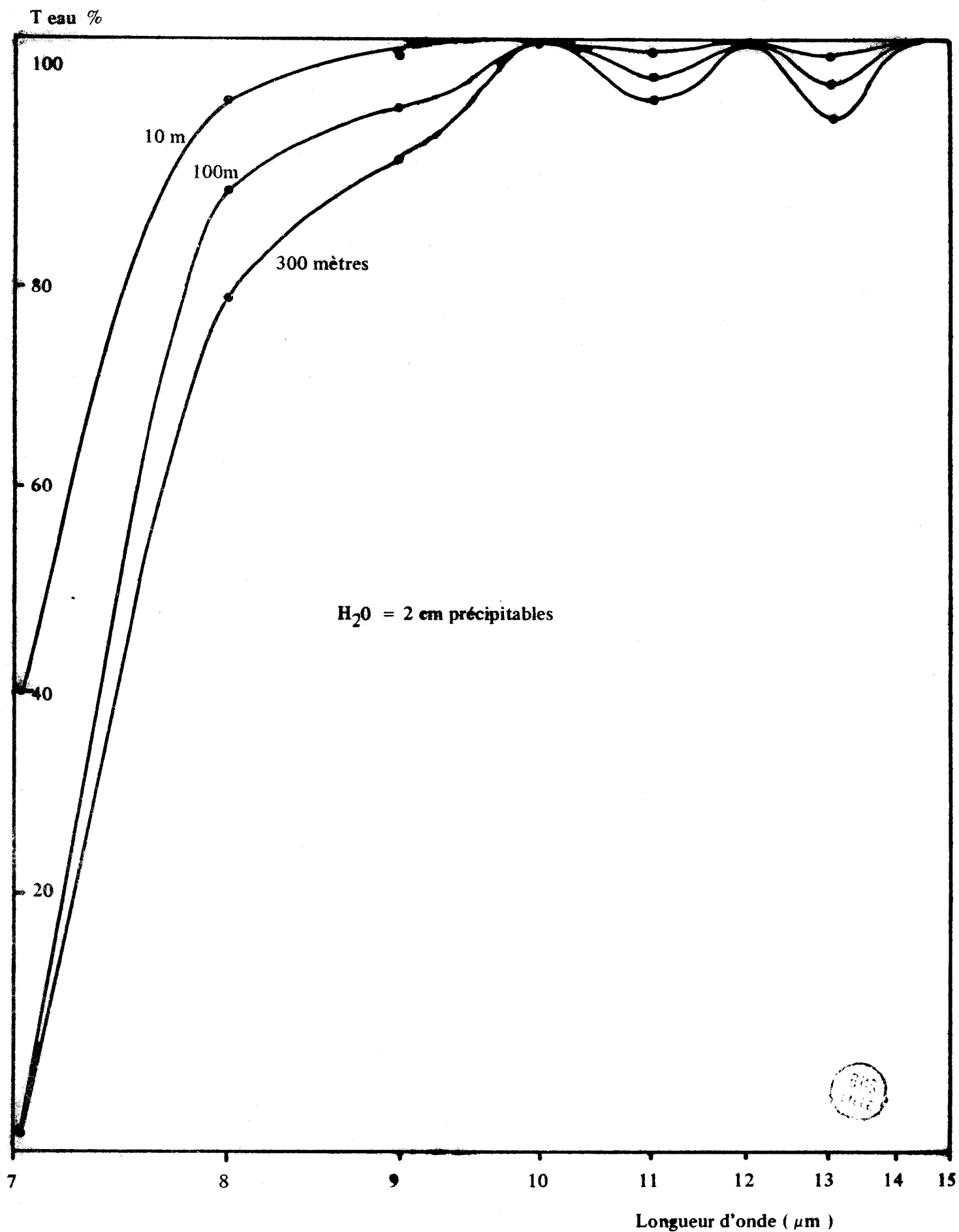
FIGURE III 12

T eau %



Transmission de la vapeur d'eau

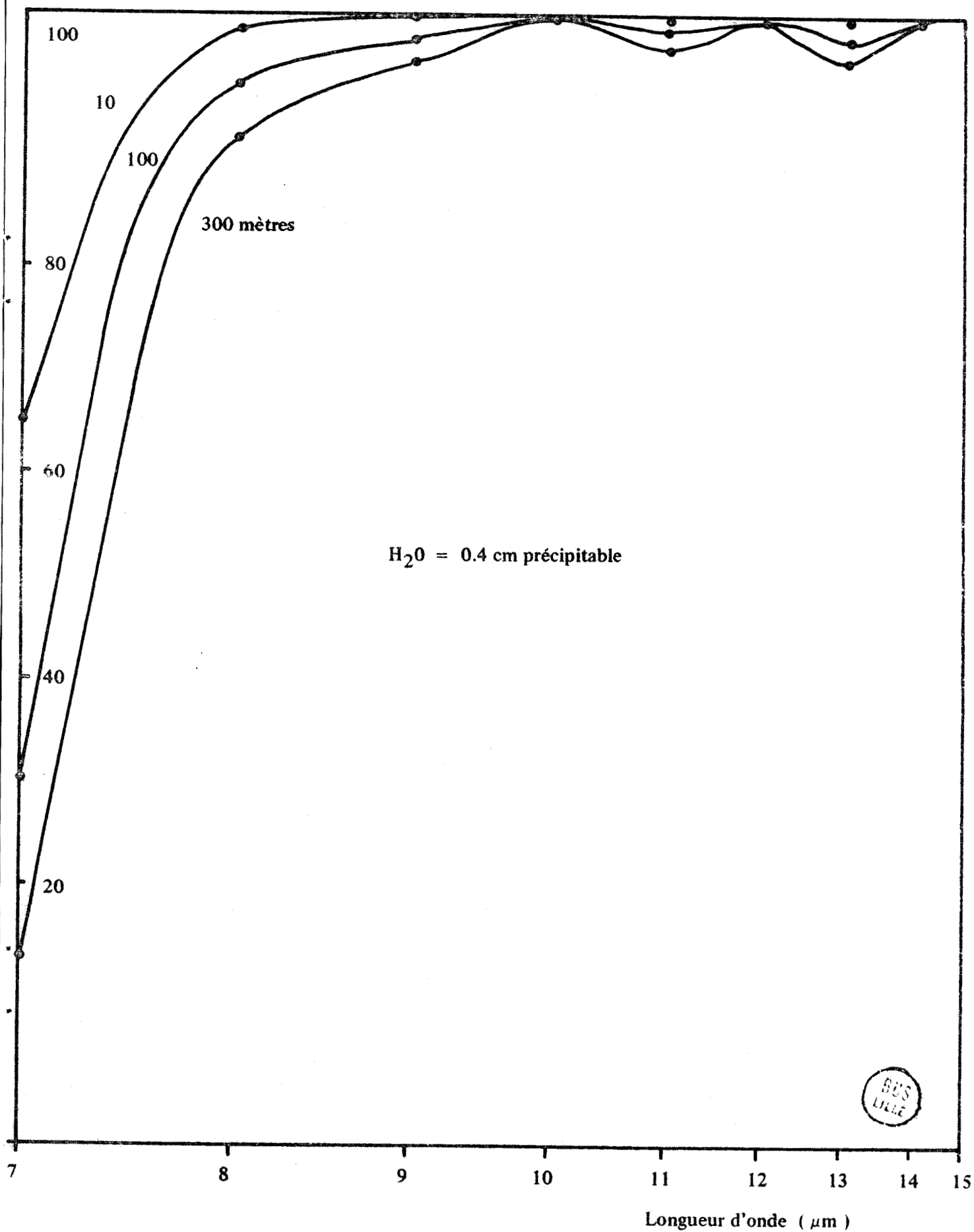
FIGURE III 13



Transmission de la vapeur d'eau

FIGURE III 14

T eau (%)



Transmission de la vapeur d'eau

FIGURE III 15

où $I_{\lambda}^R(T)$ est la luminance monochromatique effectivement reçue par le radiomètre.

$\tau_{\lambda a}(z)$ la transmission due aux absorbants sur le trajet z , entre la source et le radiomètre.

$I_{\lambda}(T)$ la luminance monochromatique d'un corps noir, à la température T de la source, donnée par la formule de PLANCK.

$T_a(\xi)$ la température de l'absorbant à l'altitude (ξ) .

On peut en déduire une erreur due à la transmission

$$\Delta T_{\text{trans}}(z) = - \int_0^z (T_a(\xi) - T) \frac{d\tau^x(\xi)}{d\xi} d\xi$$

avec

$$\tau^x(\xi) = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} \frac{d I_{\lambda}(T)}{dT} \tau_{\lambda a}(\xi) d\lambda}{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} \frac{d I_{\lambda}(T)}{dT} d\lambda}$$

où τ_{λ} est la transmission du filtre utilisé.

Le calcul de ΔT_{trans} a été effectué pour les mêmes intervalles spectraux que ceux utilisés pour la précision de la mesure et reporté sur la figure III-11.

Pour ce calcul, on a pris un profil de température standard de 6° par km. Comme on peut le voir, l'erreur de transmission et la précision propre de l'appareil varient en sens inverse.

Dans la solution adoptée, nous avons cherché à avoir une grande précision de l'appareil ($\pm 0,01^{\circ}$ C) pour les mesures faites au sol (BOUEE-BAIEAU) et à déterminer l'erreur de transmission lors des expériences en avion par des mesures annexes qui sont en cours d'étude au laboratoire.

Nous avons donc besoin d'un intervalle spectral voisin de $4 \mu\text{m}$ autour de $10 \mu\text{m}$.

Nous reproduisons figure III-16 la courbe de transmission du filtre utilisé, ainsi que le produit $\tau_{\text{eau}} \times \tau_{\text{CO}_2}$ à 300 mètres pour une concentration moyenne de l'eau de 2 cm précipitable, et une concentration type de CO_2 de $3 \cdot 10^{-4}$ atm/cm.

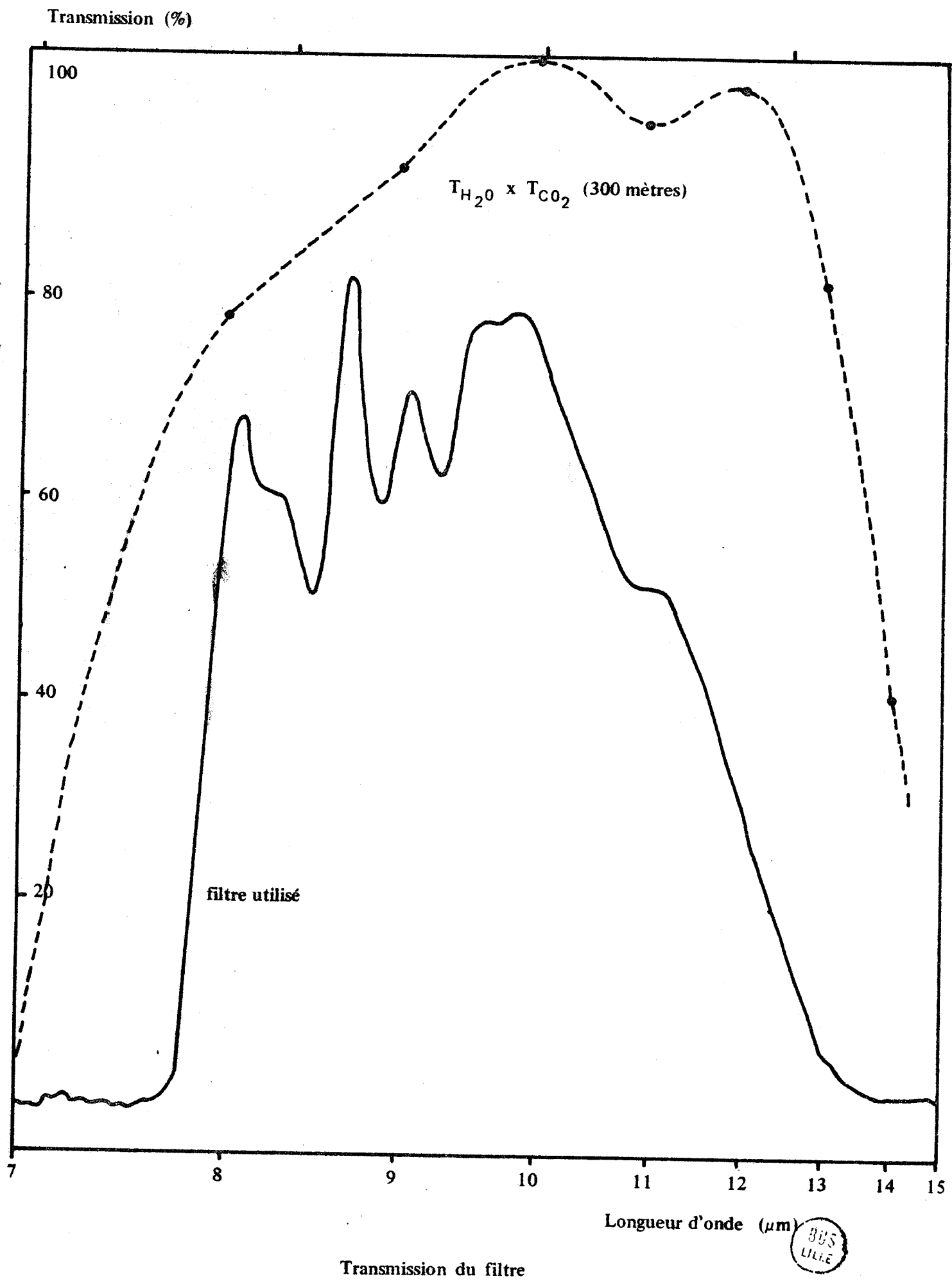


FIGURE III 16

III-3 - LE POLARISEUR

Le polariseur utilisé est du type à grille métallique. Il est constitué d'un substrat en bromure d'argent sur lequel de l'or est vaporisé sous vide, de manière à former une grille de fines bandes métalliques parallèles (2880 par millimètre) qui permettent d'obtenir un excellent taux de transmission et de polarisation sur un spectre de 2,5 à 35 μ .

Les caractéristiques de ce polariseur sont montrées (fig. III-17-11).

Comme on le voit, le facteur de transmission est voisin de 75 % pour la composante transmise et le taux de polarisation dans la gamme 8-15 μ est de l'ordre de 0,2 %.

Il est à remarquer que l'énergie reçue par le détecteur dans ce cas est la moitié de l'énergie arrivant sur le polariseur. Il faudra donc compter pour le polariseur sur un taux effectif de transmission de 37,5 %.

Par ailleurs, la fragilité d'un tel dispositif est très grande et le constructeur recommande de ne pas le toucher, de ne pas le mouiller, de ne pas souffler dessus. C'est pourquoi il est nécessaire lors de son emploi de lui trouver un endroit protégé du vent, de la pluie ou des embruns.

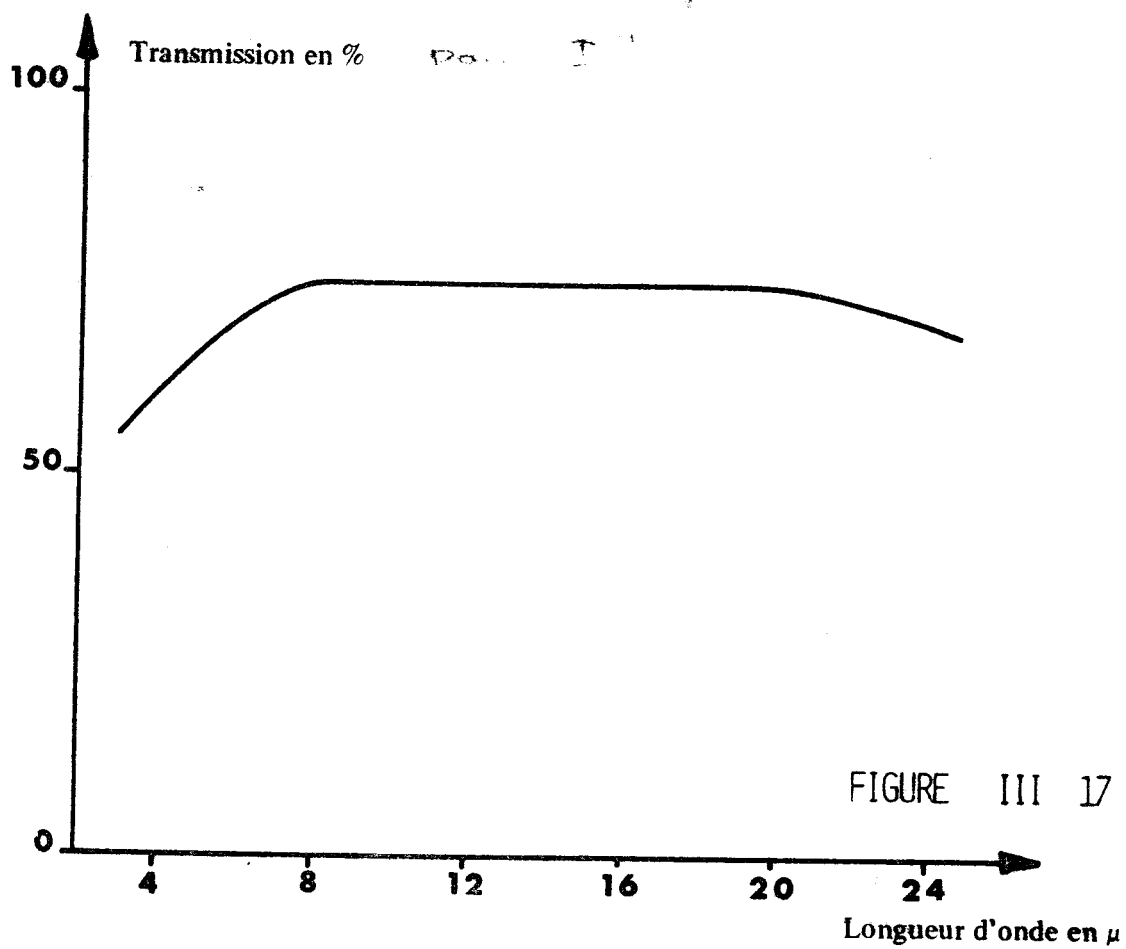
III-4 - CHOIX D'UNE OPTIQUE

Nous avons vu au chapitre consacré au détecteur qu'il était nécessaire que le détecteur vise la source sous un angle solide Ω le plus grand possible, mais nous verrons un peu plus loin qu'il est gênant de dépasser $\Omega = 10^{-1}$ sr, soit $\theta = 10^\circ$.

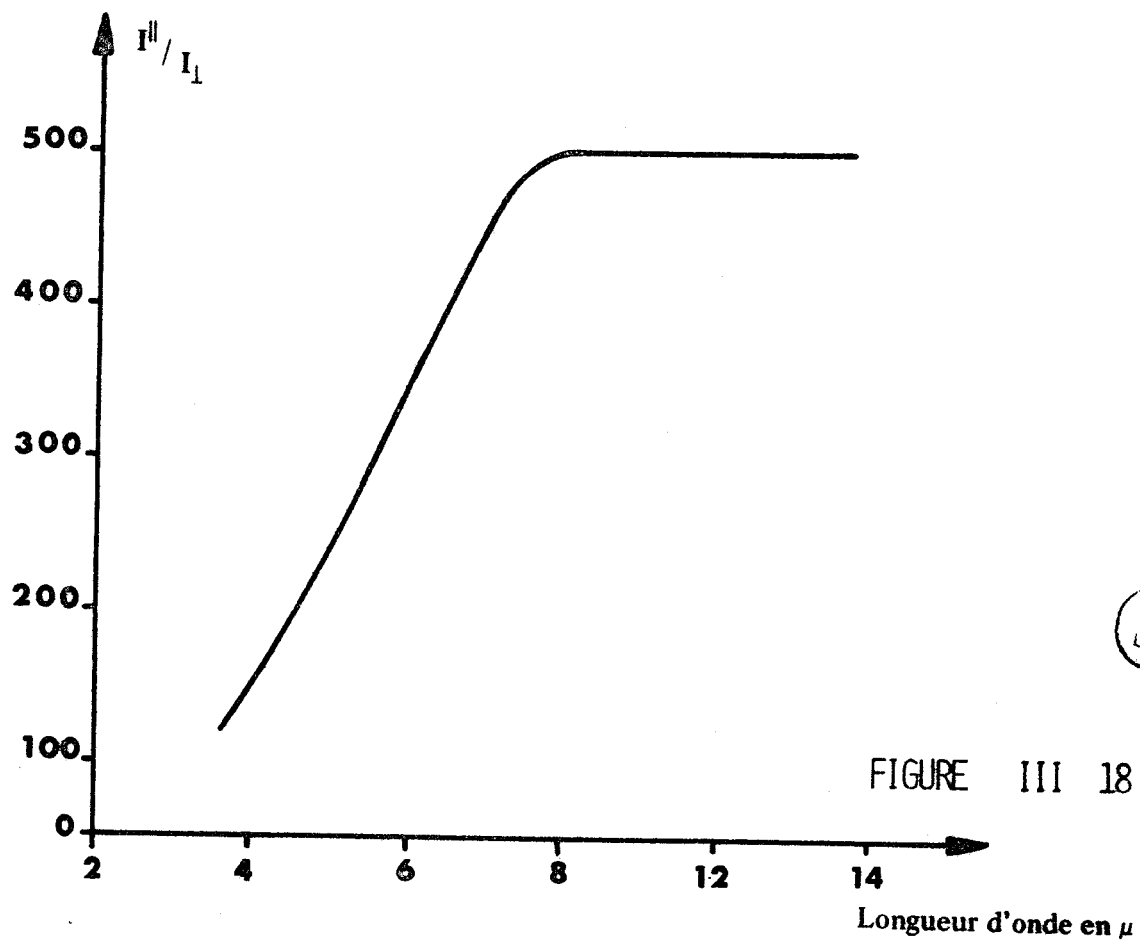
A l'étude sur plan, compte tenu de l'encombrement maximum que l'on s'imposait pour les différents éléments, nous nous sommes rendu compte que cet angle était trop grand pour 2 raisons (fig. III-19) :

- A 300 mètres d'altitude, la surface visée est un carré (le détecteur est de forme carrée) de 110 mètres de côté. Pour beaucoup d'applications ; cartes thermiques de baies, tracking de nappes de polluants, cette dimension est trop grande.

- Cet angle de visée ne permet pas de disposer à l'intérieur de l'appareil d'un corps noir de dimensions réduites.



Caractéristiques du polariseur



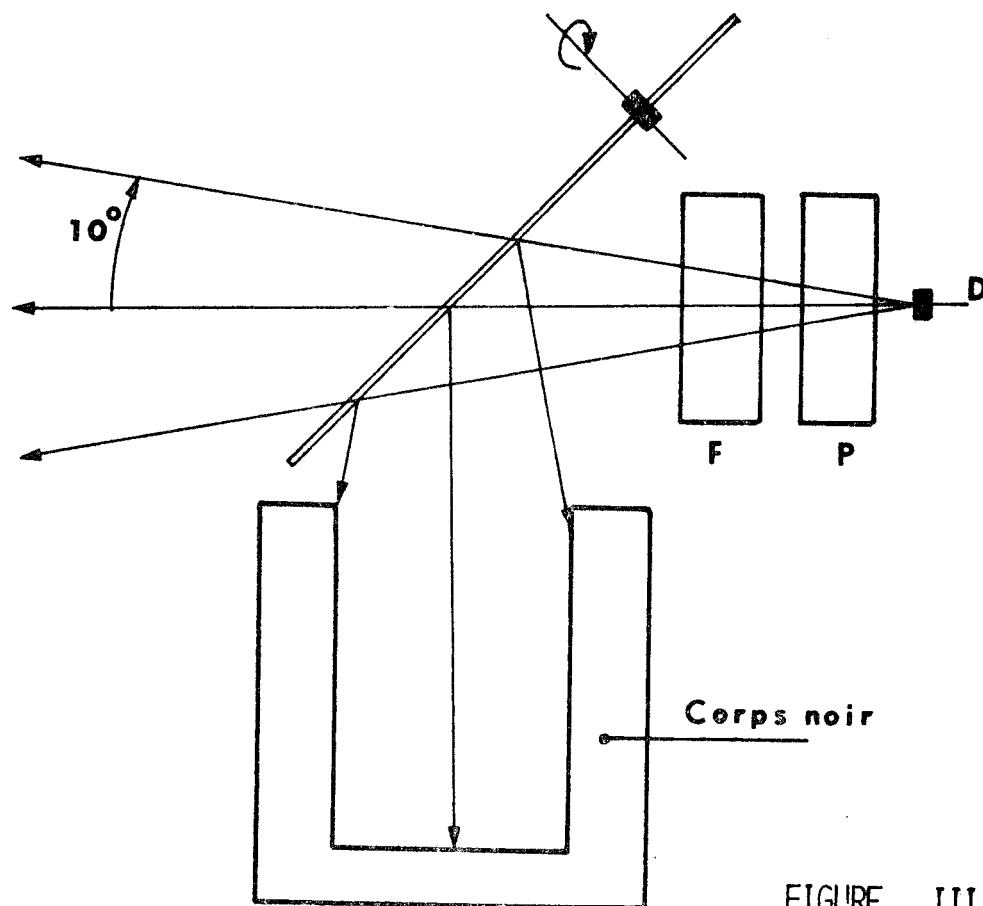


FIGURE III 19

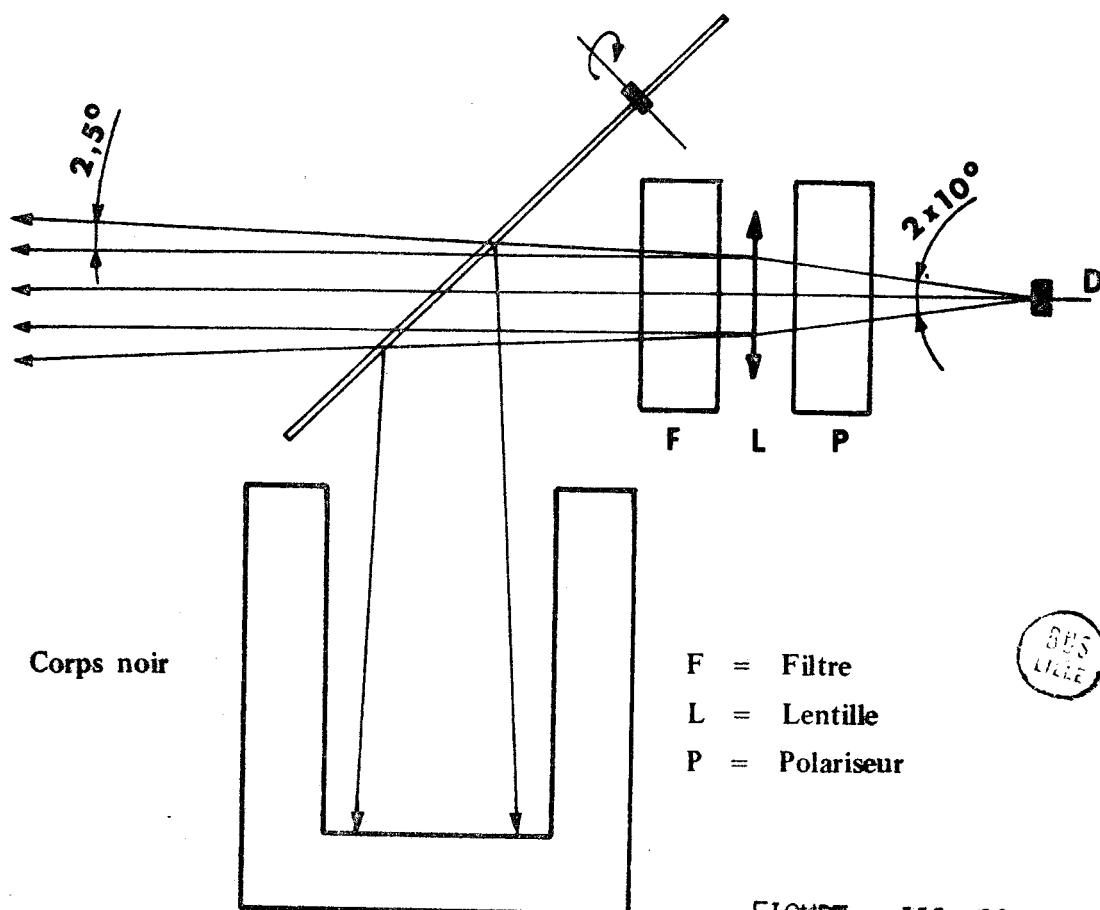


FIGURE IH 20



Il est donc apparu plus judicieux de focaliser le faisceau de manière à réduire l'angle de visée de l'appareil à $2 \times 2,5^\circ$ tout en gardant $2 \times 10^\circ$ d'angle de collecte pour le détecteur (fig. III-20). De cette manière, à 300 mètres, le côté du carré de la source visée sera de 13 mètres.

La focalisation s'effectue à l'aide d'une lentille dont nous pouvons calculer les caractéristiques à partir des conditions précédentes et des dimensions du détecteur (2x2 mm). La figure III-21 indique les éléments du calcul :

α est le demi angle de visée de l'appareil. Pour un détecteur de dimension d , la distance D (lentille-détecteur) est définie par :

$$\text{tg } \alpha = \frac{d}{2D}$$

Pour $\alpha = 2.5^\circ$ $D = 23 \text{ mm}$

Pour une lentille plan convexe, le rayon de courbure est déterminé par :

$$R = D(n-1)$$

n est l'indice de réfraction du matériau utilisé. Les lentilles que l'on trouve dans le commerce, dans le domaine infrarouge, sont généralement en KRS5 ou en germanium. Nous avons préféré le germanium car son taux de transmission autour de 10μ est pratiquement identique à celui du KRS5 ; mais par contre, sa tenue aux conditions atmosphériques est meilleure. Il est par ailleurs possible de faire subir aux deux faces de la lentille un traitement antireflet que l'on doit demander centré sur la fréquence désirée.

L'indice de réfraction du germanium dans la gamme 8-15 μ est de 4. Le rayon de courbure de la lentille sera donc de $R = 69 \text{ mm}$.

Pour définir les caractéristiques complètes de la lentille, il reste à déterminer son diamètre utile et son épaisseur. Le diamètre sera déterminé par la dimension à donner au diaphragme fixant l'angle Ω .

Cet angle est déterminé par un compromis. D'une part plus l'angle Ω est grand, plus l'énergie arrivant sur le détecteur est grande, meilleure

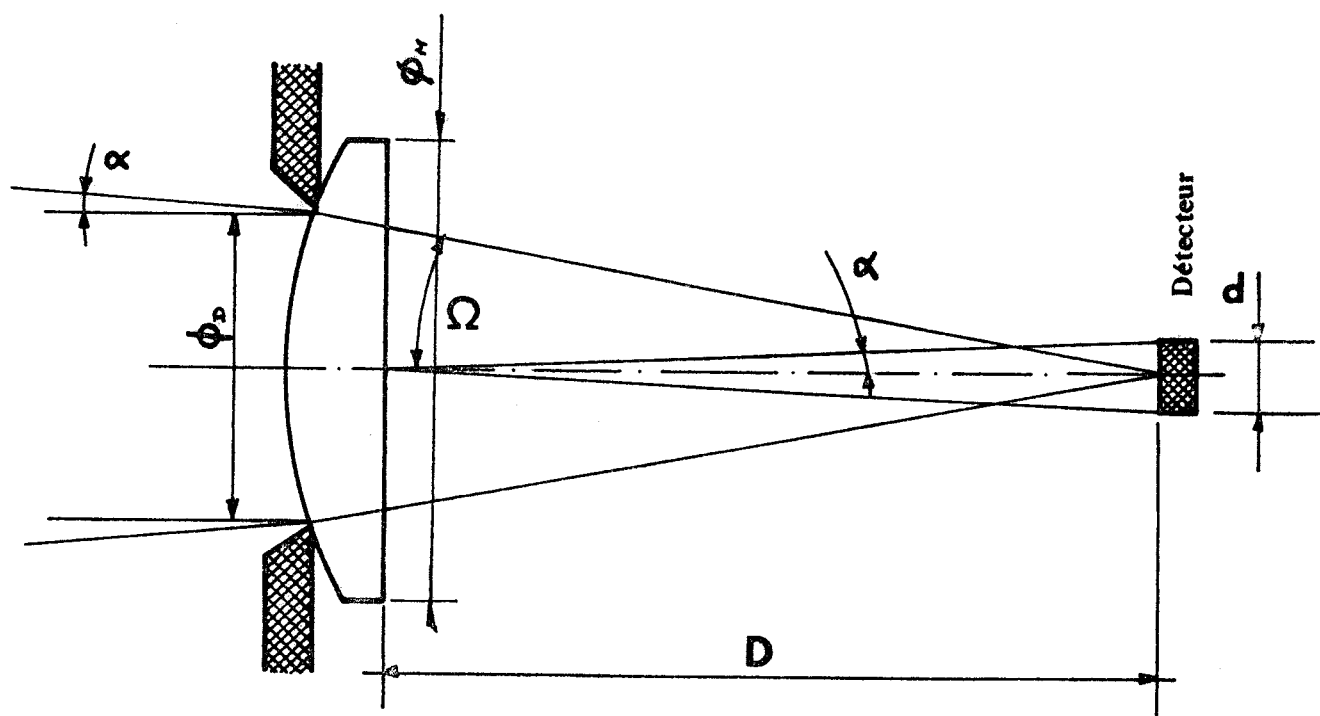


FIGURE III 21

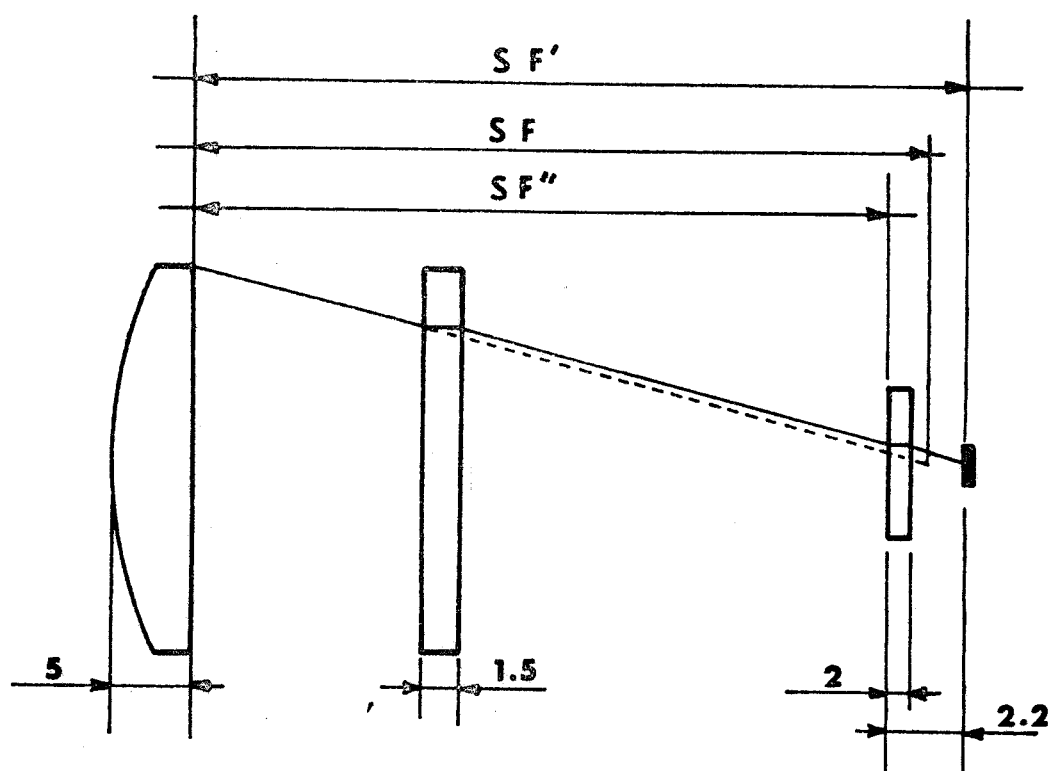


FIGURE III 22

sara la précision de l'appareil.

Par ailleurs, comme on l'a vu au chapitre du choix du polariseur, nous pouvons remarquer que l'emplacement idéal pour le polariseur est justement entre la lentille et le détecteur. De cette manière, comme le recommande le constructeur, il est protégé du vent et de l'humidité.

Cependant, pour ne pas perdre l'avantage du polariseur, il est nécessaire que les rayons du faisceau, n'arrivent pas sur le polariseur avec un angle d'incidence trop grand. Nous nous sommes donc limités à un angle Ω de 10° . Pour un angle $\Omega = 10^\circ$ on a :

$$\operatorname{tg} \Omega = \frac{D}{\phi/2}$$

soit $\phi_D = 8 \text{ mm}$.

Afin de permettre une fixation mécanique aisée de la lentille, ainsi qu'une bonne solidité, nous nous sommes fixés les caractéristiques suivantes :

$$\phi_M = 25 \text{ mm} \quad R = 69 \text{ mm} \quad e = 5 \text{ mm}$$

La figure III-23 indique, pour une telle lentille, la courbe de transmission spectrale, après traitement antireflet.

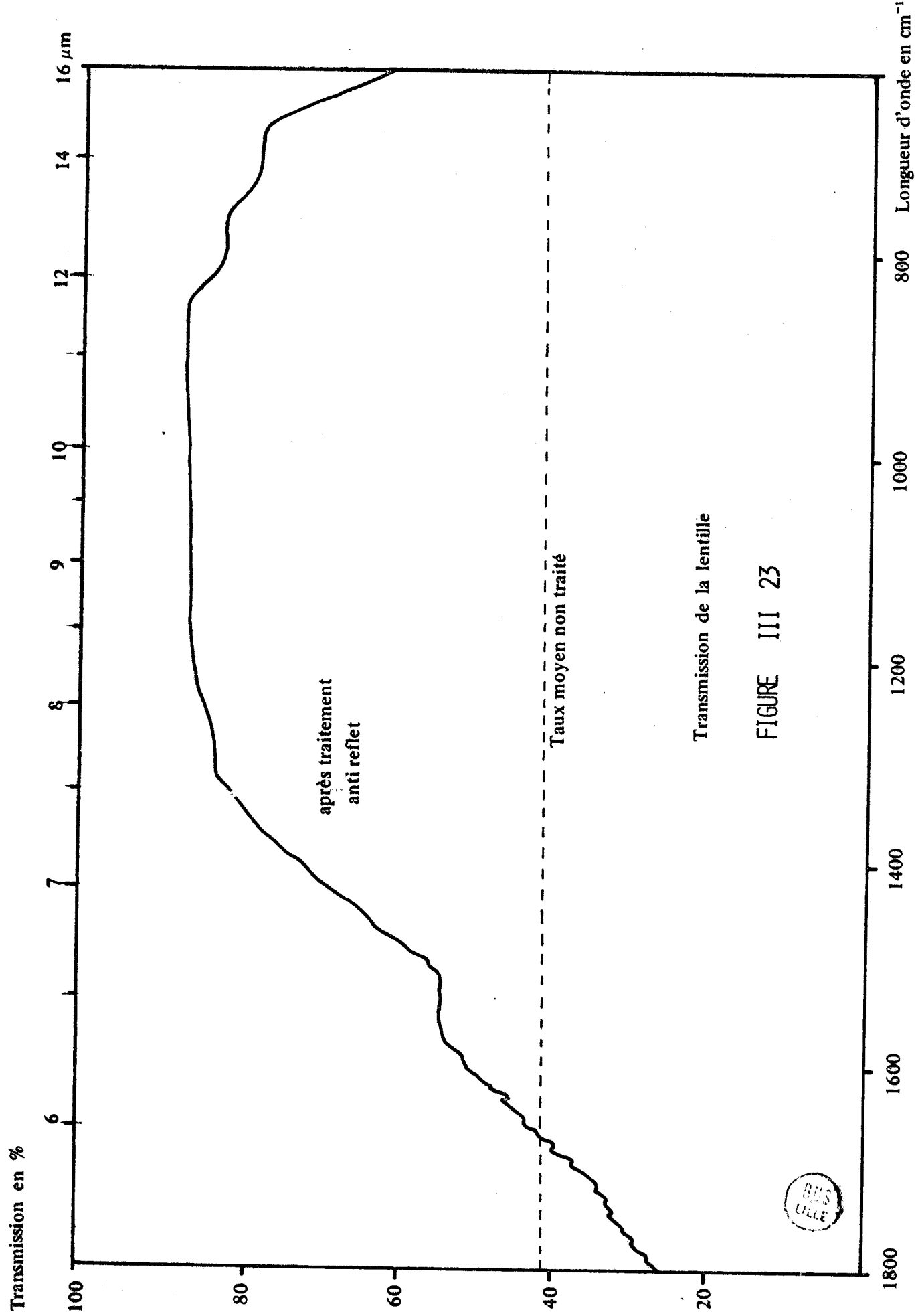
Il convient maintenant, sur un plan pratique, de déterminer exactement l'emplacement du détecteur dans son support. Pour cela il faut tenir compte de ce que :

- la surface sensible du détecteur est protégée par une fenêtre en KRS5 figure
- que la lentille doit être considérée dans le calcul comme une lentille épaisse
- que le polariseur est placé entre cette lentille et le détecteur.

La figure III-22 montre la disposition complète de tous ces éléments et nous permet de calculer exactement la distance SF'' entre la face plate de la lentille et la face extérieure de la fenêtre de protection du détecteur.

Pour la lentille d'épaisseur e , la distance SF de la face plane au foyer est déterminée par la formule :

$$SF = \frac{nR - (n-1)e}{(n-1)n}$$



Ce qui donne pour une lentille de germanium ($n=4$) de 69 mm de rayon de courbure et 5 mm d'épaisseur :

$$SF = 21.75 \text{ mm}$$

Il faut maintenant faire intervenir l'allongement de la distance focale dû à la présence du polariseur et de la fenêtre du détecteur.

un élément placé dans le faisceau provoque un allongement $\Delta f = (1 - \frac{1}{n})e$.

Ce qui donne pour la fenêtre :

$$n = 2.4 \quad e = 2 \quad \Delta f = 1.16$$

le polariseur :

$$n = 1.7 \quad e = 1.5 \quad \Delta f = 0.6$$

$$\text{d'où} \quad SF' = SF + e \Delta f = 23.51$$

Comme la surface sensible est à 2.2 mm de la face extérieure du détecteur,

$$SF'' = 21.31 \text{ mm}$$

III-5 - CHOIX DU MODULATEUR

L'énergie arrivant du corps noir de référence interne et atteignant le détecteur est modifiée par deux paramètres: l'émissivité du corps noir et le coefficient de réflexion du modulateur utilisé. Pour simplifier le calcul, nous étudierons séparément chacun de ces deux paramètres et aussi dans ce paragraphe, l'erreur apportée par le coefficient de réflexion du modulateur (R_{mod}).

Dans le cas où le radiomètre vise un corps noir d'étalonnage, on peut régler la température du corps noir d'étalonnage ($T_{CN \text{ ext}}$) et celle du corps noir interne de référence ($T_{CN \text{ INT}}$) de telle manière que le signal issu du détecteur soit nul ; on a alors entre ces deux températures un écart :

$$\Delta T = T_{CN \text{ EXT}} - T_{CN \text{ INT}}.$$

En appelant T_{amb} la température ambiante au voisinage du modulateur on a :

$$0 = \sigma T_{CN}^4 \text{EXT} - (T_{CN}^4 \text{INT} R_{\text{mod}} + (1-R_{\text{mod}}) \sigma T_{\text{amb}}^4)$$

$$\sigma T_{CN}^4 \text{EXT} = \sigma (T_{CN}^4 \text{EXT} + \Delta T)^4 R_{\text{mod}} + (1-R_{\text{mod}}) \sigma T_{\text{amb}}^4$$

$$T_{CN}^4 = R_{\text{mod}} T_{CN}^4 + 4 T_{CN}^3 \Delta T R_{\text{mod}} + (1-R_{\text{mod}}) \sigma T_{\text{amb}}^4$$

$$T_{CN}^4 - R_{\text{mod}} T_{CN}^4 - (1-R_{\text{mod}}) T_{\text{amb}}^4 = 4 T_{CN}^3 R_{\text{mod}} \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{(1-R_{\text{mod}}) (T_{CN}^4 - T_{\text{amb}}^4)}{4 T_{CN}^3 R_{\text{mod}}}$$

En prenant $\delta T = T_{CN} - T_{\text{amb}}$

$$\Delta T = \frac{(1-R_{\text{mod}}) (T_{CN}^4 - (T_{CN} + \delta T)^4)}{4 R_{\text{mod}} T_{CN}^3}$$

$$\Delta T = \frac{(T_{CN}^4 - T_{CN}^4 - 4 T_{CN}^3 \delta T) (1-R_{\text{mod}})}{4 T_{CN}^3 R_{\text{mod}}}$$

$$\Delta T = \frac{T(1-R_{\text{mod}})}{R_{\text{mod}}}$$

Pour fixer un ordre de grandeur des ΔT auxquels on peut s'attendre, nous avons effectué le calcul pour une température de corps noir $T_{CN} \text{INT} = 280^\circ \text{K}$ et une température ambiante $T_{\text{amb}} = 295^\circ \text{K}$. Il s'agit là d'une situation correspondant par exemple à des mesures effectuées en été, vers 12 H, par ciel clair.

Les résultats sont portés sur la figure III-24.

Le modulateur figure III-25 est composé de deux secteurs métalliques dont une face est dorée. Pour éviter les réflexions parasites, les bords des secteurs sont biseautés.

Le coefficient de réflexion d'un tel dispositif a été mesuré de la manière suivante :

A l'aide d'un radiomètre, on vise successivement une source froide, directement ou par réflexion sur la face dorée d'un modulateur, et on note la dif-

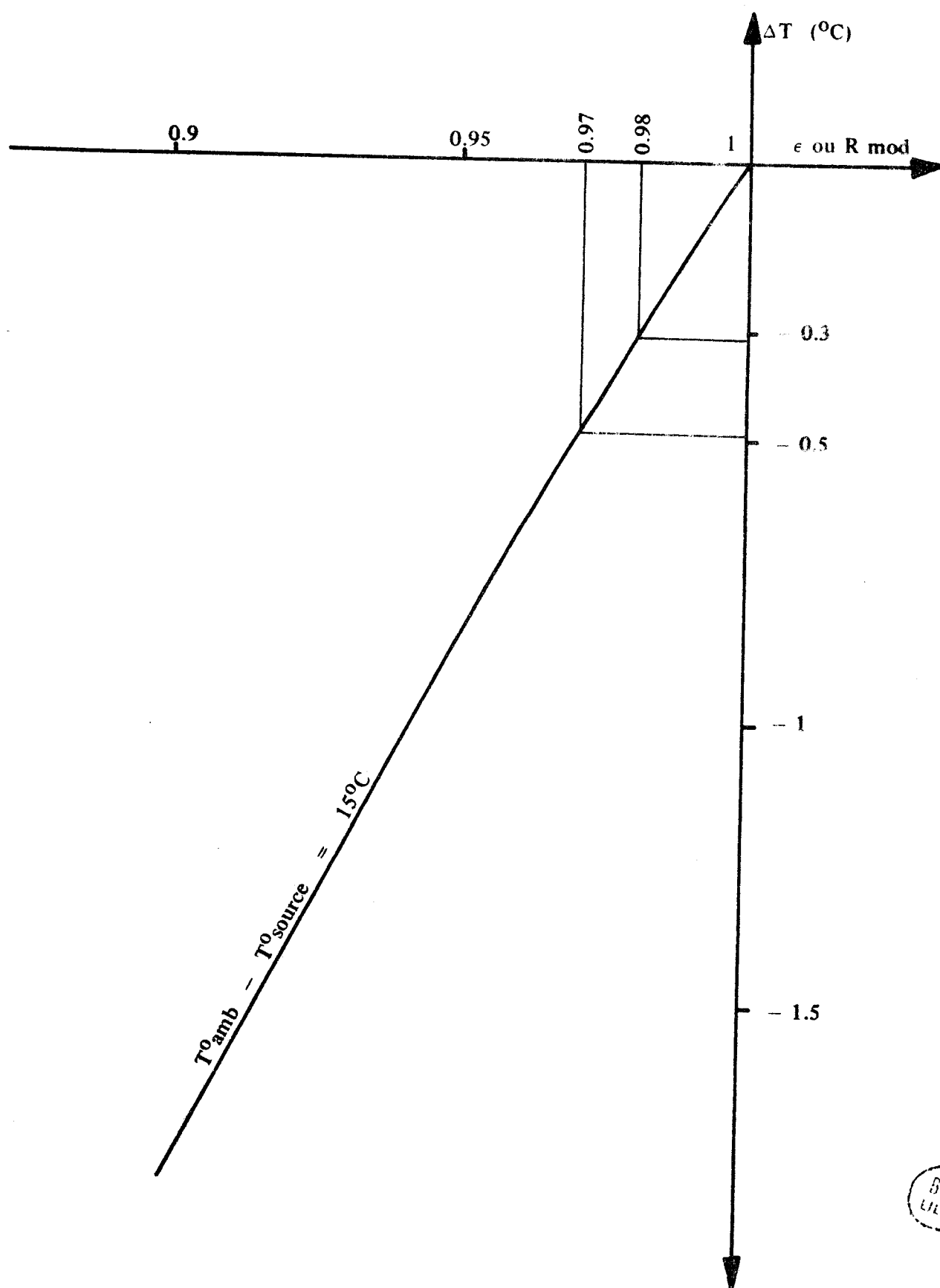


FIGURE III 24

Erreur due à l'émissivité du corps noir ou au coefficient de réflexion du modulateur.

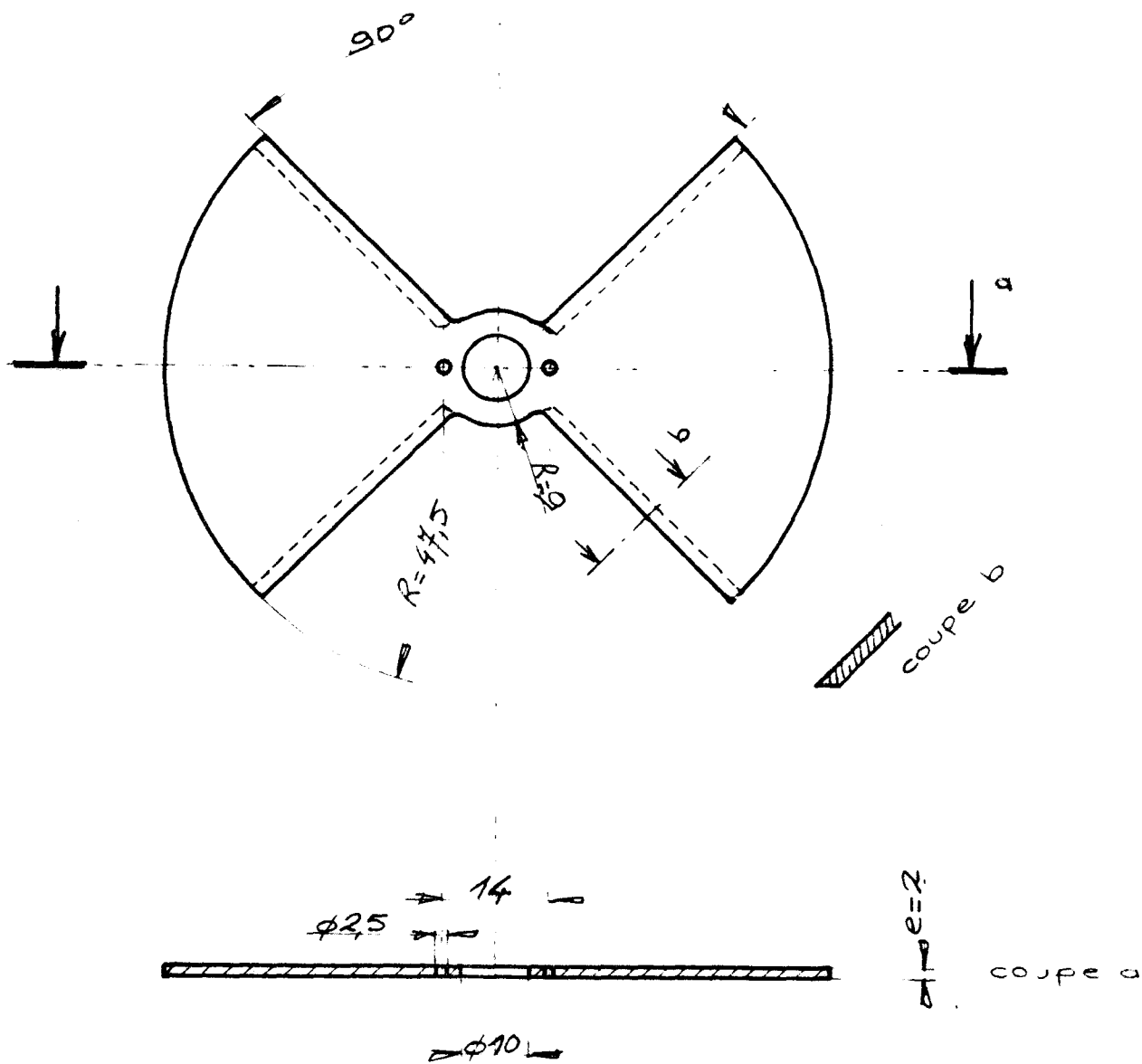


FIGURE III 25



Côtes non tolérancées ajustement j13 filetages ISO pas normal

MIROIR

ech 1

le: 20-9-71

mat: Inox.

laboratoire d'optique
atmosphérique

T1005.27

férence de température apparente ΔT en fonction de la différence de température entre la source et l'ambiante δT .

Pour un δT 15° C on trouve $\Delta T = 0,3$ ° C. Ce qui donne un coefficient de réflexion $R_{\text{mod}} = 0,98$. On voit donc apparaître ici une des nécessités de stabiliser la température ambiante au voisinage du modulateur.

III-6 - CHOIX DU CORPS NOIR ET DE SON SYSTEME DE STABILISATION (13)

Comme on l'a vu, c'est l'énergie issue du corps noir interne qui sert de référence. Un corps noir n'est jamais parfait et est caractérisé par son émissivité.

Pour une température donnée $T_{\text{CN INT}}$ l'énergie émise par un corps d'émissivité ϵ_{CN} est déterminée par la formule

$$W = \epsilon_{\text{CN}} \sigma T_{\text{CN INT}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{CN}}) \sigma T_{\text{amb}}^4 /$$

avec T_{amb} égale à la température ambiante au voisinage du corps noir.

Dans notre cas, si l'on suppose un modulateur parfait et que, comme précédemment, on règle les températures $T_{\text{CN EXT}}$ et $T_{\text{CN INT}}$ de telle sorte que le signal détecté soit nul, on a :

$$0 = \sigma T_{\text{CN EXT}}^4 - (\epsilon_{\text{CN}} \sigma T_{\text{CN INT}}^4 + (1 - \epsilon_{\text{CN}}) \sigma T_{\text{amb}}^4)$$

On retrouve le même formalisme que précédemment et on trouvera donc :

$$\Delta T = T_{\text{CN EXT}} - T_{\text{CN INT}} = \frac{\delta T (1 - \epsilon_{\text{CN}})}{\epsilon_{\text{CN}}}$$

ou
$$\delta T = T_{\text{CN}} - T_{\text{amb}}$$

Il est donc très important que le corps noir interne ait une émissivité la plus voisine possible de 1.

L'expérience acquise au laboratoire nous a fait préférer un corps noir de forme cylindrique (fig. III-27). Quel que soit le mode de fonctionnement choisi, il sera nécessaire de refroidir le corps noir, de manière à l'amener à une température voisine de celle de la source. En effet dans la plupart

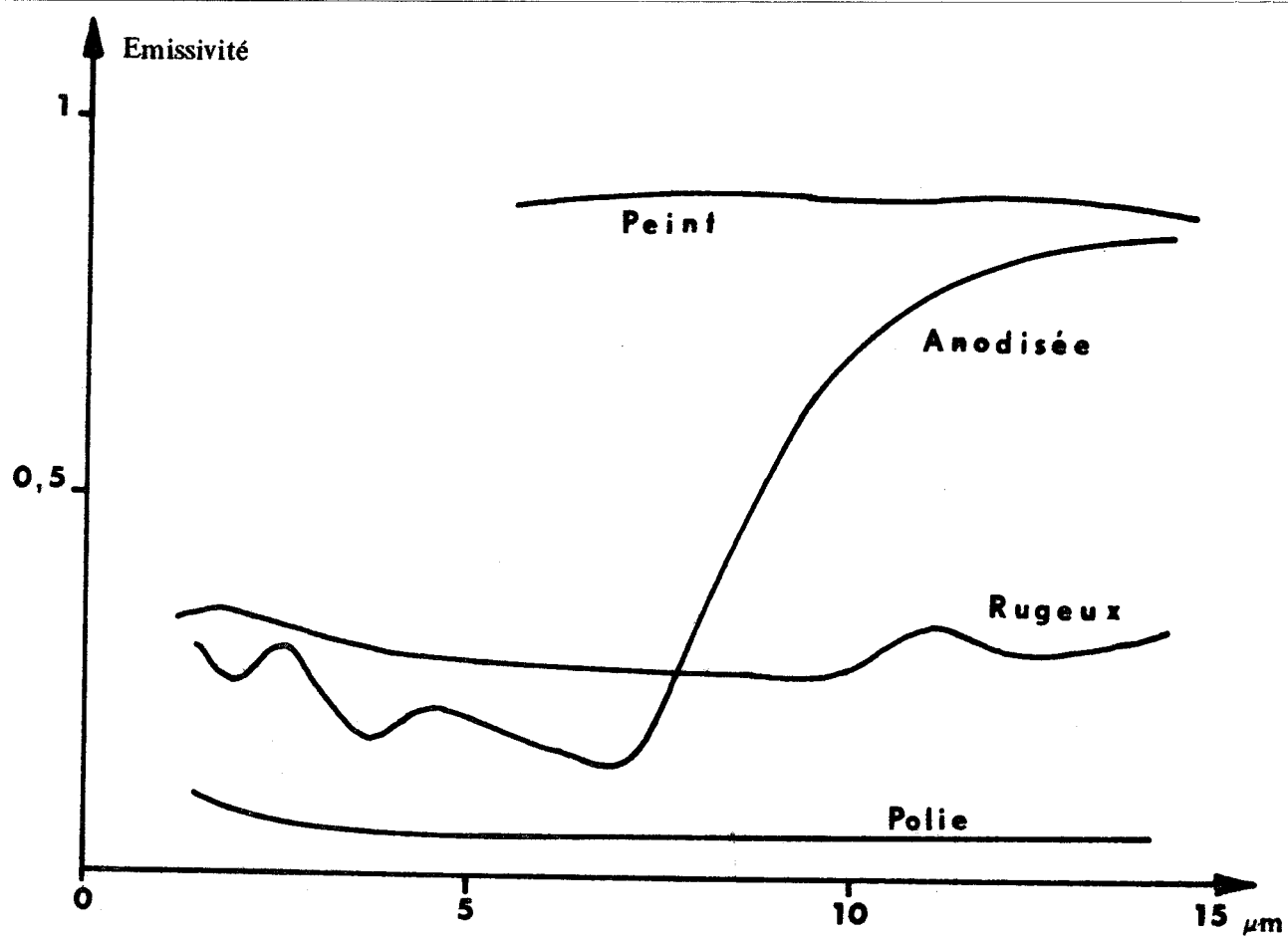


FIGURE III 26 Emissivité de l'aluminium

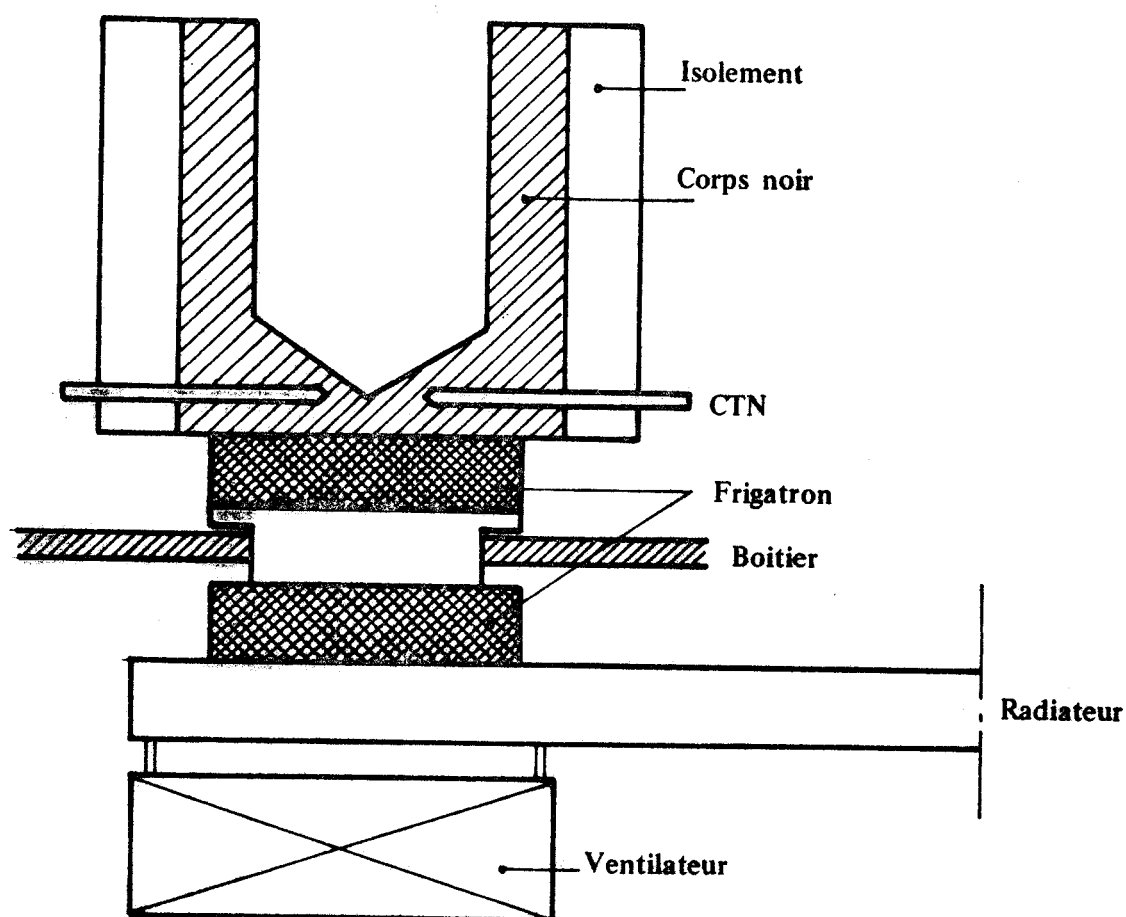


FIGURE III 27 Corps noir - détails de construction

des cas, la température de l'océan est inférieure à la température de l'air. Parmi les solutions possibles nous avons retenu celle qui utilise des batteries à effet PELTIER dont l'effet réversible permet facilement de conduire la température du corps noir à la valeur désirée et à l'y maintenir avec une grande précision.

Les dispositifs à refroidissement thermoélectrique dépendent, dans une large mesure, de l'effet PELTIER que l'on obtient à partir de matériaux récemment développés (notamment les bismuths de Tellurides (14)).

L'effet PELTIER est une absorption ou une génération de chaleur à la jonction de métaux différents ou de semi-conducteurs, quand un courant direct traverse la jonction. L'effet est réversible et de ce fait permet le contrôle précis de température par un contrôle extérieur du sens et de l'amplitude du courant qui traverse la jonction.

Les dispositifs à effet PELTIER sont des pompes de chaleur. Ils sont capables de provoquer de très importantes différences de température, s'ils sont convenablement dotés de radiateurs permettant d'évacuer la chaleur pompée, plus la chaleur provoquée par l'effet Joule due au passage du courant à travers les résistances électriques du circuit.

Des radiateurs en aluminium ou en cuivre peuvent être utilisés pour évacuer la chaleur. Il est par ailleurs préférable d'utiliser une ventilation ou une circulation d'eau pour accélérer le processus. De toute façon, la face chaude ne doit jamais dépasser la température de 125° C, sous peine de destruction du module.

Il est de plus conseillé d'appliquer une fine couche de graisse entre les surfaces en présence, afin d'améliorer le transfert de chaleur.

Dans notre cas, nous avons écarté l'emploi de refroidissement à circulation à eau car, l'appareil devant être indifféremment utilisé sur bateau ou sur avion, une circulation par air soufflé nous a semblé plus simple à mettre en oeuvre.

Pour déterminer l'élément PELTIER le mieux adapté à la mesure il est nécessaire de tenir compte de deux choses.

- 1° - La vitesse de variation de température que l'on veut obtenir.
- 2° - Les pertes thermiques du corps noir.

Pour la vitesse de variation, compte tenu des phénomènes à étudier, nous pouvons nous limiter à des valeurs de 1° C/30 s.

Pour le corps noir choisi, le volume est d'environ 77 cm^3 et nous avons envisagé de le réaliser soit en cuivre, soit en aluminium

la densité étant de 2,58 pour l'aluminium
 8,9 pour le cuivre

la masse est de 198 gr pour l'aluminium
 687 gr pour le cuivre

La chaleur spécifique est de 0,2 pour l'aluminium
 0,09 pour le cuivre

On trouve donc, pour une élévation de 1°C en 30 secondes
 39 calories soit 166 joules soit 6 W pour l'aluminium
 61 calories soit 258 joules soit 10 W pour le cuivre

Nous avons donc préféré l'aluminium, ce qui présente aussi l'avantage d'un gain de poids pour le radiomètre.

En se reportant à la figure III-26, on voit que, pour l'aluminium, la meilleure émissivité est obtenue. Lorsqu'il est peint. On emploie pour cela une peinture spéciale anti-reflet que l'on applique sur l'aluminium après l'avoir strié et attaqué à l'acide sulfurique.

Après ce traitement, l'émissivité d'un corps noir de forme cylindrique est de l'ordre de 0,998 (3).

Les pertes thermiques, pour un tel dispositif, sont de trois ordres: par convection, par conduction et par rayonnement. S'il est très difficile de les calculer, il est possible de les déterminer expérimentalement.

Pour cela, on peut procéder de la façon suivante: on amène le corps noir à une température différente de la température ambiante et l'on enregistre son temps de rétablissement à la température ambiante.

Dans ce cas, les pertes sont calculées de la façon suivante :

$$W = \frac{c m \Delta \theta}{\Delta T}$$

Nous venons donc de passer en revue tous les éléments de la tête optique du radiomètre infrarouge. La figure III-32 donne le détail

III-7 - LA TÊTE OPTIQUE DU RADIOMETRE

L'écart de température enregistré pendant le temps ΔT de ventilation légère pour un écart de température de 10°C . On trouve ainsi que W est de l'ordre de 2 Watts. La figure III-29 indique les caractéristiques du module PELTIER choisi. Sur ces caractéristiques ΔT représente la différence de T° entre la face chaude et la face froide, TH la T° de la face chaude et I le courant traversant le module PELTIER. Dans la pratique, avec le système de ventilation choisi, la face chaude du module ne présente pas une capacité thermique infinie et s'échauffe fortement entre 50 et 70°C . De ce fait il est nécessaire, par exemple, de faire passer 10 Amperes dans le module pour atteindre un ΔT de 15° entre la face froide et la température ambiante (25°C). Les courbes de la figure III-30 montrent les $\Delta T = T^{\text{CN}} - T^{\text{amb}}$ obtenus pour différentes valeurs de courants traversant le module. On peut en déduire par exemple que pour un courant de 18 Amperes la vitesse de variation de ΔT est de l'ordre de 1°C pour 20 secondes. Cette caractéristique donne la vitesse maximum de variation que l'on pourra atteindre lors de la conduite en température du corps noir. D'autre part il y a une saturation qui se produit au fort courant, c'est à dire que les écarts ΔT obtenus pour une même variation de courant sont plus grands autour de 2 Amperes que de 15 Amperes. De plus, les écarts obtenus sont plus grands en chauffe qu'en refroidissement figure III-31. Tous ces éléments feront que les caractéristiques de la chaîne d'asservissement utilisant ces modules seront différentes suivant le point de stabilisation choisi, notamment en vitesse d'asservissement. Le principe de la chaîne d'asservissement utilisé sera expliqué en détail au chapitre Electronique Associée. La figure III-27 indique le détail de la présentation mécanique du dispositif, dans la tête optique.

c est la chaleur spécifique

m la masse

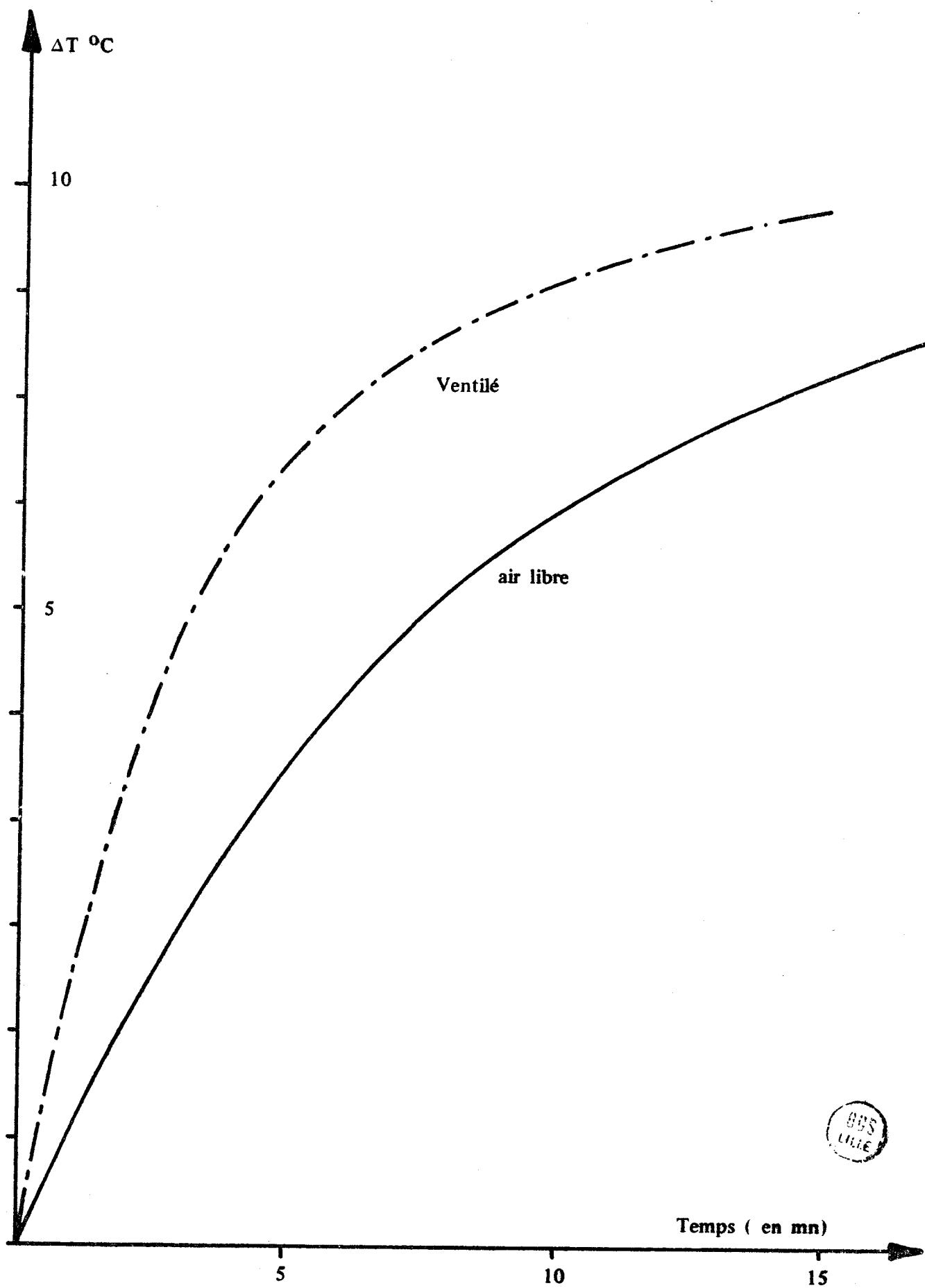
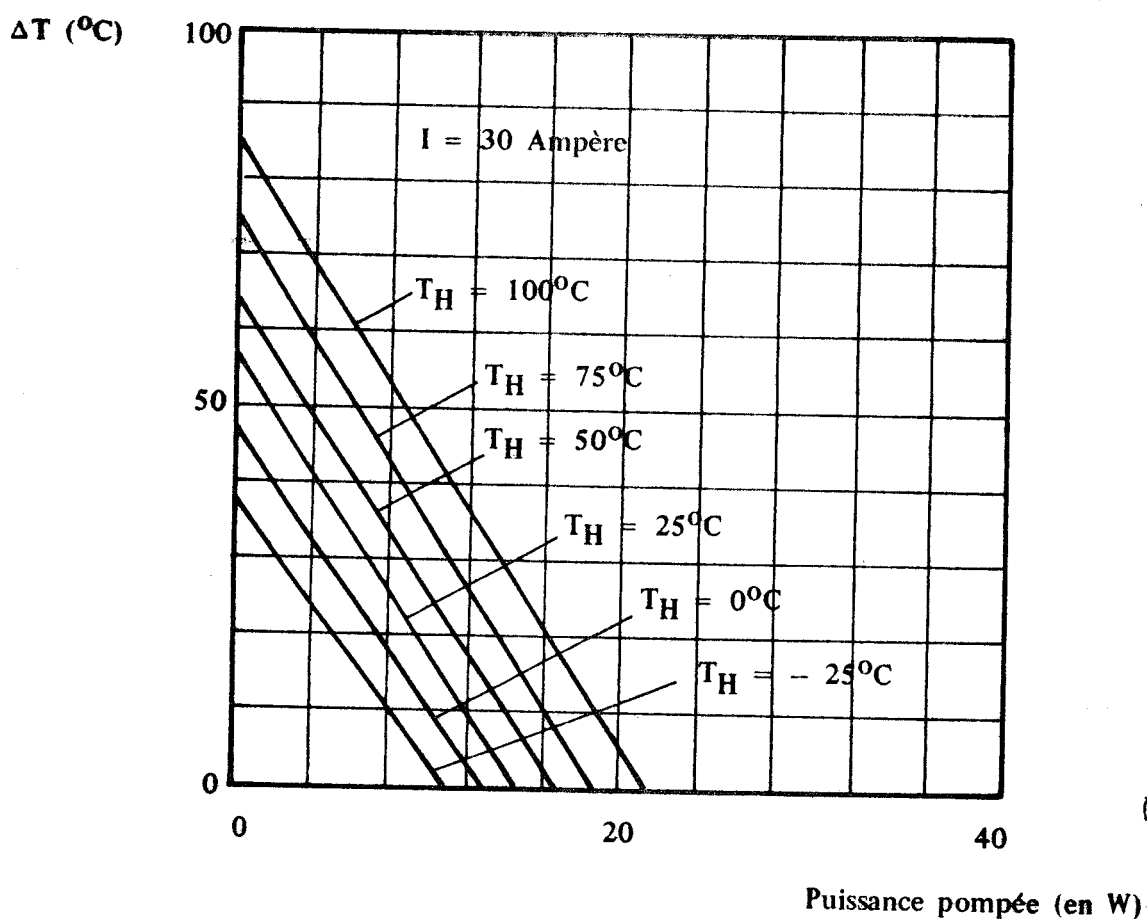
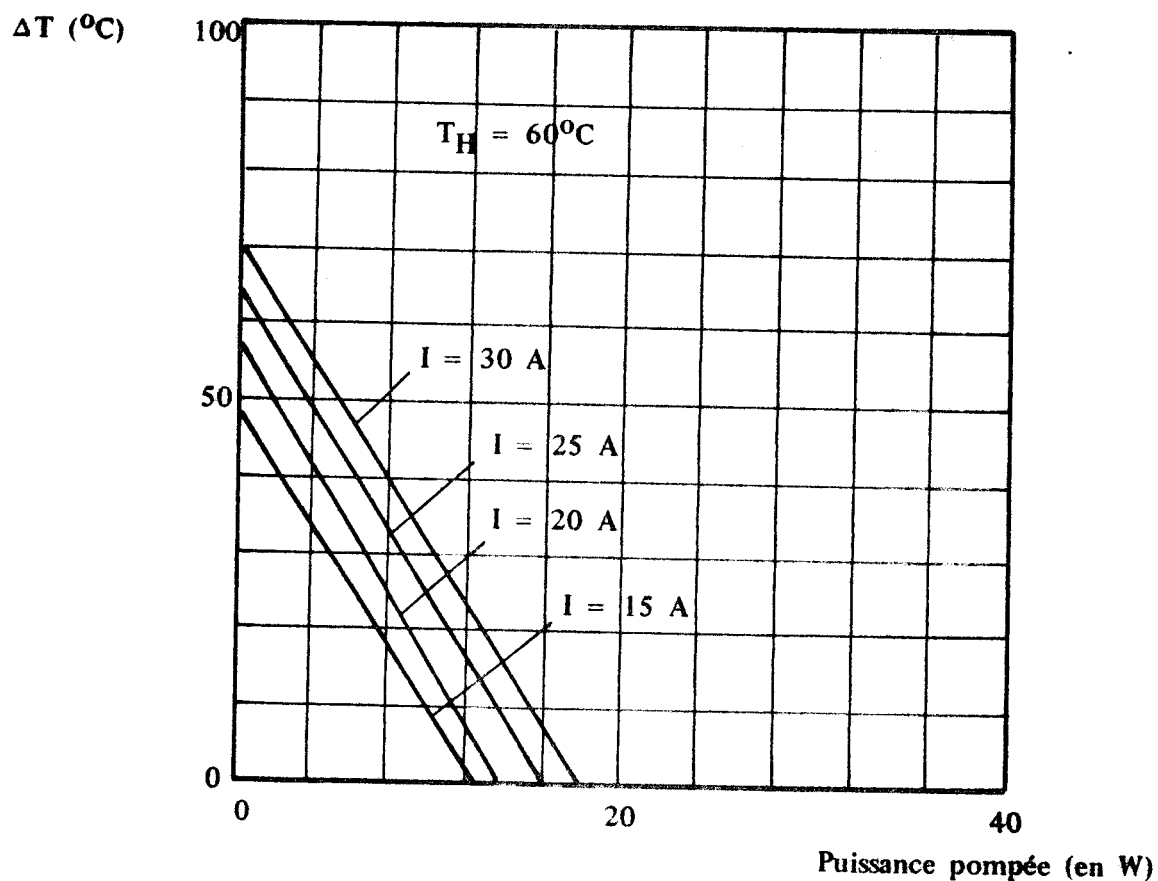


FIGURE III 28



Caractéristiques de l'élément Peltier utilisé

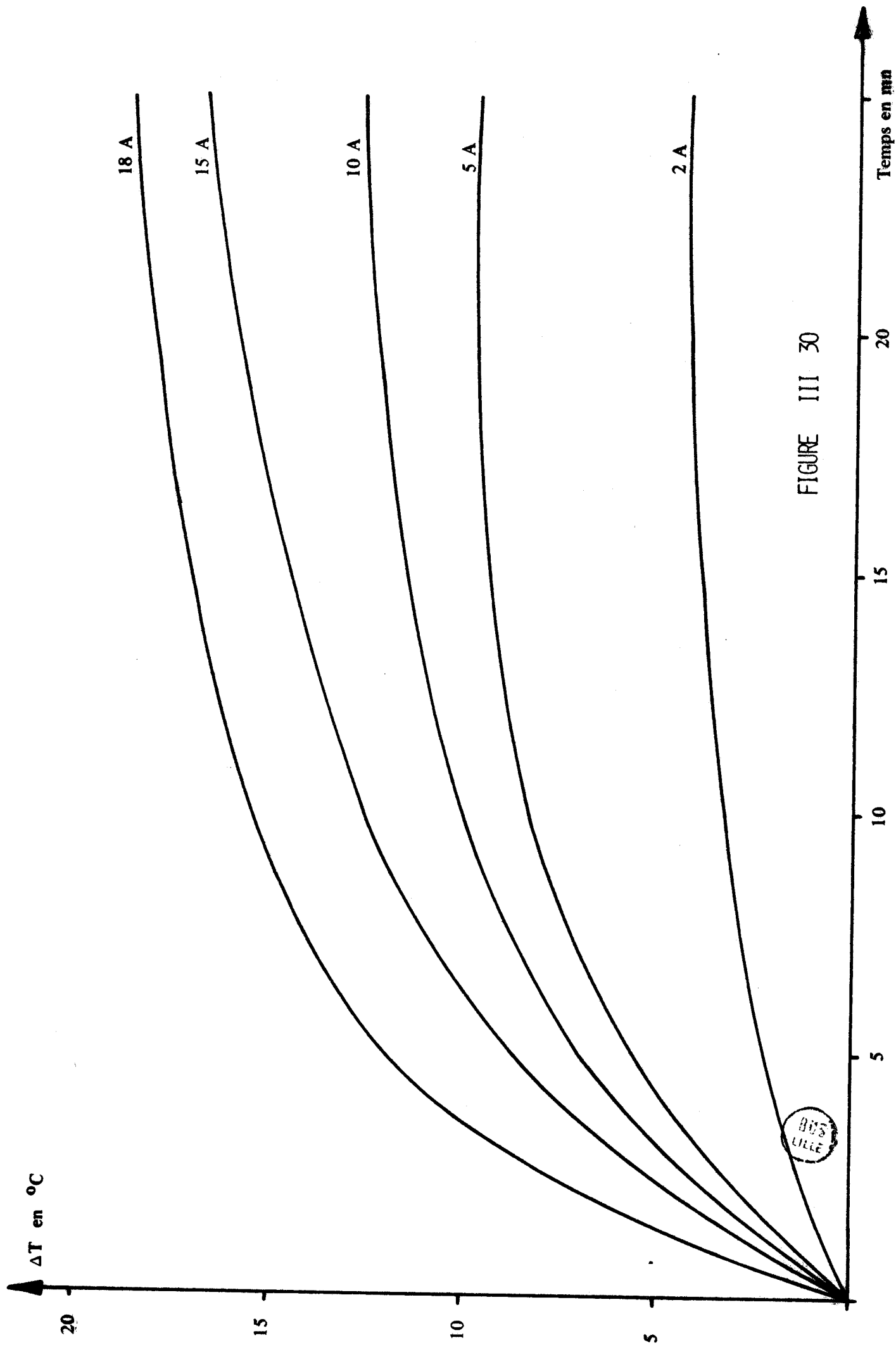


FIGURE III 30

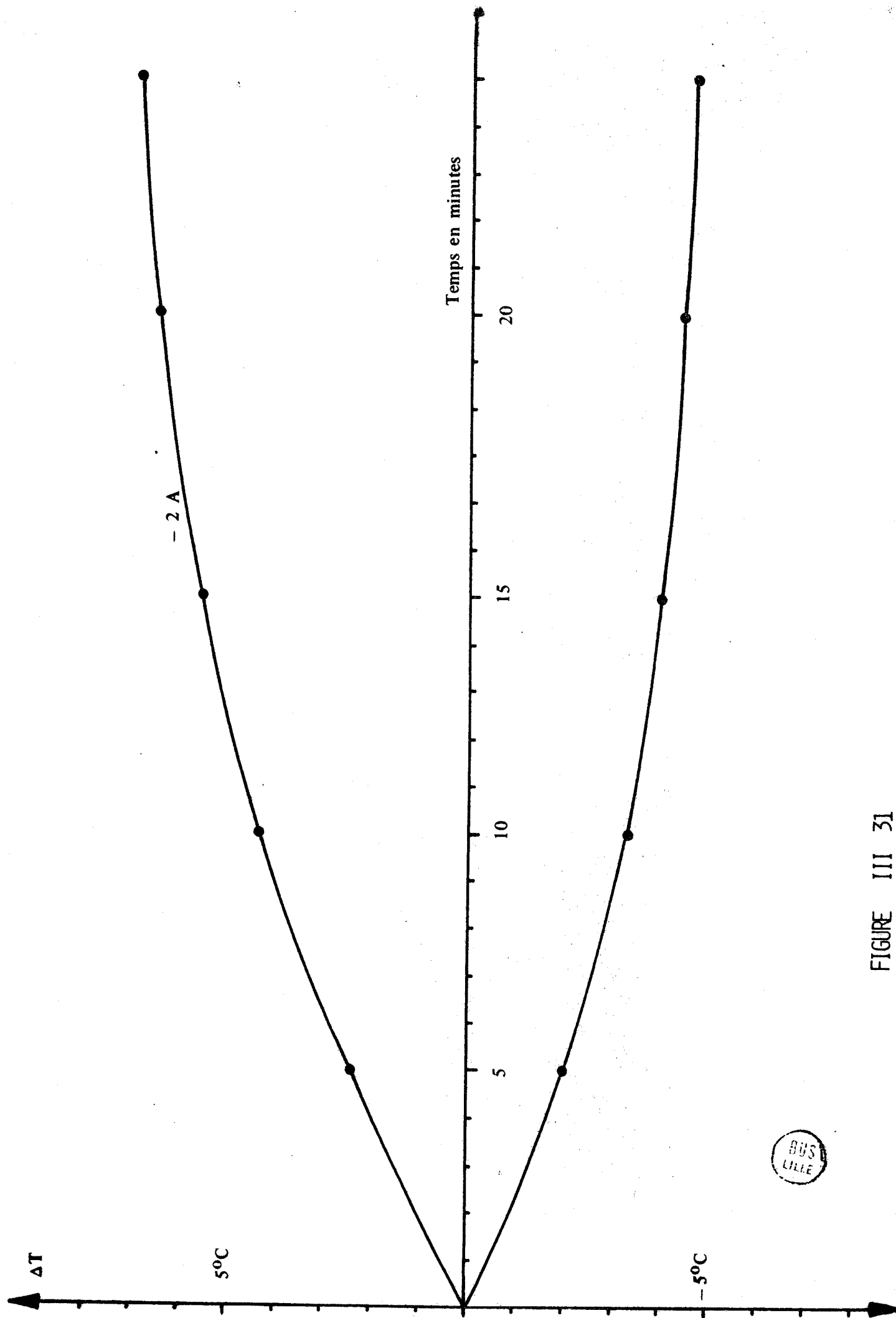


FIGURE III 31

BUS
LILLE

de réalisation de cette tête de mesure.

Comme on peut le voir, tous les éléments chauffants sont placés à l'extérieur d'un premier boîtier. C'est notamment le cas du moteur, du côté chaud de l'élément PELTIER ainsi que de son radiateur. Par contre on trouve à l'intérieur de ce boîtier des éléments chauffants résistances ou fils chauffants qui permettent, à l'aide d'un dispositif régulateur, de stabiliser grossièrement la température, au voisinage du modulateur et du corps noir, et de maintenir le détecteur à une température voisine du sommet de sa courbe de réponse (fig. III-10).

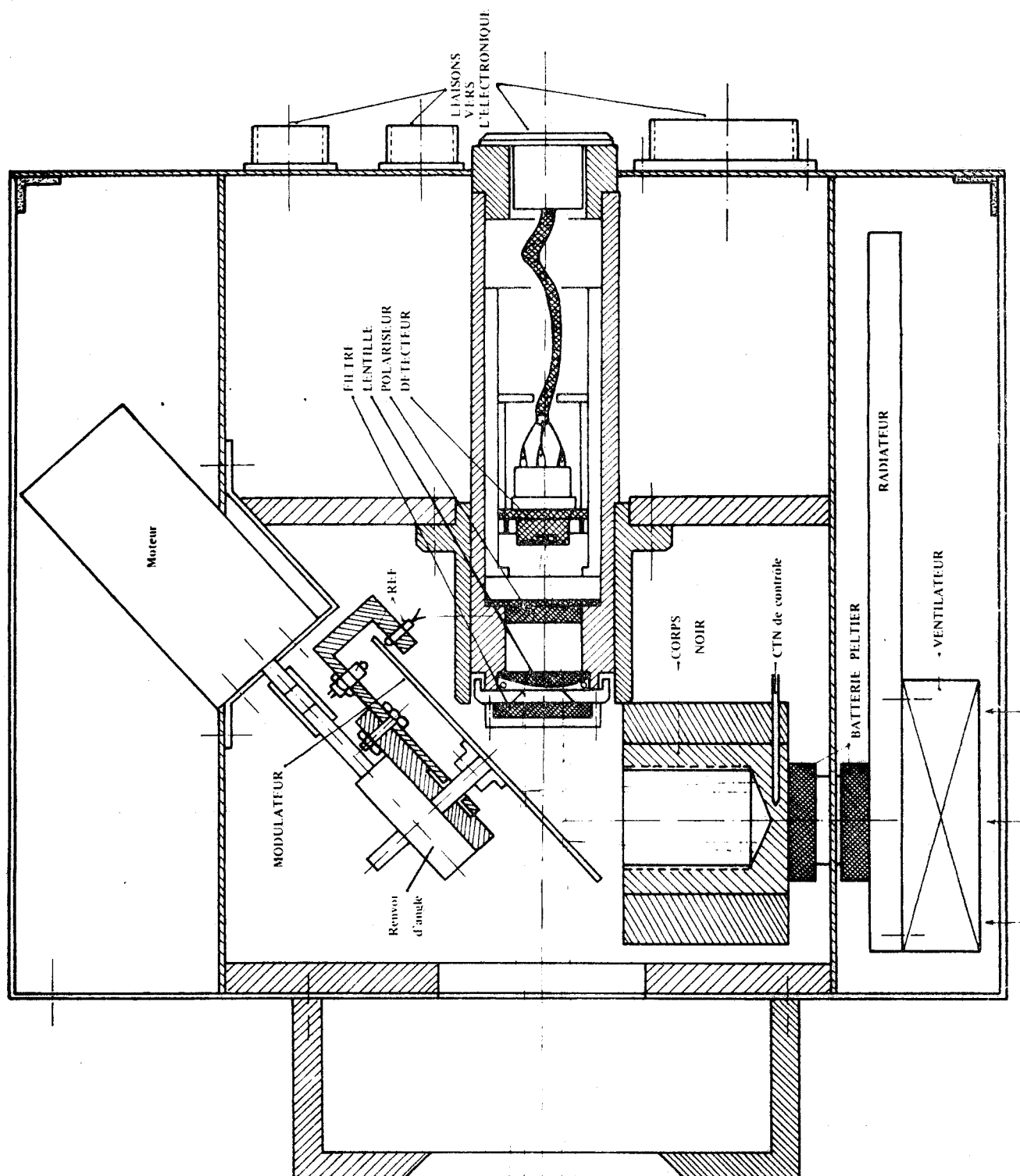


FIGURE III 32



CHAPITRE IV

ELECTRONIQUE ASSOCIEE AU RADIOMETRE RALI

La figure IV-1 montre le synoptique complet de l'électronique associée au radiomètre :

- LA CHAÎNE D'AMPLIFICATION ET DE DETECTION DU SIGNAL

Elle permet d'amener le signal à une valeur facilement détectable. Elle est composée essentiellement :

- d'un transformateur adaptateur d'impédance permettant de choisir pour l'amplificateur des zones de facteur de bruit minimum
- d'un amplificateur de gain et de bande passante variable
- d'une détection synchrone permettant à la fois de détecter le signe du signal et d'éliminer une grande partie des signaux parasites
- d'une voie référence munie d'un déphaseur permettant de synchroniser le détecteur en compensant les divers déphasages apportés par le détecteur et la chaîne d'amplification.

- LA CHAÎNE D'ASSERVISSEMENT DU CORPS NOIR

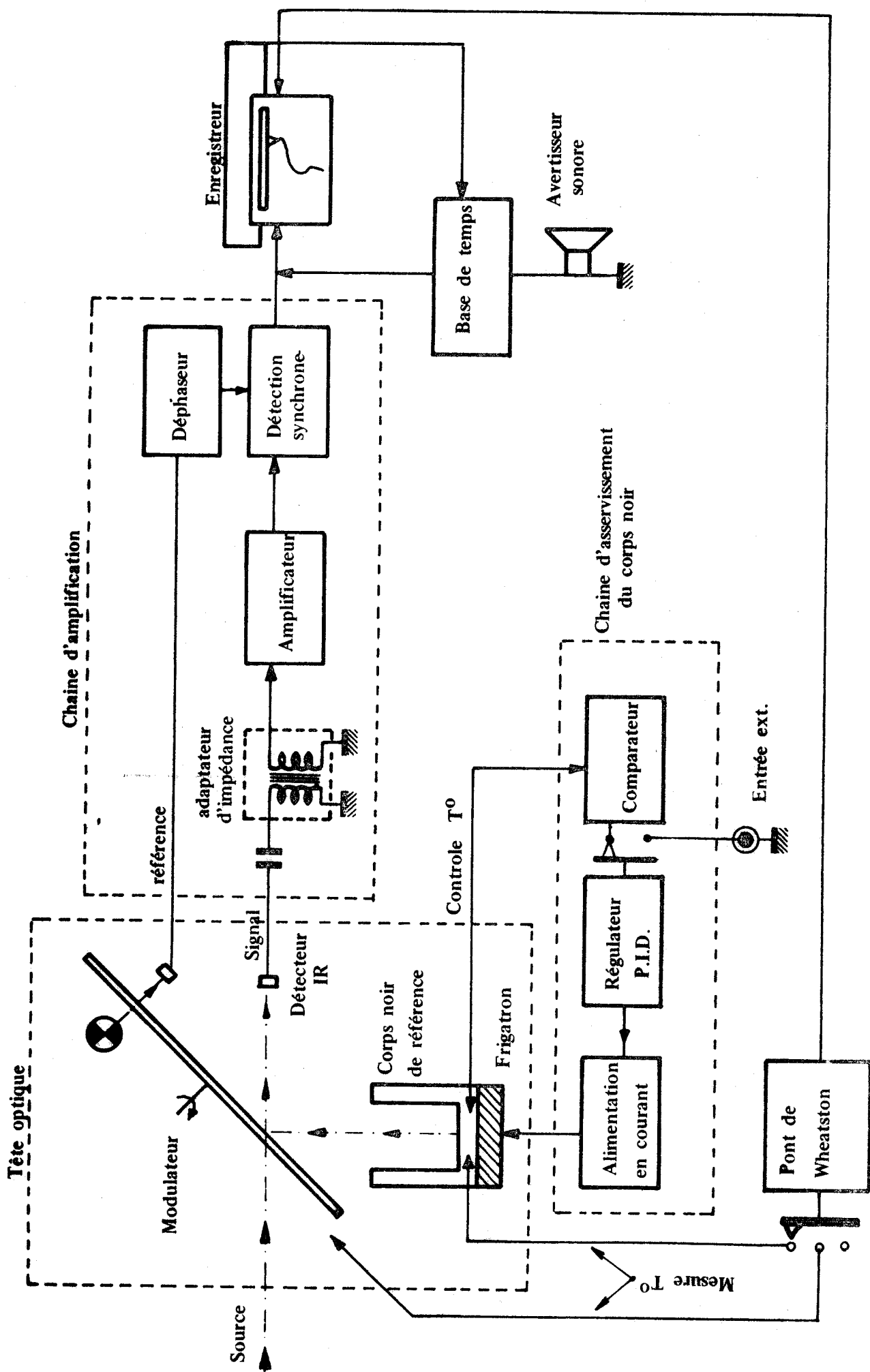
Elle doit permettre d'utiliser le radiomètre dans les deux cas : soit un corps noir stabilisé, soit un corps noir asservi. Elle est composée d'une alimentation pilotant le courant traversant le frigatron. Cette alimentation est commandée par l'écart existant entre une température de consigne et celle du corps noir de référence. Cet écart détecté à l'aide d'un comparateur est envoyé sur l'entrée de l'alimentation à travers un régulateur PID permettant à la chaîne d'asservissement de travailler constamment à tension d'erreur nulle.

- UN PONT DE WHEASTON

Il permet de mesurer la valeur des résistances CTN, servant à la mesure des diverses températures (corps noir - enceinte - eau).

- UNE BASE DE TEMPS

Elle permet, lors de mesures de longue durée, de synchroniser les enregistrements et d'avertir l'opérateur, à intervalles réguliers, ou lorsque l'enregistrement est hors des limites fixées (contacts bout de piste).



Synoptique de l'électronique associée au radiomètre.

FIGURE IV 1

MESURE DE LA T^0

DE L'EAU



IV-1 - AMPLIFICATION ET DETECTION

Avant de définir les caractéristiques de l'amplificateur à utiliser, il est nécessaire de connaître les signaux en présence. Pour cela, à partir des caractéristiques de tous les éléments d'optique définis précédemment, nous pouvons calculer approximativement quelle sera l'énergie (W) reçue sur le détecteur, pour une source rayonnant comme un corps noir à 280 K et un corps noir de référence dont la température serait différente au maximum de 1° K de celle de la source. Il faut tenir compte des diverses transmissions des éléments ; lentille, polariseur, filtre aux différentes fréquences du spectre. Ces transmissions sont données dans le tableau, ainsi que la transmission totale τ_{λ} qui en résulte.

λ	7	8	9	10	11	12	13	14	μm
τ polariseur	35	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5	%
τ lentille	70	85	90	90	90	85	85	80	%
τ filtre	0	30	65	70	60	30	20	0	%
τ_{λ}	0	9	21	23	20	9	6	0	%

Les tables du corps noir nous donnent ($B_{\lambda}(T)$) l'énergie à une température donnée T et sur un intervalle de 1 μm , centré sur une longueur d'onde donnée (λ).

A partir de $B_{\lambda}(300)$ et $B_{\lambda}(280)$, nous pouvons calculer pour chaque longueur d'onde (λ), ΔB_{λ} qui correspond à la différence d'énergie pour un écart de température de 20° K. Chaque ΔB_{λ} doit être pondéré par la transmission de l'optique utilisée τ_{λ} .

λ	7	8	9	10	11	12	13	14	cm
$B_{\lambda}(300)$	7,53	9,107	9,85	9,94	9,595	8,98	8,24	7,45	
$B_{\lambda}(280)$	4,61	5,93	6,72	7,04	7	6,72	6,29	5,8	$10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
$\Delta B_{\lambda} \tau_{\lambda}$	0	0,28	0,65	0,66	0,51	0,2	0,117	0	

On trouve ΔW pour $20^{\circ} \text{ C} = \epsilon_{7-14}^{\lambda} \Delta B_{\lambda} \tau_{\lambda} = 2.41 \cdot 10^{-4} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$
 ou pour $1^{\circ} \text{ C} \Delta W = 1.23 \cdot 10^{-5} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ }^{\circ} \text{C}^{-1}$.

L'énergie, arrivant sur un détecteur de mm^2 , visant la source sous un angle de $2 \times 10^{\circ}$ ou $9.5 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$ sera :

$$W = 1.23 \cdot 10^{-5} \times 4 \cdot 10^{-2} \times 9.5 \cdot 10^{-2} = 4.6 \cdot 10^{-8} \text{ W/}^{\circ} \text{C}$$

Comme le détecteur que l'on utilise a une réponse de :

$$R = 10^3 \text{ V/W}$$

le signal amplifié et détecté sera de l'ordre de :

$$SW = WR = 50 \mu \text{ V/}^{\circ} \text{C}$$

Ce qui nécessite un amplificateur ayant un gain de $5 \cdot 10^4$, si l'on veut une sensibilité moyenne de la chaîne de $1 \text{ V/}^{\circ} \text{C}$. Il est possible aussi de calculer la précision théorique maximum à laquelle il faut s'attendre avec les éléments d'optique utilisés. Le détecteur ayant une détectivité spécifique $D^x = 4.5 \cdot 10^8 \text{ cm W}^{-1} \text{ Hz}^{1/2}$, la détectivité pour une surface de 4 mm^2 et une bande passante de 1 Hz est :

$$D = D^x / \sqrt{4 \cdot 10^{-2}}$$

$$D = 2.2 \cdot 10^9 \text{ W}^{-1}$$

le NET de l'appareil sera donc de

$$\text{NET} = \frac{1}{D.W} = \frac{1}{2,2 \cdot 10^9 \cdot 46 \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

soit environ $0,01^\circ \text{C}$.

En se référant aux caractéristiques du détecteur (fig. III-9), on peut voir que ce NET est déterminé par un bruit SB du détecteur de l'ordre de $0,5 \text{ } \mu\text{V}$ pour une modulation de 10 Hz et pour une bande passante de 1 Hz .

Si l'on veut que la chaîne amplificatrice ne perturbe pas la mesure, il est nécessaire que son bruit propre ramené à l'entrée soit nettement inférieur à SB (par exemple $\frac{\text{SB}}{100}$).

Nous allons donc voir comment les constructeurs donnent les caractéristiques en bruit de leurs amplificateurs pour pouvoir faire un choix convenable.

Beaucoup de techniques sont employées pour mesurer et définir les caractéristiques en bruit des amplificateurs [15]. La plus simple et la plus connue est de court circuiter l'entrée de l'amplificateur et de mesurer la tension efficace apparaissant à la sortie sur une bande passante déterminée. Cette valeur est divisée par le gain de l'amplificateur.

Cette méthode est certainement satisfaisante quand il faut comparer un certain nombre d'amplificateurs identiques dont la bande passante opérationnelle est connue. Mais si une description précise du bruit d'un amplificateur est à donner, il est nécessaire de savoir que le bruit est fonction de deux facteurs; la fréquence et la résistance interne de la source.

La technique du bruit ramené à l'entrée ne tient pas compte de ce que le facteur résistance de source interne varie pour chaque application. Cette résistance de source peut varier de plusieurs dizaines d'ohms dans le cas d'un thermocouple et à plusieurs mégohms pour des photomultiplicateurs ou des capacités vibrantes.

Normalement, pour caractériser complètement le bruit d'un amplificateur, l'expérimentateur doit mesurer le bruit à plusieurs fréquences et pour plusieurs impédances de source.

le NET de l'appareil sera donc de

$$\text{NET} = \frac{1}{D.W} = \frac{1}{2,2 \cdot 10^9 \cdot 46 \cdot 10^{-9}} \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

soit environ $0,01^\circ \text{C}$.

En se référant aux caractéristiques du détecteur (fig. III-9), on peut voir que ce NET est déterminé par un bruit SB du détecteur de l'ordre de $0,5 \mu\text{V}$ pour une modulation de 10 Hz et pour une bande passante de 1 Hz .

Si l'on veut que la chaîne amplificatrice ne perturbe pas la mesure, il est nécessaire que son bruit propre ramené à l'entrée soit nettement inférieur à SB (par exemple $\frac{\text{SB}}{100}$).

Nous allons donc voir comment les constructeurs donnent les caractéristiques en bruit de leurs amplificateurs pour pouvoir faire un choix convenable.

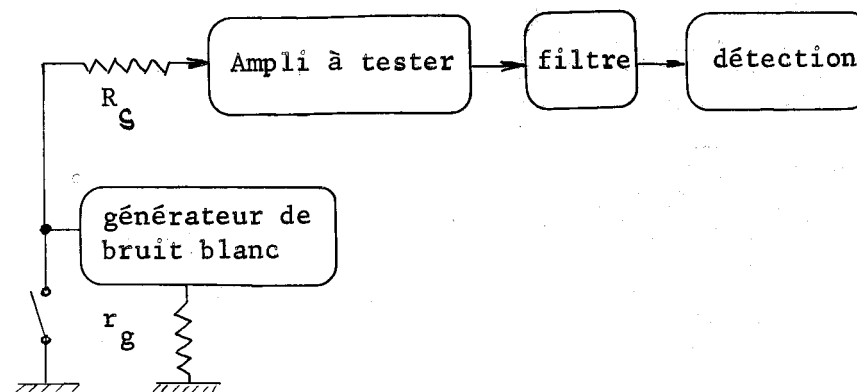
Beaucoup de techniques sont employées pour mesurer et définir les caractéristiques en bruit des amplificateurs [15]. La plus simple et la plus connue est de court circuiter l'entrée de l'amplificateur et de mesurer la tension efficace apparaissant à la sortie sur une bande passante déterminée. Cette valeur est divisée par le gain de l'amplificateur.

Cette méthode est certainement satisfaisante quand il faut comparer un certain nombre d'amplificateurs identiques dont la bande passante opérationnelle est connue. Mais si une description précise du bruit d'un amplificateur est à donner, il est nécessaire de savoir que le bruit est fonction de deux facteurs; la fréquence et la résistance interne de la source.

La technique du bruit ramené à l'entrée ne tient pas compte de ce que le facteur résistance de source interne varie pour chaque application. Cette résistance de source peut varier de plusieurs dizaines d'ohms dans le cas d'un thermocouple et à plusieurs mégohms pour des photomultiplicateurs ou des capacités vibrantes.

Normalement, pour caractériser complètement le bruit d'un amplificateur, l'expérimentateur doit mesurer le bruit à plusieurs fréquences et pour plusieurs impédances de source.

Pour faire ces mesures, on peut utiliser le circuit test suivant :



Le générateur de bruit blanc (Une puissance égale par unité de bande passante) est d'abord éteint et la résistance de source R_s est insérée dans le circuit.

L'amplificateur accordable est ajusté à la fréquence désirée. Dans ces conditions, on note la tension efficace de sortie, puis l'on augmente progressivement la tension de sortie du générateur de bruit, de manière à augmenter d'un facteur 1,4 la tension efficace de sortie.

A ce moment, le bruit du générateur est égal au bruit de l'amplificateur + celui de la résistance de source (en $V_H Z^{1/2}$).

On a en effet :

$$V_s = \sqrt{V_{BR}^2 + V_{BA}^2} = \sqrt{2 V_{BA}^2} = 1,4 V_{BA}$$

En faisant varier la résistance de la source, et en maintenant la fréquence centrale constante, on peut déterminer le bruit pour une fréquence en fonction de la résistance de source. Inversement, il est aussi possible de déterminer le bruit par une résistance de source constante, en fonction de la fréquence.

Le bruit de la résistance de la source (aussi appelé bruit Johnson) est le bruit électronique généré par une résistance R_s , à une température T différente du zéro absolu

$$E_n = \sqrt{4k T R_s B_N}$$

E_n est la tension efficace de bruit pour la bande passante considérée en Watts

k est la constante de Boltzman $1.38 \cdot 10^{-23}$ Jaules/ Kelvin

T la température absolue en Kelvin

R_s la résistance considérée en Ω

B_N la bande passante sur laquelle le bruit est mesuré

à 290 K $E_n = 1.28 \cdot 10^{-10} R_s^{1/2} f^{1/2}$

Le bruit d'un amplificateur est donc défini de la façon suivante, si on l'exprime en dB :

$$NF = 20 \log 10 \frac{\text{bruit Johnson} + \text{bruit de l'amplificateur}}{\text{bruit Johnson}}$$

Parmi l'ensemble des amplificateurs possibles, nous avons choisi un amplificateur (de chez PAR Mod 225) dont on reproduit les courbes sur la figure IV-2.

A partir du bruit du détecteur précédemment calculé, il est possible de déterminer la zone d'utilisation possible de l'ampli correspondant à $\frac{SB}{100}$ soit 3,6 μV pour une résistance de source de 2,3 K Ω et pour une bande passante de 1 Hz.

On trouve aussi que

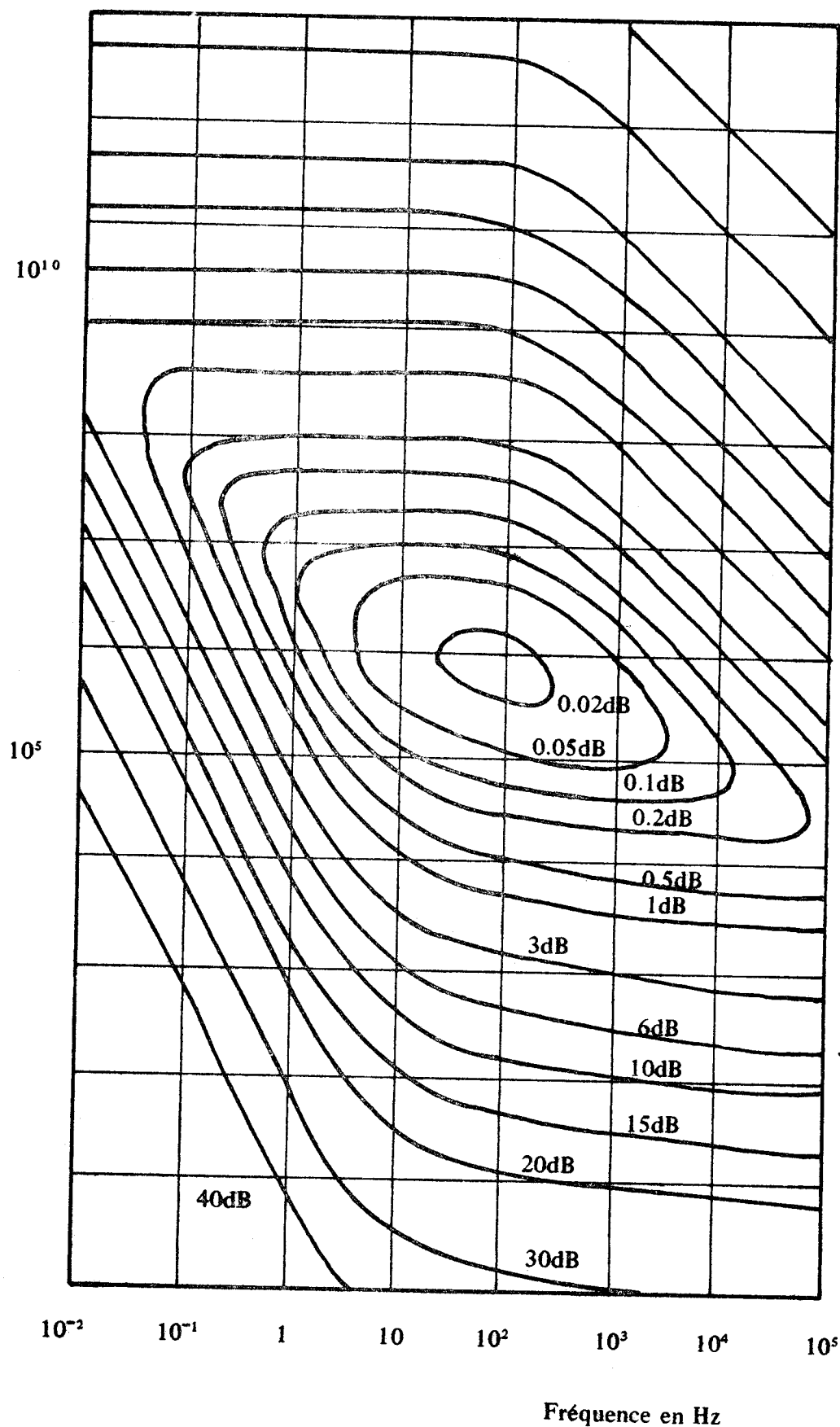
$$NF = 25 \text{ dB}$$

Comme on peut le voir, il n'y a pratiquement pas de problème avec l'amplificateur choisi. En effet le minimum de bruit possible avec cet amplificateur est de 0,05 dB à 10 Hz, mais pour une impédance de source de 5 M Ω . On pourra utiliser un transformateur adaptateur d'impédance de rapport

$$n = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^6}{2.5 \cdot 10^3}} = 45$$

Afin d'éviter que ce transformateur ne capte les parasites atmosphériques ou industriels, il est nécessaire de le choisir convenablement blindé pour

Impédance de source en Ω



Facteur de bruit de l'amplificateur

FIGURE IV 2

les basses fréquences. Généralement le blindage est effectué par le constructeur (en μ métal).

Remarque

Cet amplificateur est actuellement trop performant pour le détecteur que nous utilisons, mais nous envisageons d'essayer un détecteur de dimensions plus réduites (par exemple $0,2 \times 0,2 \mu\text{m}$) qui nécessitera, de la part de l'amplificateur, ses caractéristiques actuelles en gain et en bruit.

La figure IV-3 donne le schéma de la détection qui nous a paru le mieux adapté à notre problème. C'est une détection synchrone où deux transistors T_1 et T_2 considérés ici comme des interrupteurs, se bloquent alternativement pendant une demi-période. Le signal de sortie est pris aux points C et D. C'est la valeur de la constante de temps $R C$ qui détermine la bande passante de la détection. Les principaux avantages d'une telle détection sont les suivants :

- Linéarité à bas niveau
- Conservation du signe de la différence de température
 T° corps noir - T° source
- Sensibilité à l'amplitude et à la phase
- Suppression d'une partie du bruit de fond dont en principe la phase est erratique
- Elimination parfaite des harmoniques paires du signal.

On peut ainsi supprimer une partie importante des signaux parasites à 50 Hz rayonnés par l'installation.

Nous nous sommes fixé le choix de trois constantes de temps. La figure IV-4 donne la réponse du radiomètre pour chacune de ces constantes de temps pour un échelon de température de l'ordre de 1°C .

$$C_1 = 15 \text{ secondes}$$

$$C_2 = 5 \text{ secondes}$$

$$C_3 = 1 \text{ seconde}$$

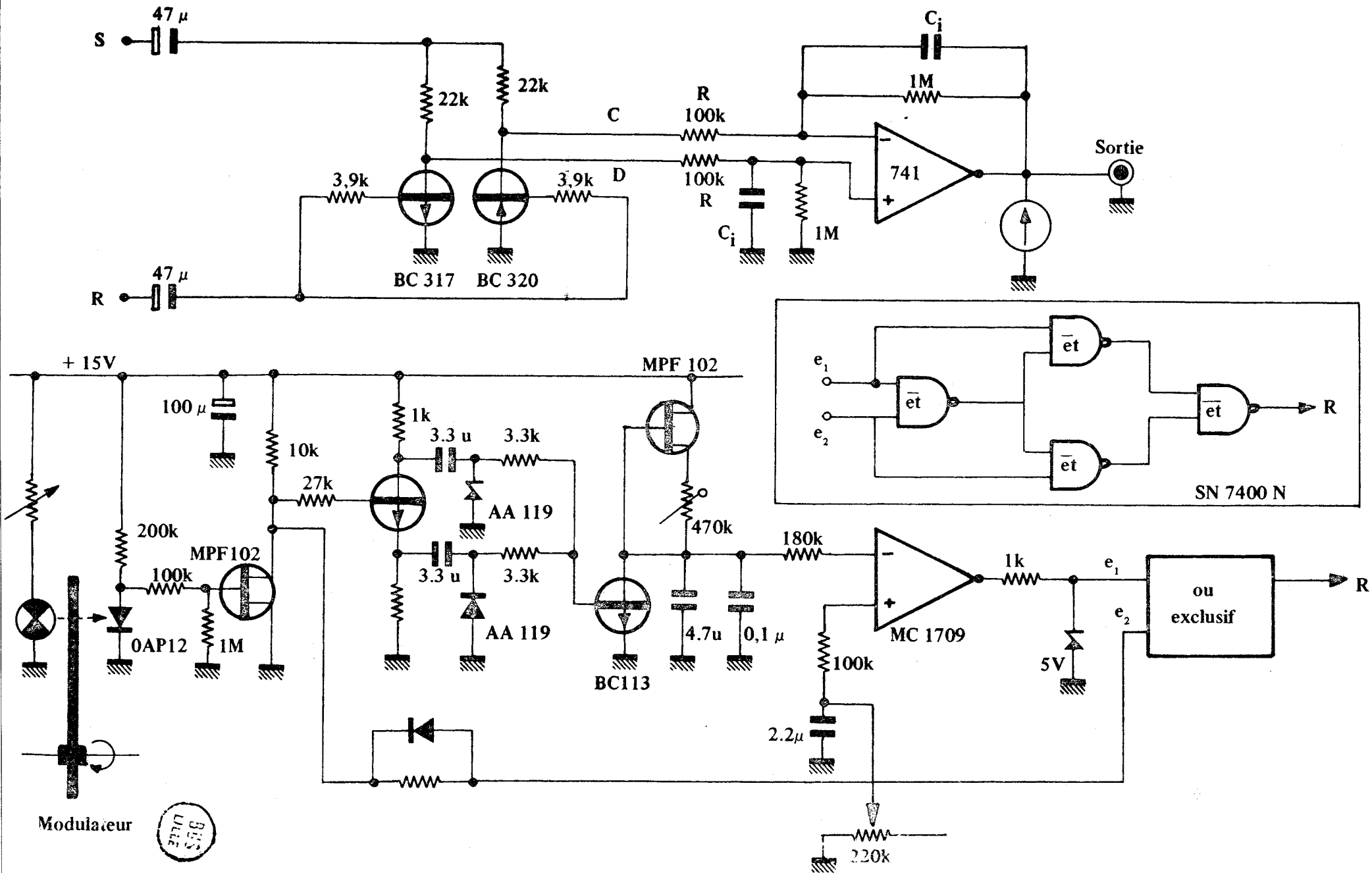
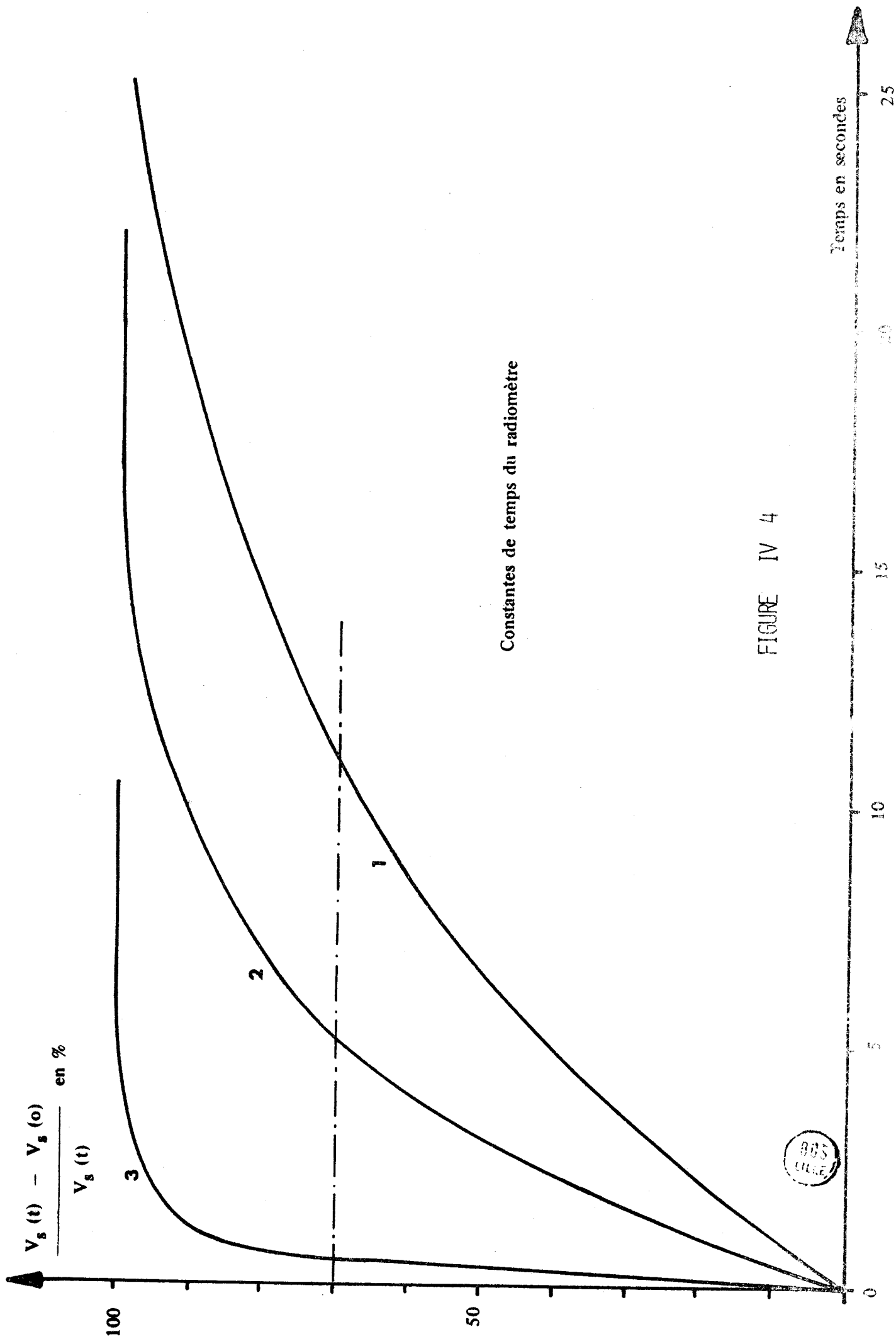


FIGURE IV 3

Déphaseur et détection synchrone



Constantes de temps du radiomètre

FIGURE IV 4



IV-2 - CHAÎNE D'ASSERVISSEMENT DU CORPS NOIR

Le principe de la chaîne d'asservissement est présenté figure IV-5. Elle permet d'utiliser le radiomètre dans les deux cas indiqués précédemment (voir fig. III-1 et 2).

- soit en corps noir stabilisé (contacts en position 3 sur la fig. IV-5)
- soit en corps noir asservi (position 1)

La position 2 permet de vérifier le bon fonctionnement de l'alimentation et de régler les sécurités en courant (limites hautes).

La position 4 court-circuite l'entrée de l'alimentation et permet de régler l'amplificateur-comparateur sans agir sur le courant traversant le module.

Les positions 5 et 6 permettent de vérifier le bon fonctionnement du régulateur PID et notamment de faire les réglages de dérives.

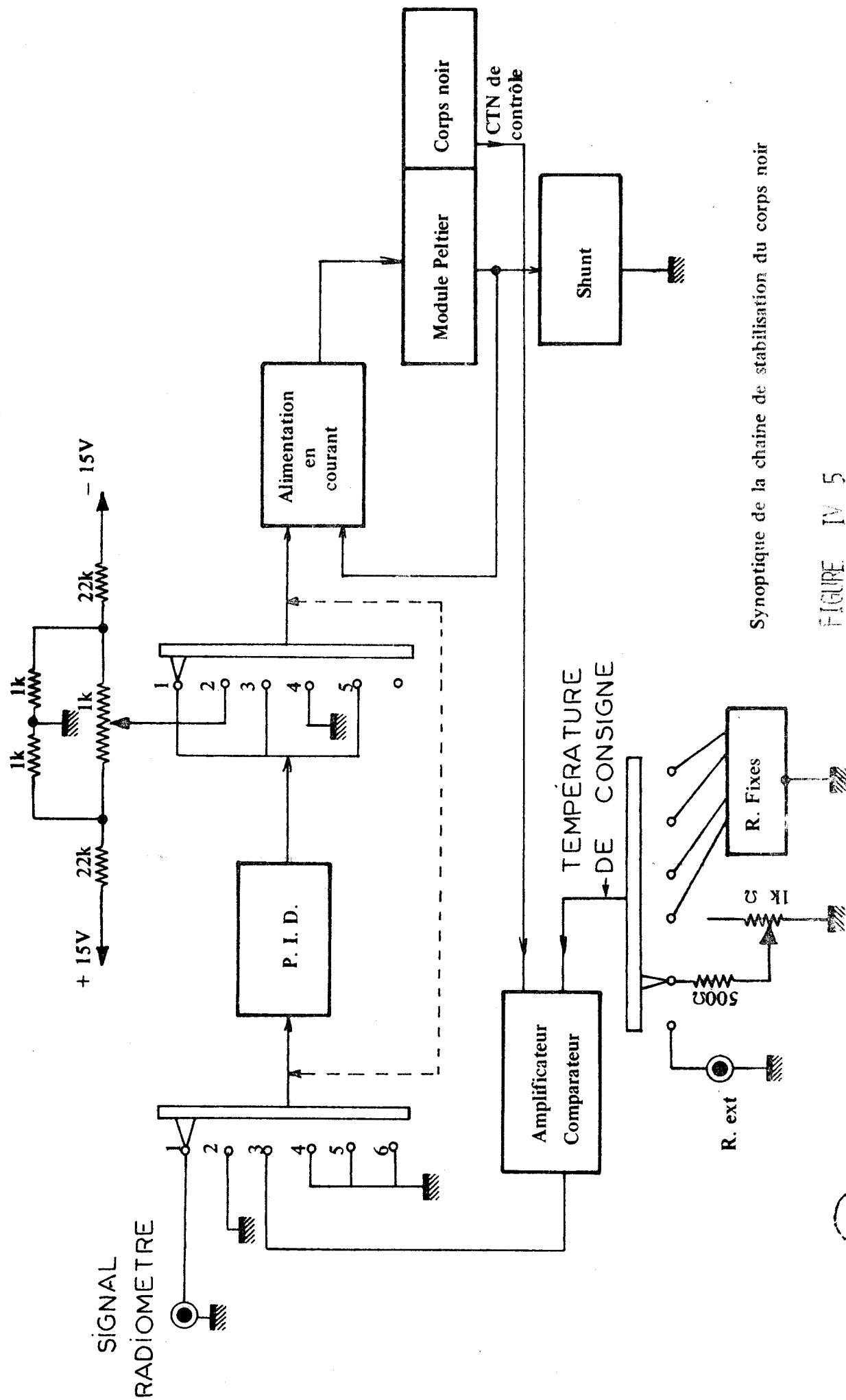
En position corps noir stabilisé (3), une sonde de température (CTN) permet de comparer la température du corps noir à une température de consigne affichée à l'aide d'un potentiomètre. Ces éléments sont introduits dans un pont de Wheaston alimenté par un signal alternatif de 1 KHz. Le signal, après amplification et détection, est appliqué à l'entrée d'un régulateur de type PID qui commande une alimentation en courant. C'est cette alimentation qui pilote la température du corps noir par l'intermédiaire du module à effet PELTIER.

En position corps noir asservi (1), c'est la tension de sortie du radiomètre (R) qui est appliquée directement au régulateur PID et qui, en agissant sur la température du corps noir, par l'intermédiaire de l'alimentation, ramène sans cesse les rayonnements alternativement visés par le détecteur à des valeurs identiques.

Les figures IV-6, 7, 8 donnent le détail de la réalisation de cette chaîne.

Le calcul des constantes de temps du régulateur PID a été discuté en détail (réf. 9). Nous donnerons ici les caractéristiques de la chaîne après réglage optimum du PID, dans le cas de l'utilisation du radiomètre en corps noir stabilisé.

La figure IV-9 montre la courbe de mise en température du corps noir. La température initiale est celle de l'ambiante (20° c). La température en



Synoptique de la chaîne de stabilisation du corps noir

FIGURE IV 5

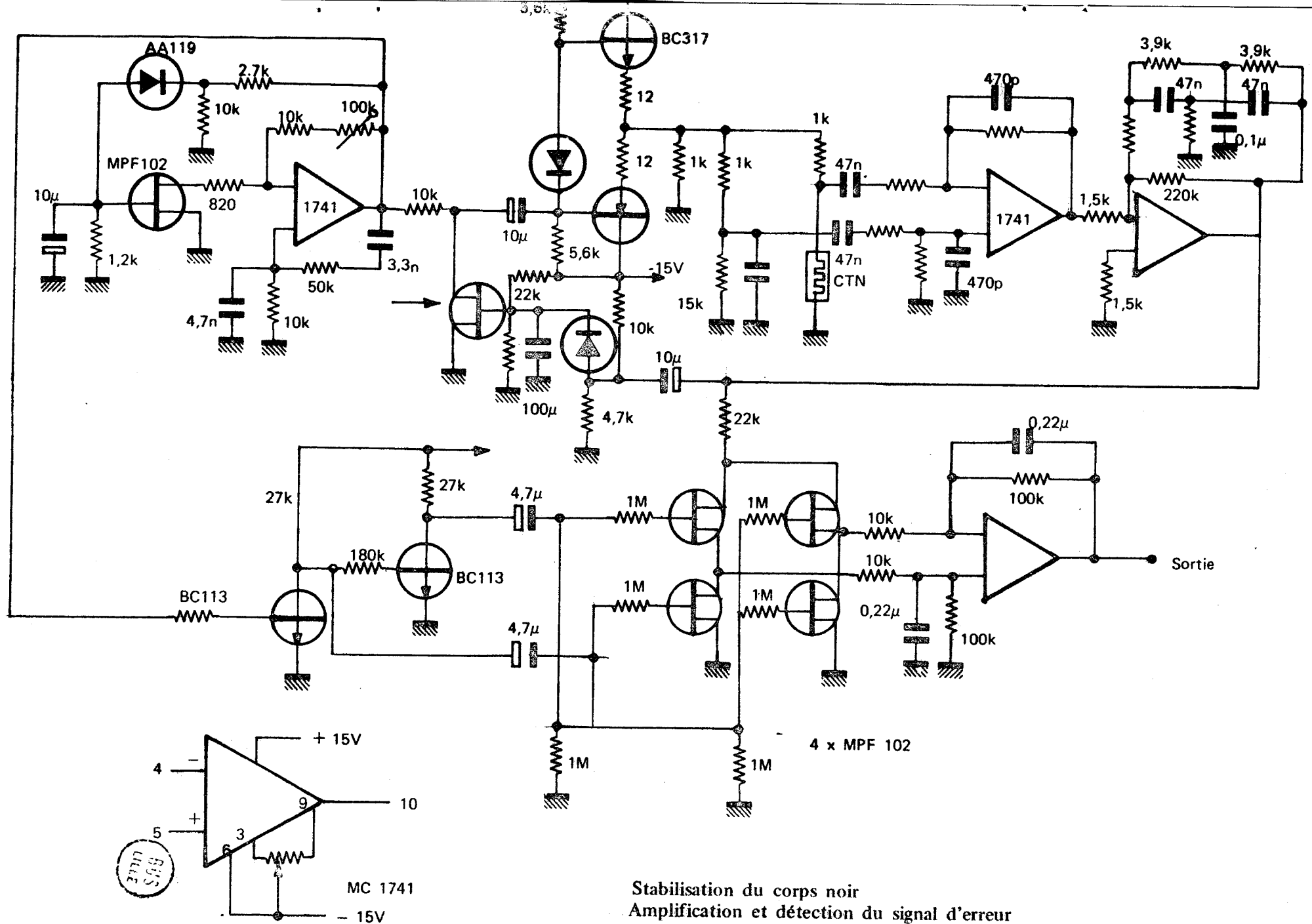
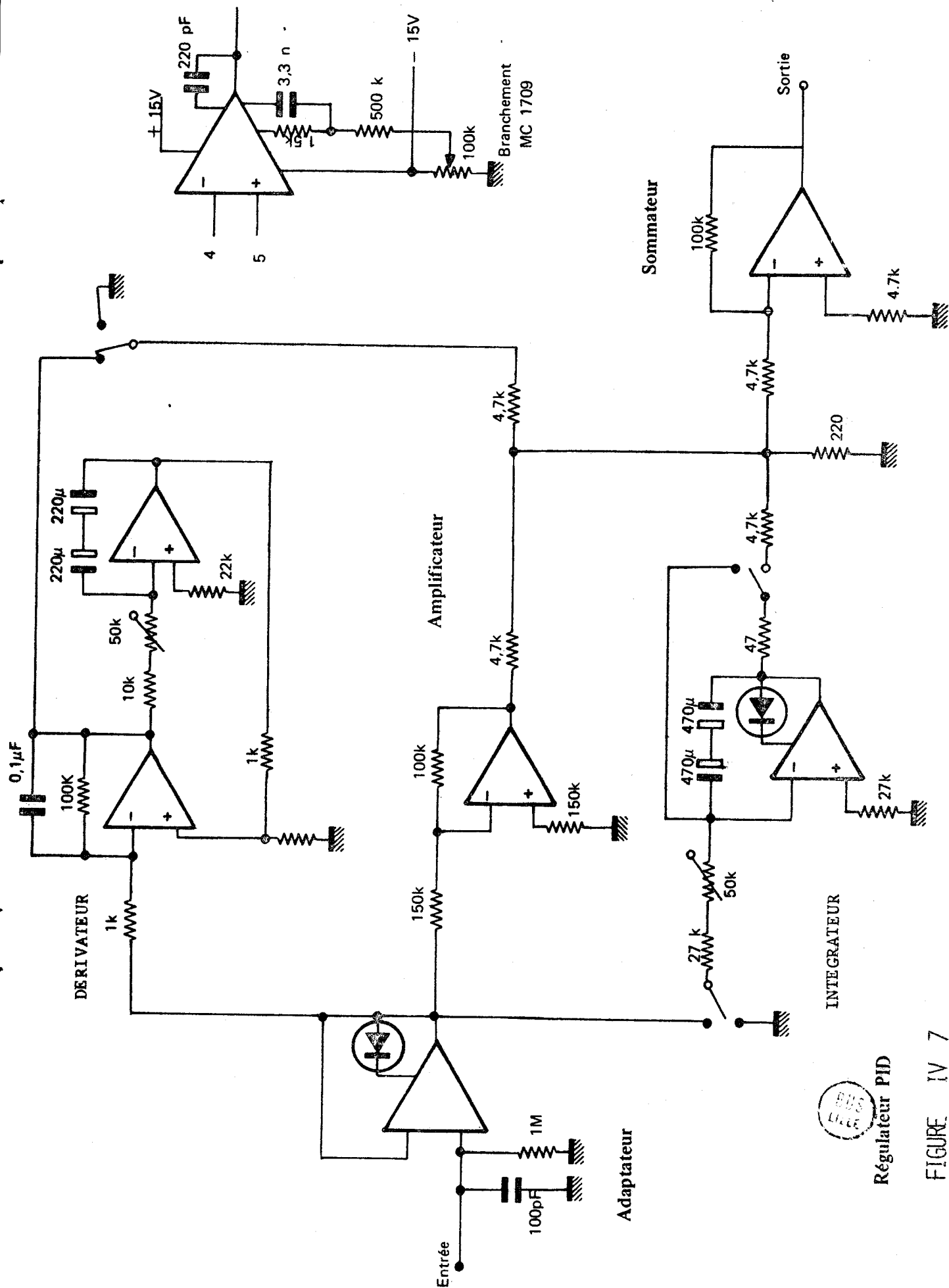
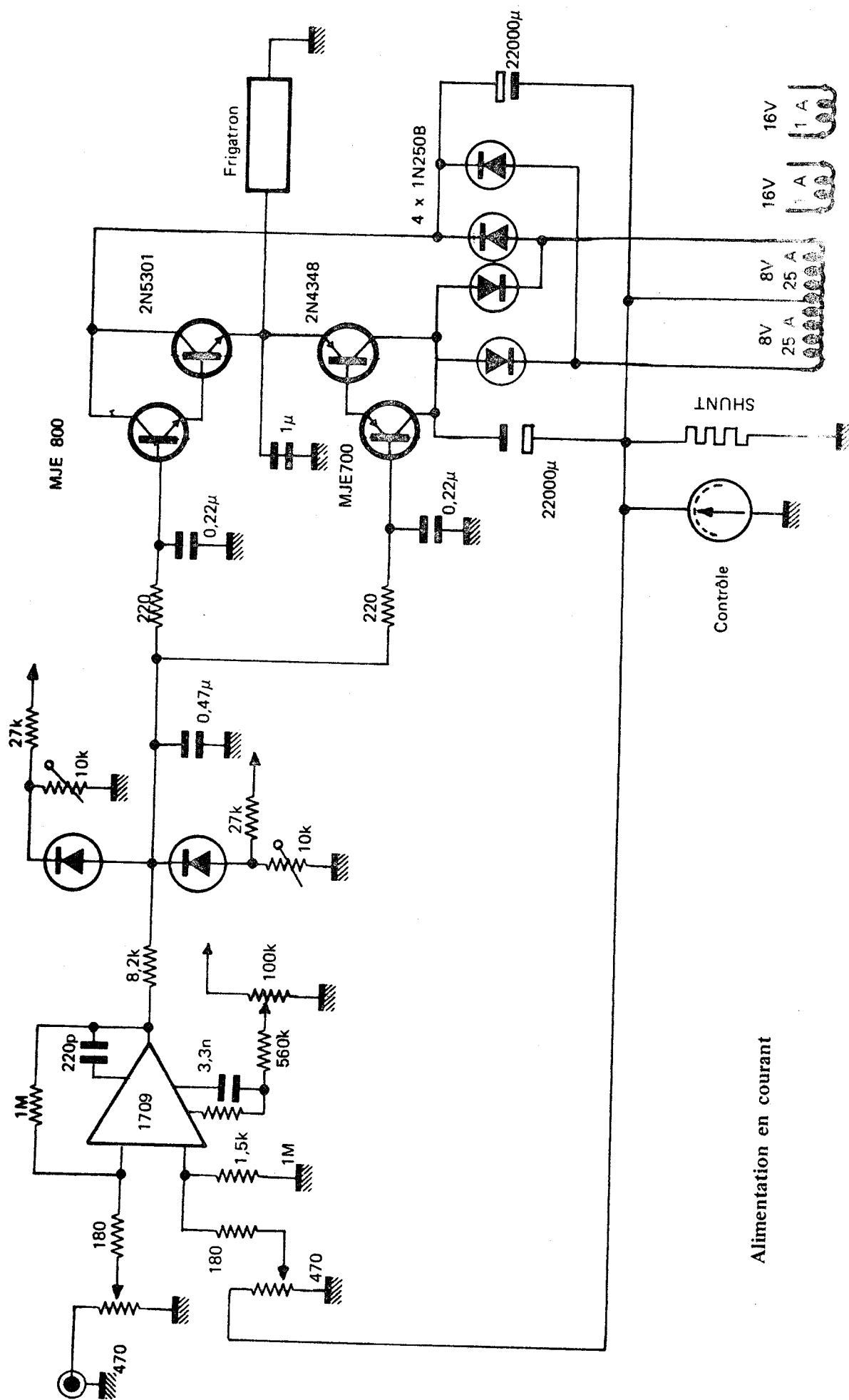


FIGURE IV 6



Régulateur PID

FIGURE IV 7



Alimentation en courant

FIGURE IV 8



stabilisation est de l'ordre de $14,75^{\circ}$. Sur la même courbe nous avons représenté l'évolution du courant traversant le frigatron en fonction du temps. On peut y voir la zone de saturation de l'alimentation (18 A), l'inversion du courant, les quelques variations au moment des dernières oscillations en température, puis les variations du courant permettant de maintenir le corps noir à la température de consigne. Après ce temps de mise en route et un temps de stabilisation de l'ordre de 10 à 15 minutes, les variations de température du corps noir sont inférieures au $1/100^{\circ}$ C. Sur les figures IV-10 et 11, nous montrons les possibilités globales de conduite en température du corps noir d'une part et, d'autre part de la température ambiante. Nous avons porté simultanément la variation de température du corps noir (T° CN) pour des échelons de consignes identiques et les variations du courant traversant le module PELTIER (IFr) emmenant la température du corps noir à sa nouvelle valeur.

Comme on peut le voir, pour une température ambiante voisine de 22° C, il est possible de régler la température du corps noir entre $+ 40^{\circ}$ C et 7° C. On peut remarquer aussi que le temps d'établissement est d'autant plus grand que la T° de consigne est éloignée de l'ambiante. La valeur IFr n'est ici portée qu'à titre indicatif car elle dépend pour une température de consigne donnée de la valeur de la T° amb.

Sur la figure IV-12 nous avons représenté la réponse en température du corps noir à un changement brutal de consigne d'abord négatif, puis positif. C'est à partir de la forme de cette réponse que l'on vérifie que le régulateur PID est à l'optimum de ses possibilités. On retrouve ici l'influence de la différence de rendement du frigatron suivant le signe du ΔT désiré. En effet, le temps d'établissement est plus rapide en chauffe qu'en refroidissement. En moyenne il faudra compter sur 25 S pour un ΔT de 2° C.

Pour mesurer les qualités de la stabilisation, nous avons procédé de la manière suivante: Le corps noir, en position dans le radiomètre est d'abord stabilisé. On fait varier brusquement la température extérieure au radiomètre et l'on mesure les variations de température du corps noir. Les résultats sont portés sur la figure IV-13. On trouve des variations de l'ordre d'environ $0,03^{\circ}$ C pour une différence de 25° C d'ambiante.

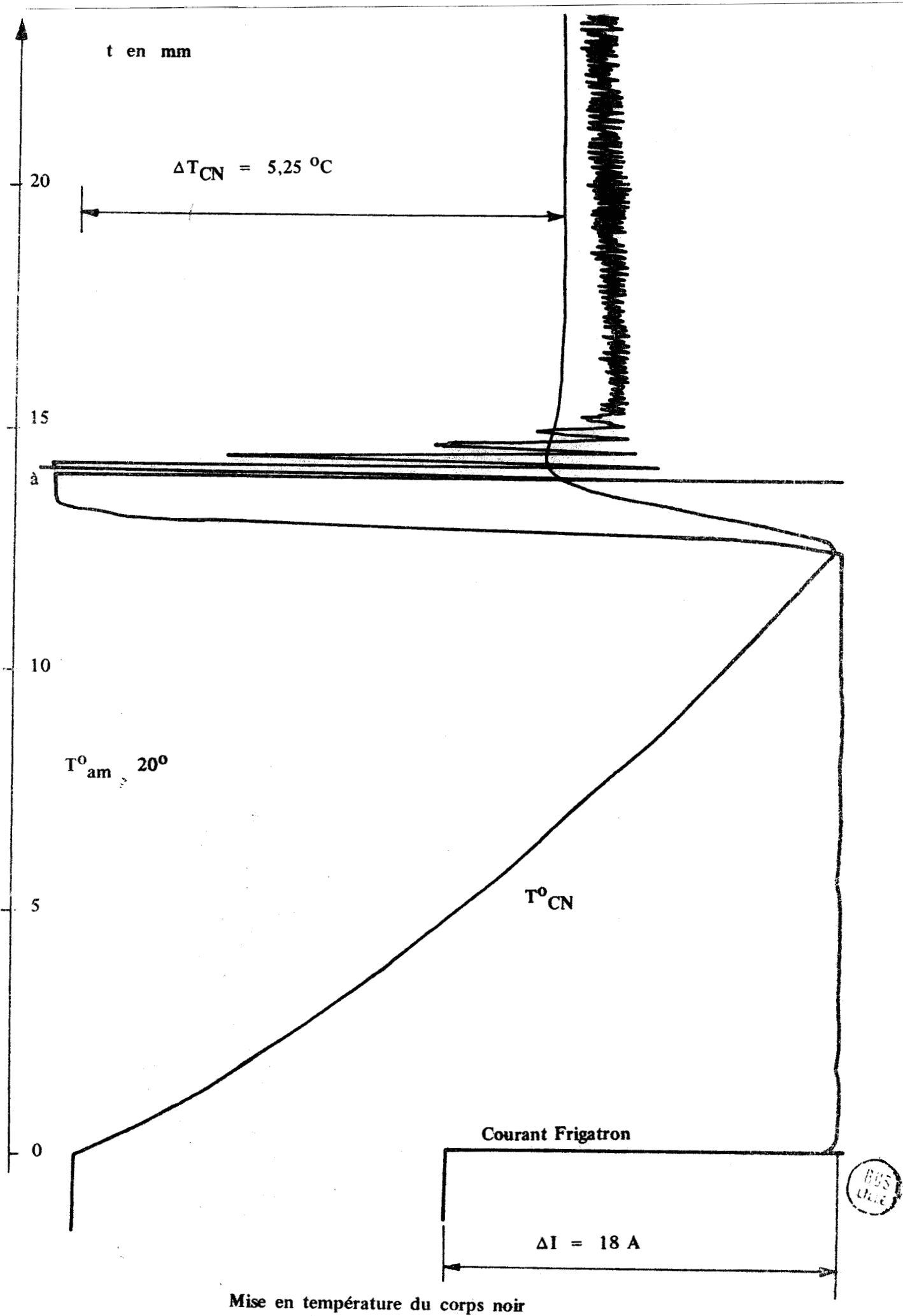
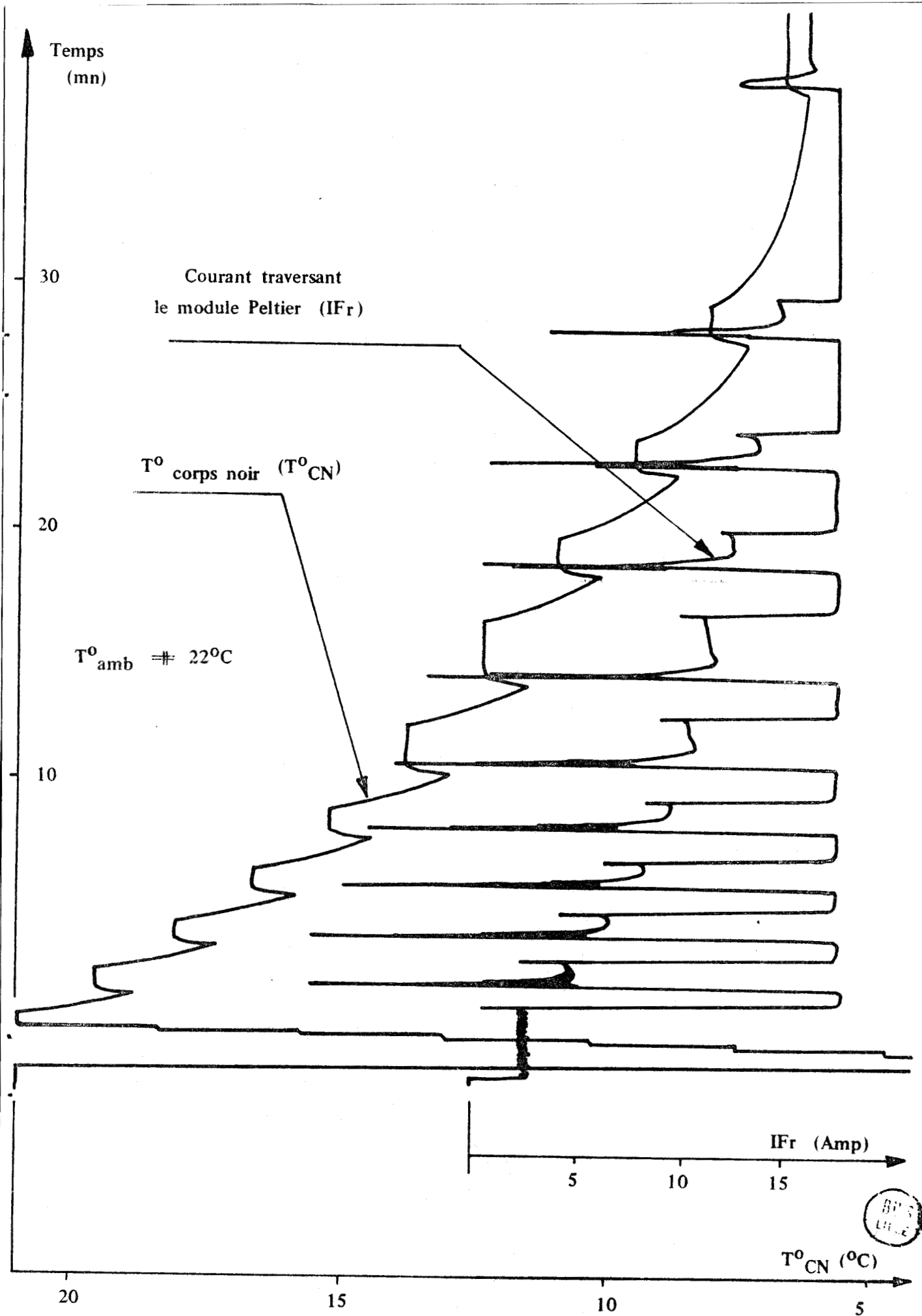
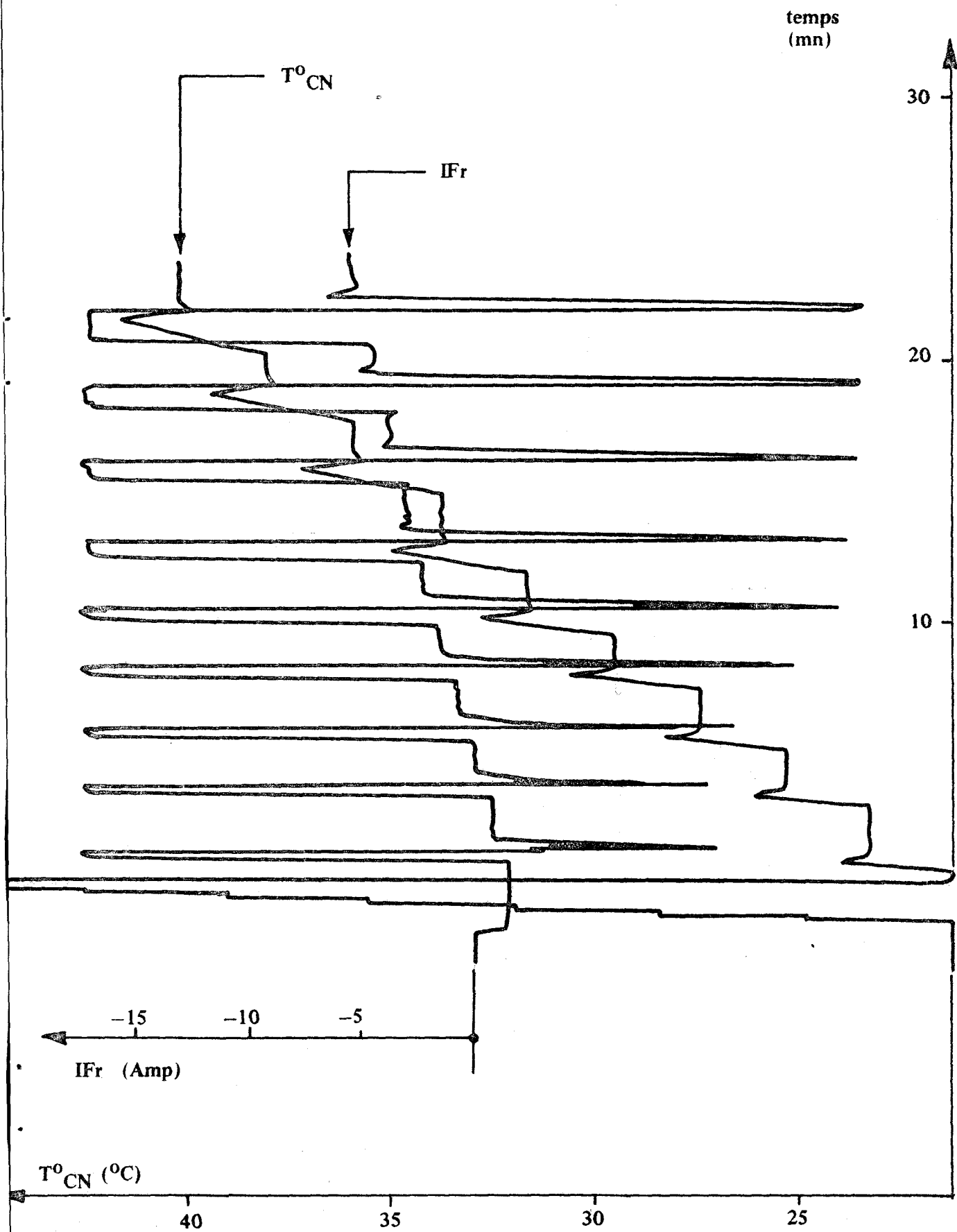


FIGURE IV 9



Stabilisation du corps noir $T^{\circ}_{CN} < T^{\circ}_{\text{amb}}$

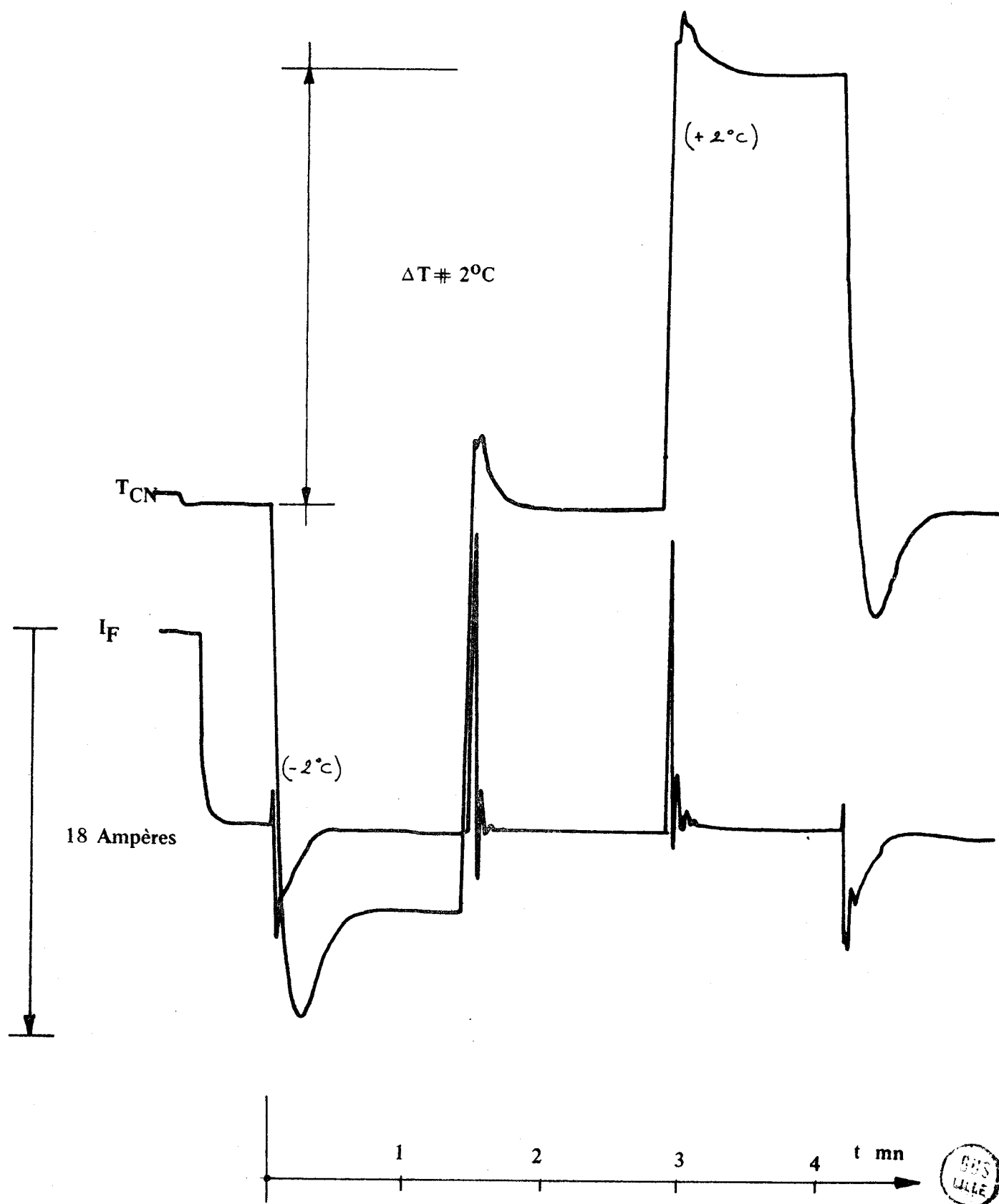
FIGURE IV 10



Essai de stabilisation du corps noir $T^{\circ}\text{CN} > T^{\circ}\text{amb}$

FIGURE IV 11





Réponse du corps noir à un changement de consigne

FIGURE IV 12

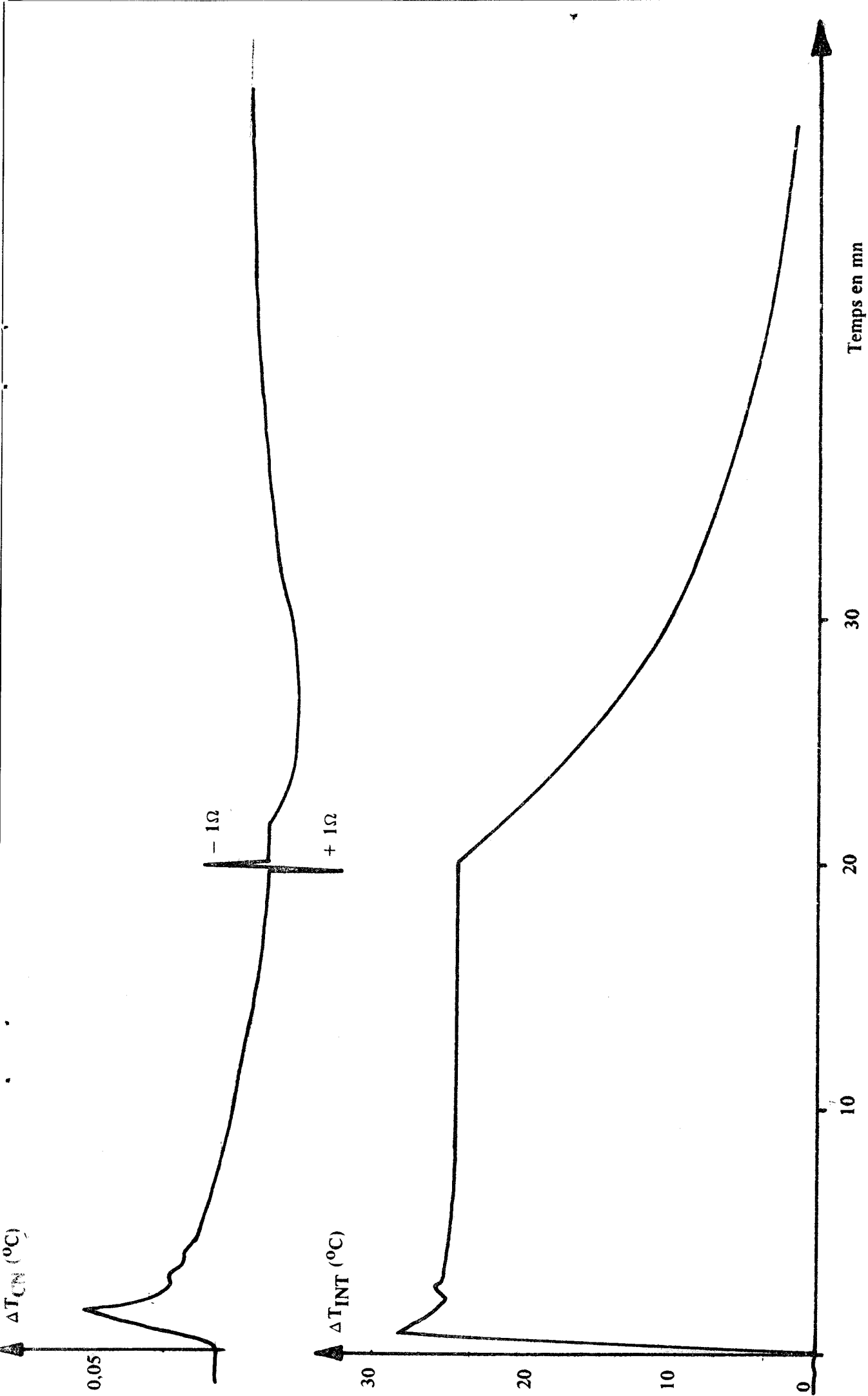


FIGURE IV 13 Contrôle de la stabilisation du corps noir

IV-3 - DISPOSITIFS ANNEXES

Base de temps, Horloge

Jusqu'à présent, pour les mesures en laboratoire, ou in situ, nous nous sommes limités à des enregistrements graphiques. En effet, dans la phase d'étude d'un matériel, il est plus facile d'appréhender les phénomènes graphiques que des enregistrements numériques qu'il faudrait de toute façon retranscrire sous formes temporelles. De manière à synchroniser les enregistrements qui peuvent être sur différents enregistreurs, nous avons mis au point une horloge, fournissant des tops de synchronisation et permettant ainsi d'avertir l'opérateur lorsqu'une séquence de mesure a pris fin.

Le schéma synoptique de la figure IV-14 montre l'ensemble du dispositif. Une horloge pilotée par le secteur ou une base de temps à 50 Hz permet, par l'intermédiaire de monostables, de fournir les tops de synchronisation toutes les minutes, les 10 minutes, ou les heures.

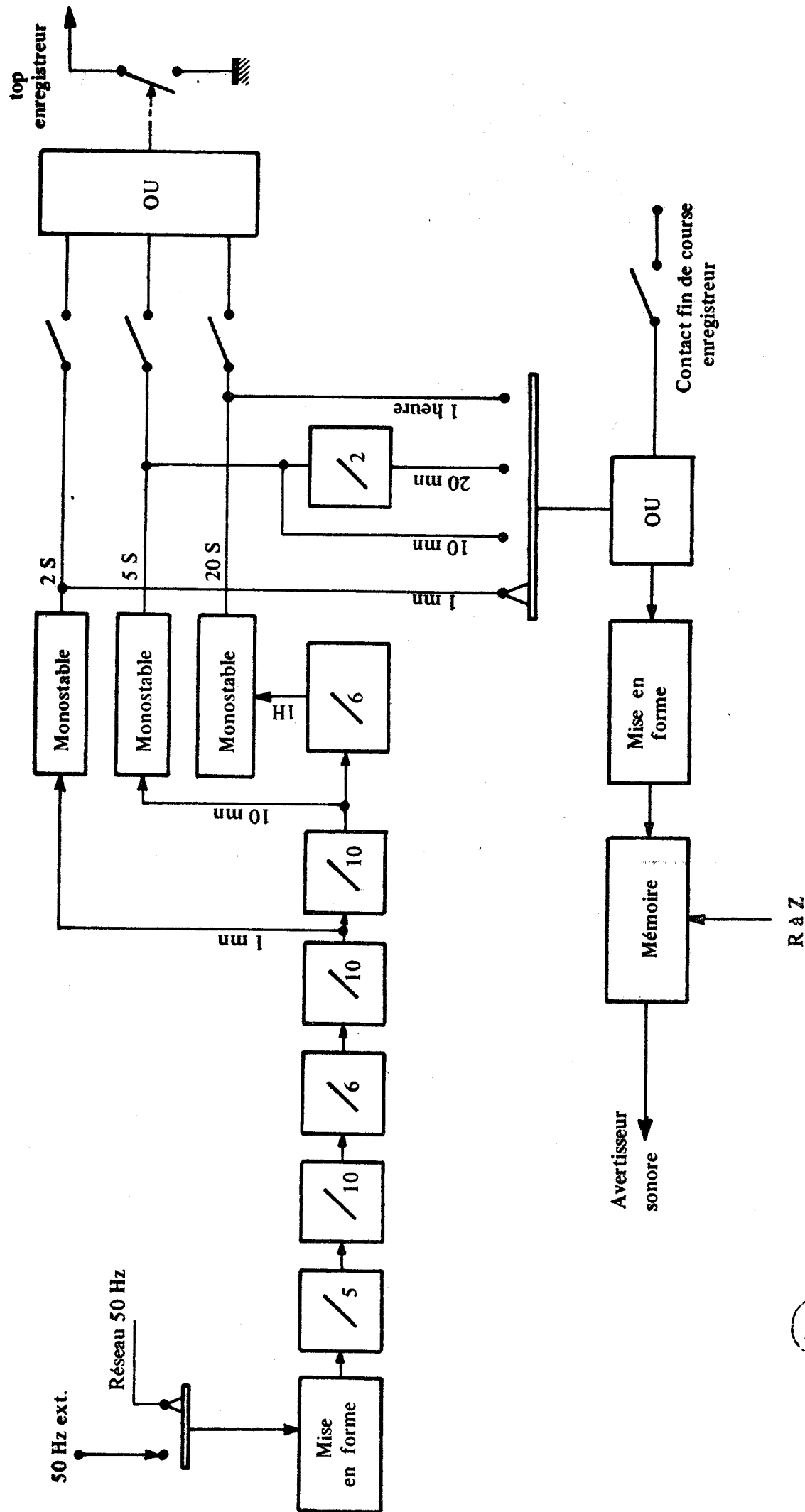
Le top des minutes est de 2 secondes, celui des dix minutes est de 5 secondes, et celui des heures est de 20 secondes.

Par ailleurs une mémoire déclenche un avertisseur sonore au choix de l'utilisateur: toutes les minutes, les 10 minutes, les 20 minutes, ou les heures.

Le signal sonore peut être aussi déclenché par les contacts de fin de course qui existent sur certains enregistreurs utilisés. La figure IV-15, 16, 17 donne le détail de la réalisation du dispositif.

Point de mesure des températures

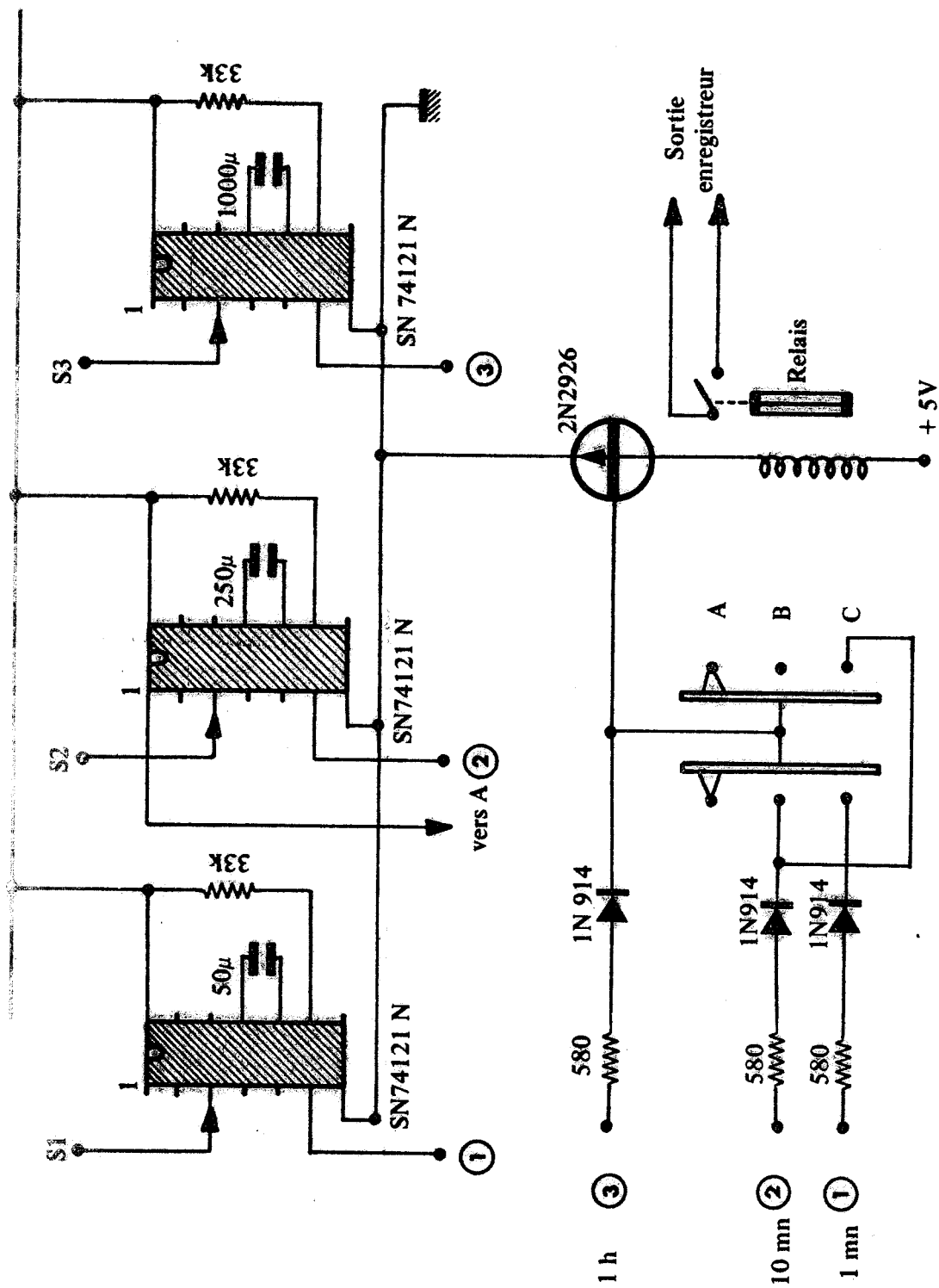
Un autre dispositif annexe permet de faire les contrôles en température du radiomètre. Il s'agit d'un pont de WHEASTONE qui permet la mesure de la résistance des CTN de contrôle. Après modulation, amplification et démodulation, le dispositif allume ou éteint deux lampes qui indiquent le sens de déséquilibre du pont. Actuellement l'équilibre se fait de façon manuelle à l'aide d'une boîte de 4 décades de résistances



Synoptique de l'horloge

FIGURE IV 15

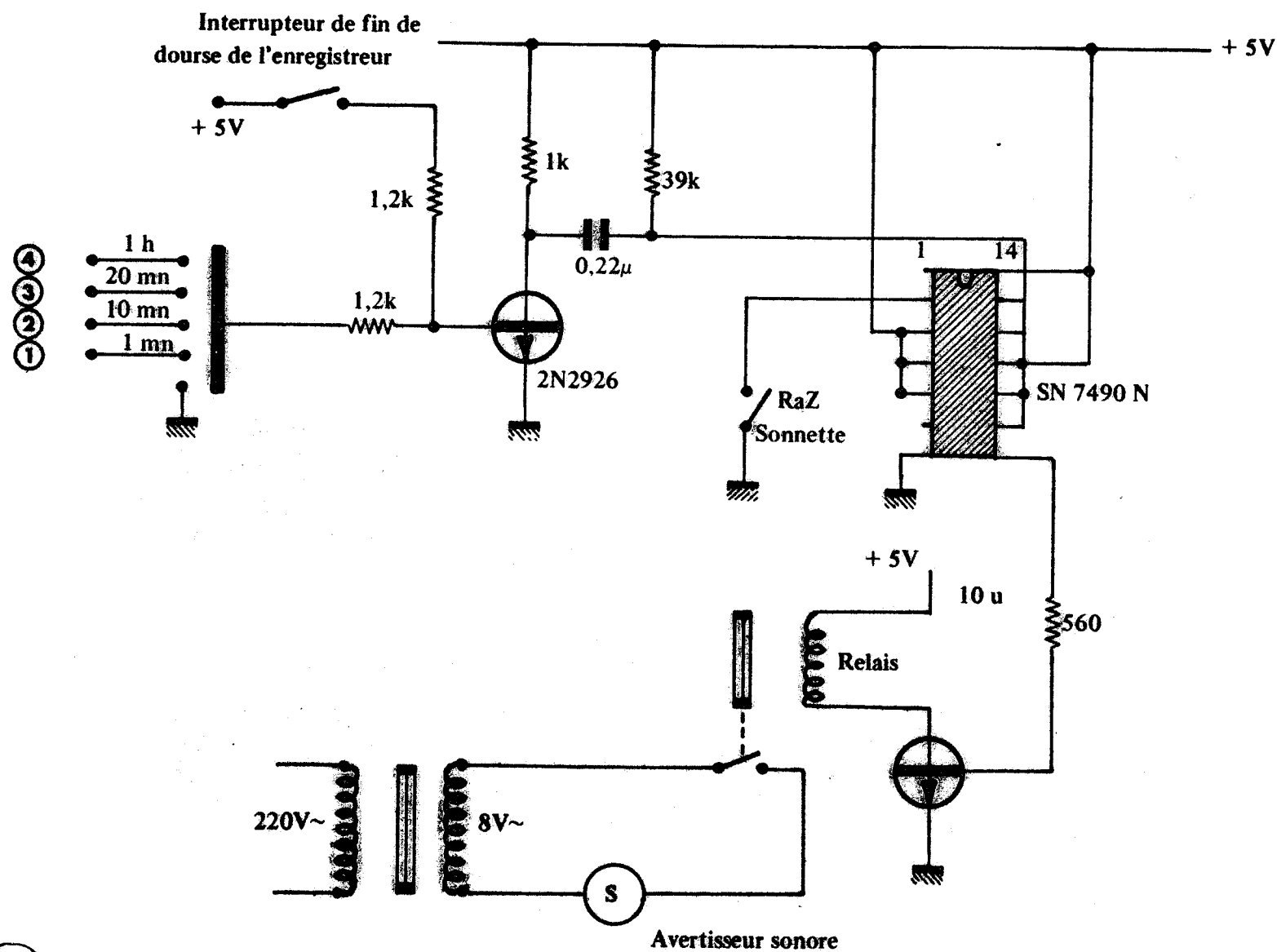




Horloge - Détail de la sortie des "tops" vers l'enregistreur

FIGURE IV 16

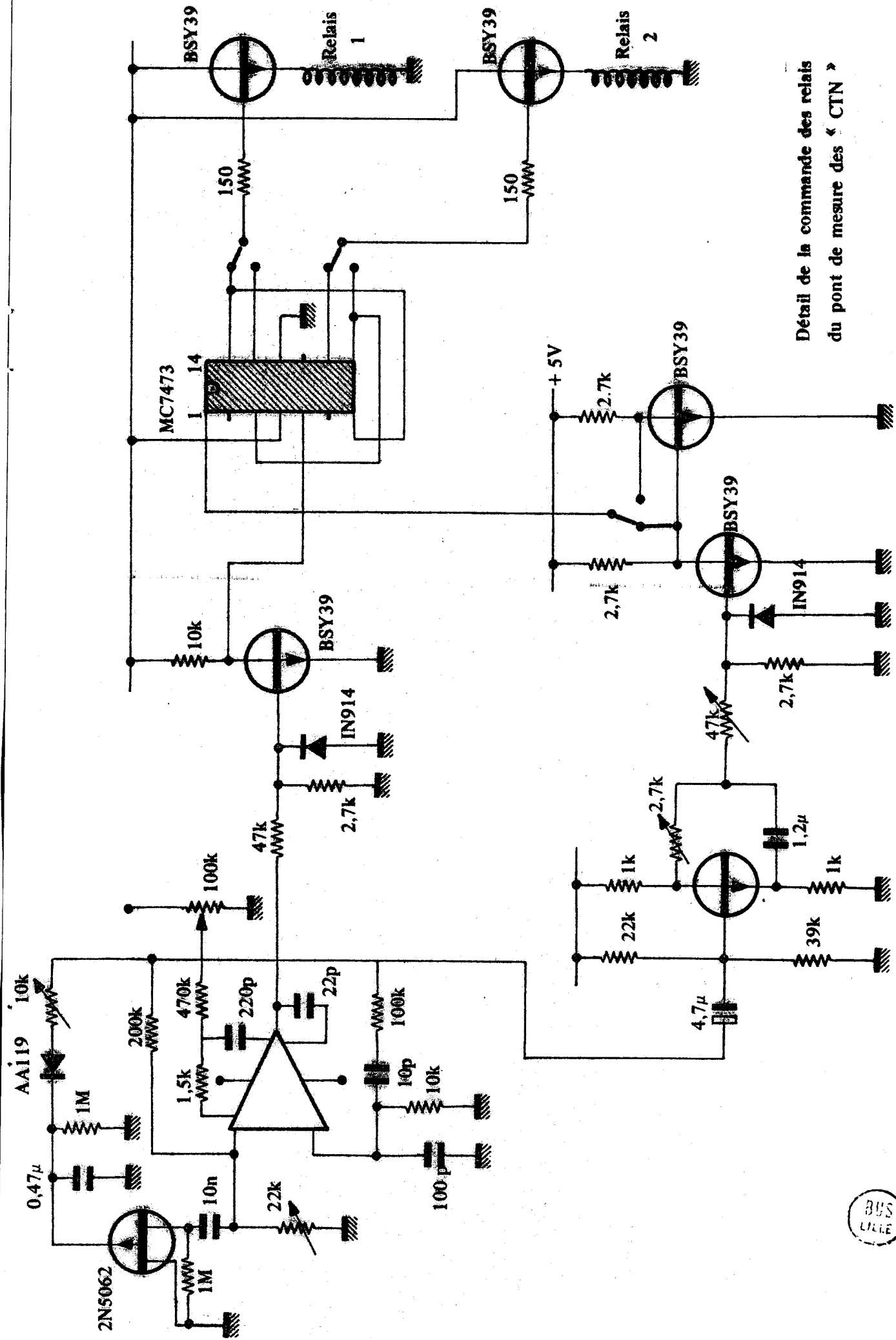




Horloge – Détail de la commande de l'avertisseur sonore.

étalon; mais la précision du dispositif ($1/10 \Omega$) permettra par la suite de commander un réseau de résistances étalons programmables et rendra la mesure automatique.

La figure IV-18,19 donne le détail de réalisation de l'ensemble du dispositif.



Détail de la commande des relais
du pont de mesure des « CTN »

FIGURE IV 18

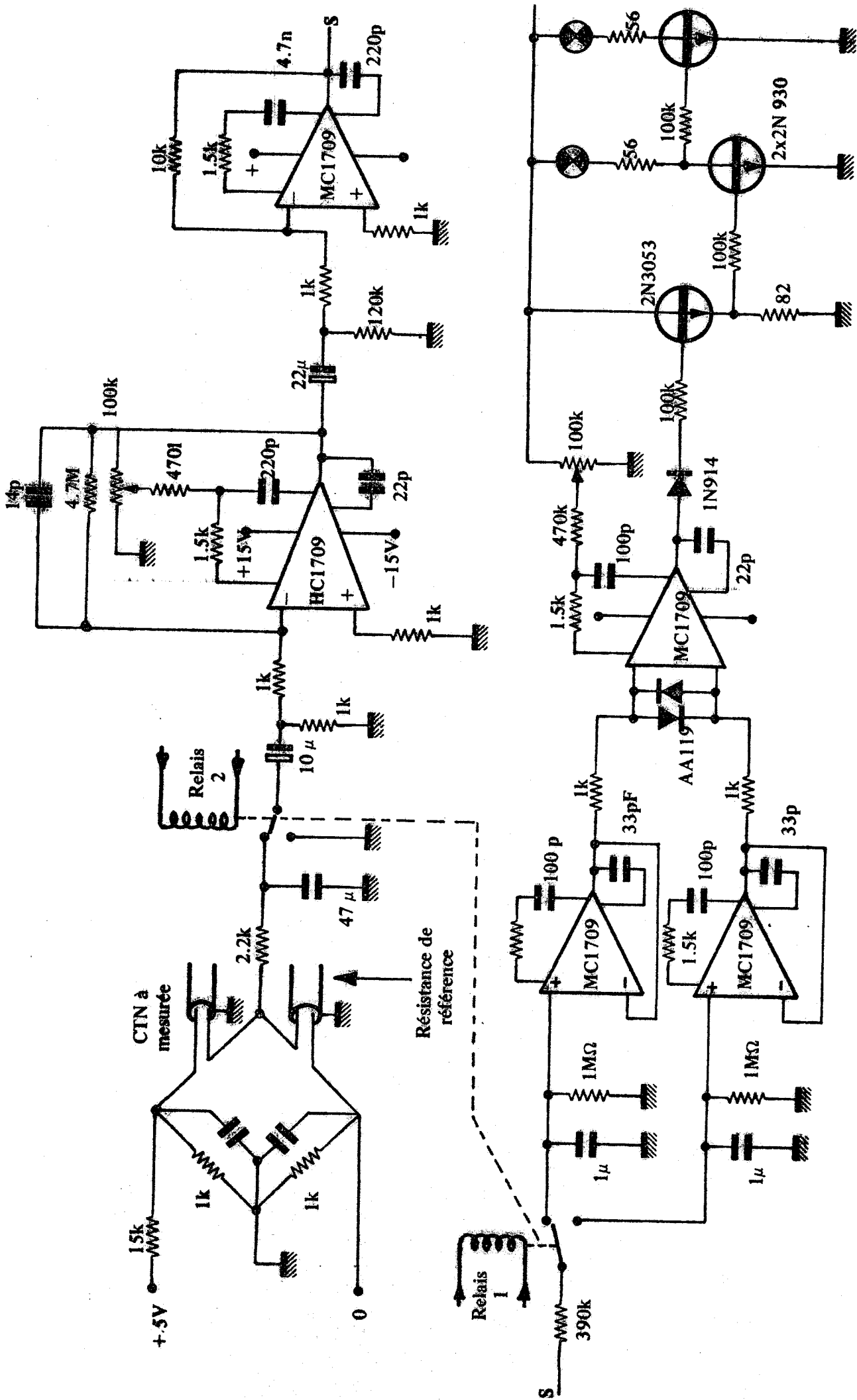


FIGURE IV 19 Pont de mesure des "C.T.N." de contrôle

BUS
LILLE

CHAPITRE V

ESSAIS DU RADIOMETRE

V-1 - MESURE DE LA SENSIBILITE DU RADIOMETRE

La mesure de la sensibilité du radiomètre se fait de la façon suivante :

On fait viser par le radiomètre un corps noir étalon de laboratoire. Ce corps noir se compose d'un bocal en cuivre qui est plongé dans une cuve d'eau isolée thermiquement de l'air ambiant. L'eau de cette cuve est brassée énergiquement de manière à éviter les gradients de température dans l'eau. La température de l'eau est portée à une valeur proche de celle de l'air ambiant, de manière à ne pas avoir un trop grand gradient de température dans le cuivre. Ce bocal a été soigneusement enduit à l'intérieur d'une couche de peinture anti-reflet assurant à ce corps noir une émissivité très voisine de l'unité.

On amène ensuite la température du corps noir interne au radiomètre à une valeur aussi voisine que possible de celle à mesurer. Le signal de sortie est alors voisin de zéro.

Ensuite, en faisant varier la température du corps noir étalon, on pourra déterminer, sur un enregistreur par exemple, le nombre de mm de déviation par degrés (ou sensibilité) et, en mesurant la largeur en mm de la trace à chaque constante de temps, déterminer la précision de l'appareil en °C.

Sur la figure V-1, on montre les résultats obtenus avec le radiomètre visant le corps noir étalon. On voit que l'on obtient environ 80 mm pour 1°C, et une imprécision de l'ordre de 3 mm pour la constante de temps 3, 2 mm pour la constante de temps 2, 1 mm pour la constante de temps 1.

Ce qui donne :	0,014°C	pour une constante de temps de 1 s(3)
	0,009°C	" " 5 s(2)
	0,005°C	" " 15 s(1)

Sur cette même fréquence nous avons reporté les enregistrements des tensions de sortie de la chaîne d'amplification, en court circuitant l'entrée de l'amplificateur (zéro ampli), en mettant à l'entrée de l'amplificateur une résistance équivalente à l'impédance de sortie du détecteur (2 k Ω sans alimentation), en branchant sur cette résistance l'alimentation servant à la polarisation du détecteur (2 k Ω

Contrôle

Zéro

Zéro ampli

2 k Ω sans alimentation

2 k Ω avec alimentation

Détecteur polarisé

(Zéro optique)

$T_{\text{eq}} = 17^{\circ}96$

Cst 3

Cst 2

Radiomètre
visant un corps noir
étalon

Cst 1

Cst 3

$T_{\text{eq}} = 18^{\circ}98$

Cst 2

Cst 1

$\Delta T_{\text{eq}} = 1.02^{\circ}\text{C}$

Etalonnage et mesure du bruit du radiomètre

FIGURE V 1



avec alimentation), puis en branchant le détecteur polarisé Cst (le détecteur étant alors placé dans une enceinte thermostatée hors du radiomètre). Comme on peut le voir le bruit en température observé est indépendant de la chaîne d'amplification et provient du détecteur.

Dans la pratique, lors de mesure in situ, et dans le cas de l'utilisation du radiomètre en corps noir stabilisé. Nous fixons la température du corps noir interne à une valeur proche de la température moyenne que l'on trouvera lors des mesures. Puis, en faisant varier la température du corps noir étalon autour de cette valeur, nous traçons une courbe représentant le nombre de divisions de l'enregistreur, en fonction de la température du corps noir étalon. Cette courbe nous sert d'étalonnage lors du dépouillement des mesures.

V-2 - MESURE DU CHAMP DE VISEE DE L'APPAREIL

La vérification du champ de visée d'un appareil infrarouge n'est pas très facile. Il existe plusieurs méthodes (plaques chauffantes - fil chaud - source ponctuelle).

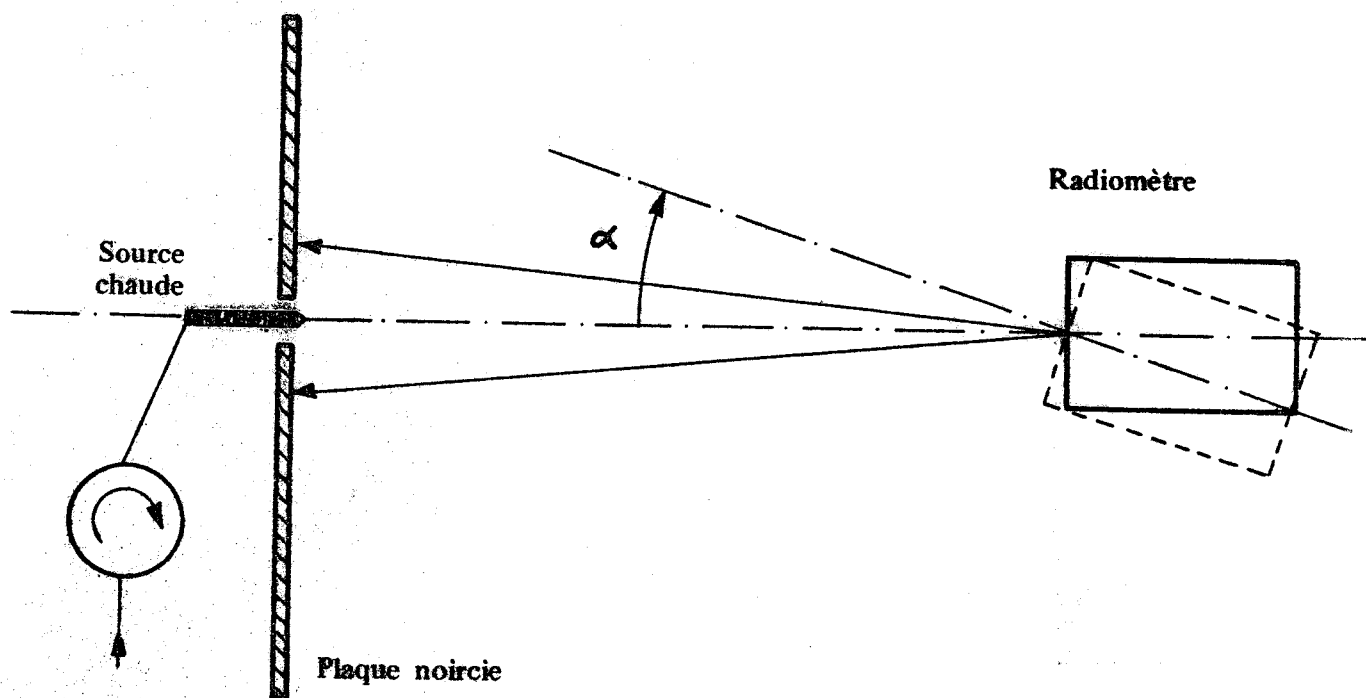
Dans notre cas nous avons procédé de la façon suivante (fig. V-2): On vise, à l'aide du radiomètre, une source chaude ponctuelle (par exemple l'extrémité de la panne d'un fer à souder) placée au centre d'une plaque absorbante dans l'infrarouge. On règle la température de la source chaude de manière à ne pas saturer la chaîne amplificatrice du radiomètre. On fait ensuite pivoter le radiomètre autour de son axe de visée et l'on relève les différentes valeurs de la température apparente observée. Les résultats peuvent se représenter sous la forme d'un rapport entre la différence de température $T_{app}(\alpha) - T_{app}^{*}(\min)$ et la différence totale observée $T_{app}(\max) - T_{app}^{*}(\min)$.

L'angle de visée d'un appareil est généralement défini à mi-énergie (c'est à dire 50 %).

Au cours de la manipulation, il est important que la source chaude n'échauffe pas le reste de la surface visée.

Les résultats sont portés sur la figure V-3.

Comme on peut le voir, l'angle total est voisin de 5°.



Mesure de l'angle de visée du radiomètre

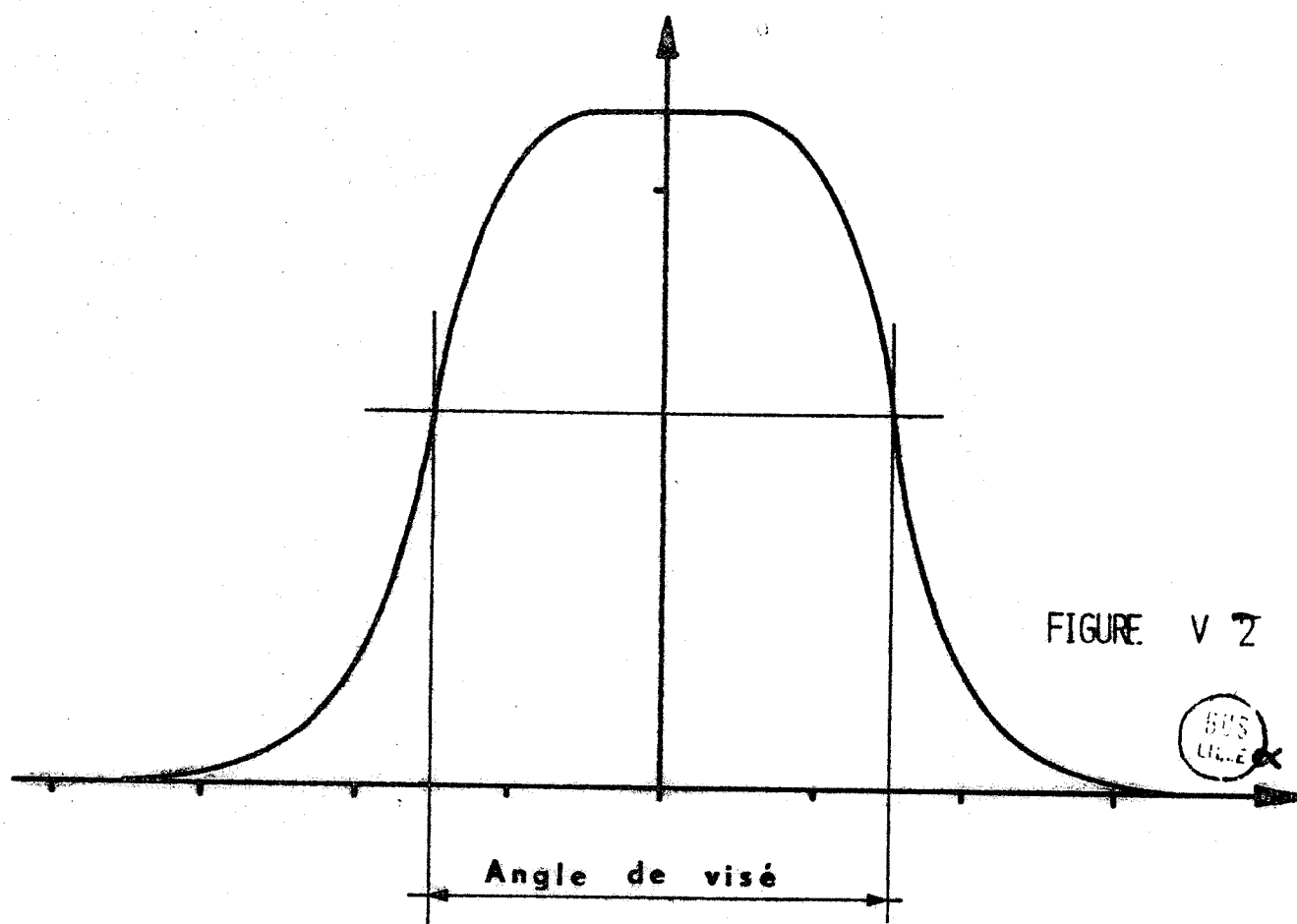
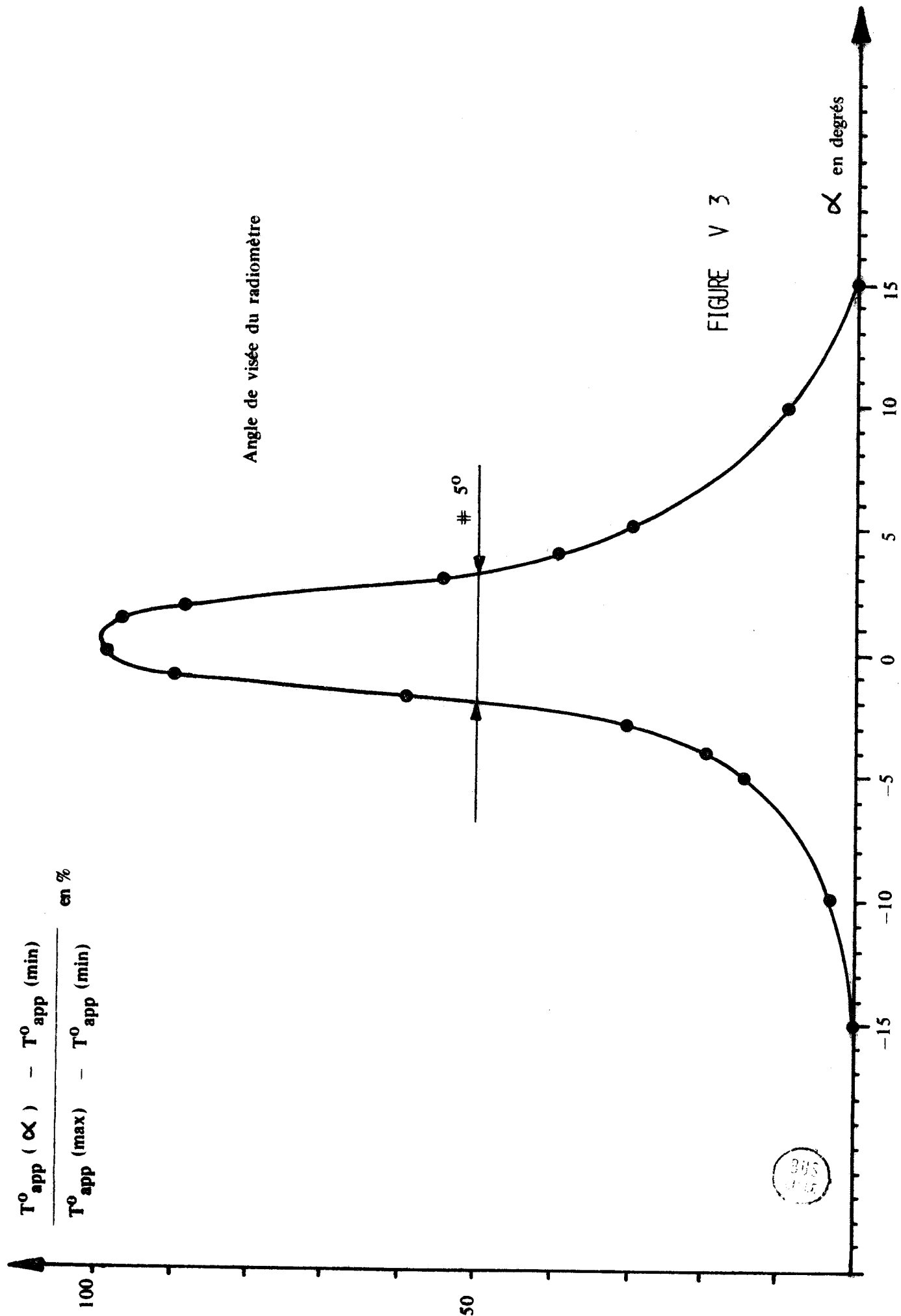


FIGURE V 2





V-3 - MESURE DES AVANTAGES DU RADIOMETRE POLARISANT (8) (16)

Pour tester les avantages apportés par l'emploi d'un polariseur, nous avons procédé à trois expériences; deux en laboratoire sur une cuve d'eau, une en mer à l'occasion d'une expérience assistance à la pêche au large d'Abidjan pour le compte de ORSTOM.

La première expérience en laboratoire est illustrée par la figure V-4. On fait viser par le radiomètre l'eau d'une cuve dont on mesure la température et que l'on brasse énergiquement pour maintenir une température uniforme. Le rayonnement réfléchi provient d'une plaque noircie maintenue à une température supérieure, d'environ 30°C , à celle de l'eau.

La mesure de la température radiométrique apparente de surface est faite successivement sans polariseur et avec le polariseur pour les deux vibrations, parallèle et perpendiculaire au plan d'incidence.

La différence $\Delta T = T_{\text{app}} - T_{\text{eau}}$ est mesurée à divers angles d'incidence i (fig. V-6).

On peut ainsi vérifier que l'erreur de réflexion est minime pour un angle d'environ 50° , pour la vibration perpendiculaire comme prévue théoriquement (fig. V-6).

La deuxième expérience nous permet de vérifier qualitativement ce résultat, dans le cas d'une mesure de la température de l'eau d'une cuve éclairée par le ciel; on est alors dans les conditions réelles pour toute surface d'eau sans vagues.

Deux radiomètres, un sans polariseur (BARNES PRT5) et le radiomètre polarisant (RALI) visent simultanément la surface de l'eau à 50° et reçoivent par réflexion, la même énergie venant du ciel.

Parallèlement, cette énergie est mesurée à l'aide d'une thermopile. Comme on peut le voir sur la figure V-7, l'erreur de réflexion pour le radiomètre polarisé est de l'ordre du bruit thermique de la surface de l'eau. Par contre, on voit très bien sur le radiomètre sans polariseur, l'influence des variations de l'énergie venant du ciel. Ces variations principalement dues aux passages de nuages entraînent des ΔT de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$ pour un ciel passant successivement de clair à nuageux.

Pour être juste, il faut préciser que cette comparaison est un peu à la faveur du radiomètre polarisant, car l'autre radiomètre devrait théorique-

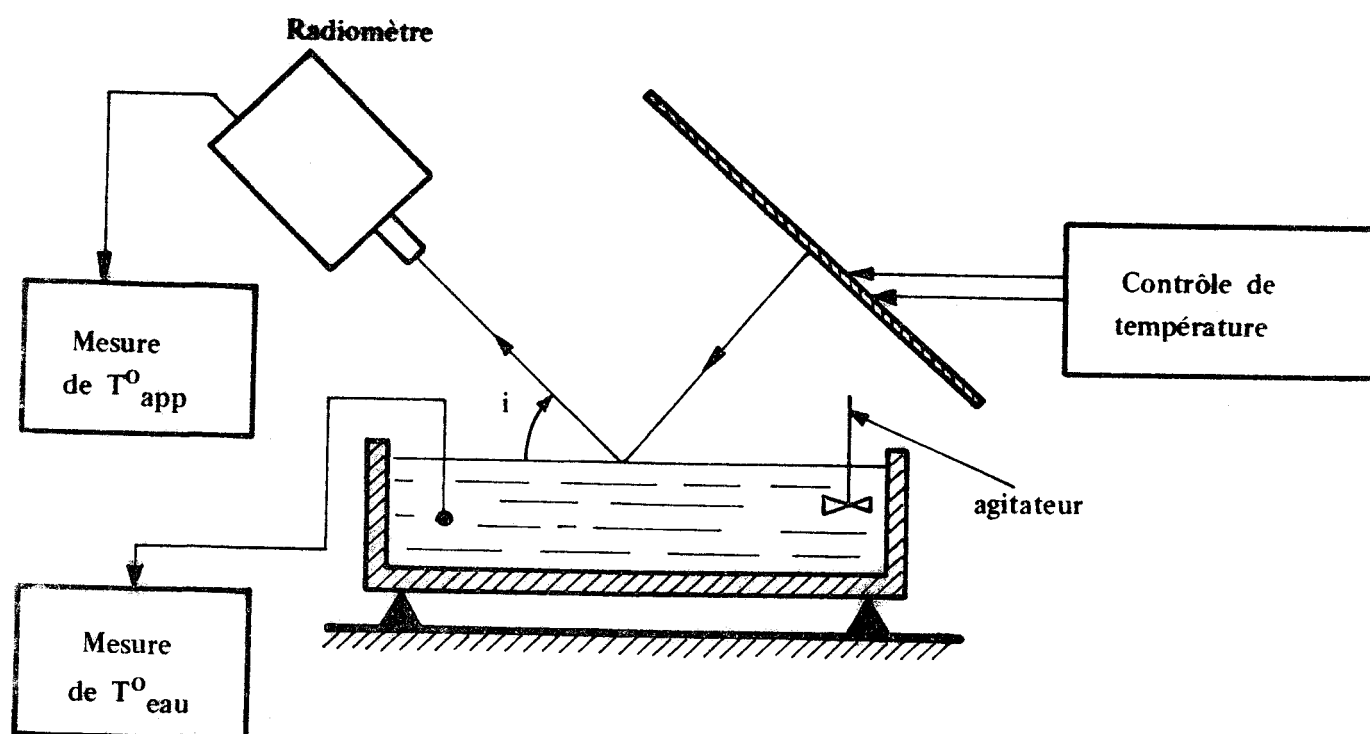
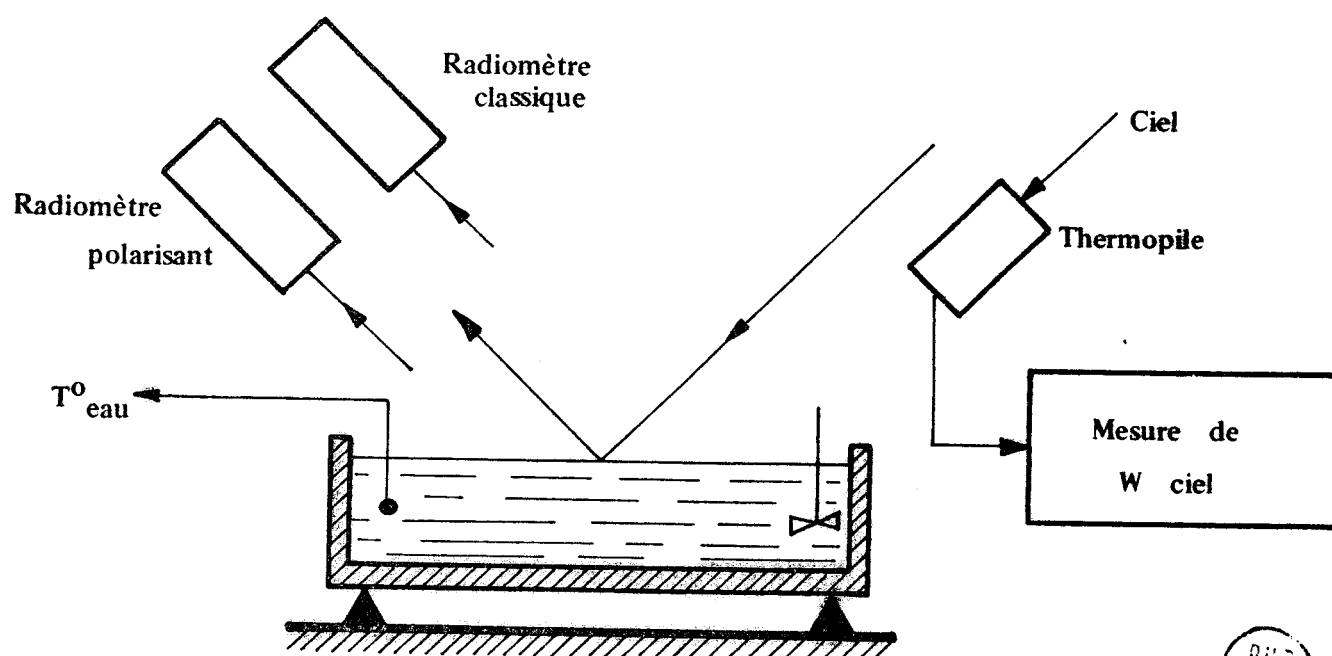


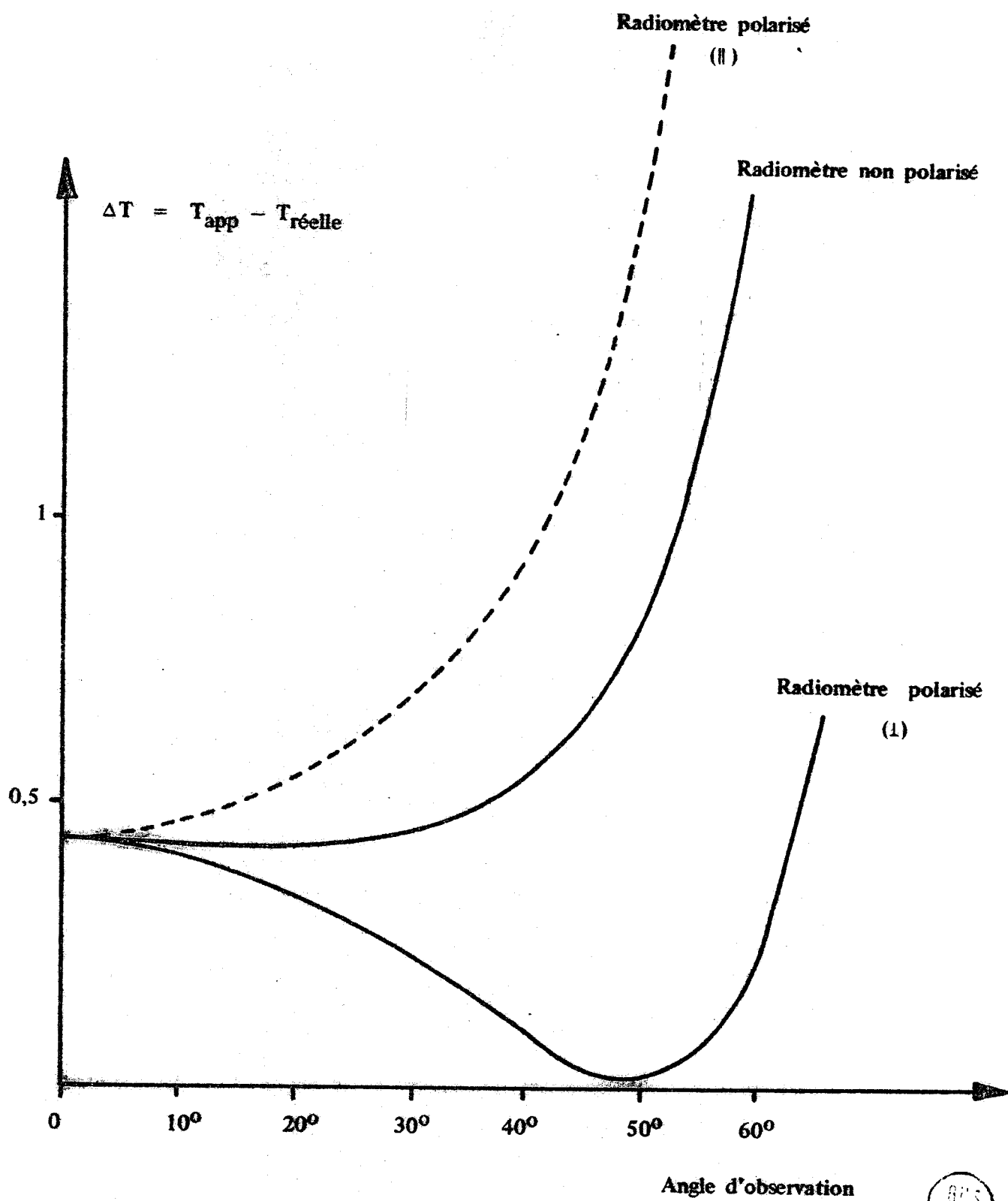
FIGURE V 4



Essais du radiomètre polarisant

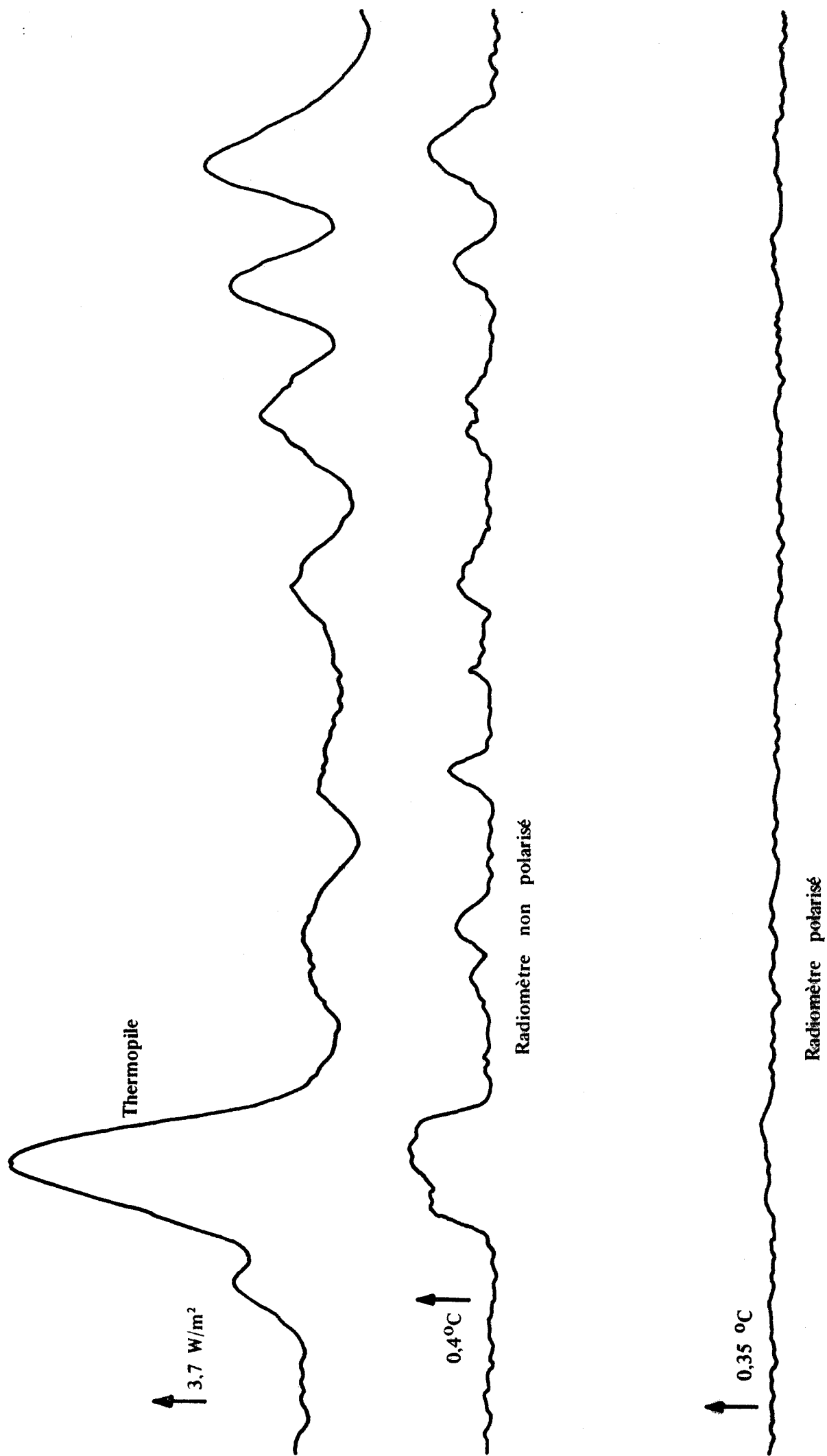
FIGURE V 5

BUS
LILLE



Mise en évidence des propriétés polarisantes d'une surface d'eau plane.

FIGURE V 6



Erreurs de réflexion à la surface de l'eau

ment viser à la verticale ; on a déterminé par d'autres mesures et par le calcul (réf. 4) (voir fig. V-6) que le rapport entre l'erreur mesurée au radiomètre non polarisant visant à la verticale puis à 60° est de 1,3. On a choisi, dans l'expérience, de donner la même inclinaison aux deux radiomètres, car il n'est pas certain que la partie du ciel visée présente la même couverture nuageuse au même moment, si l'un des radiomètre vise à la verticale et l'autre à 50°.

V-4 - ETUDE DES DERIVES A LONG TERME

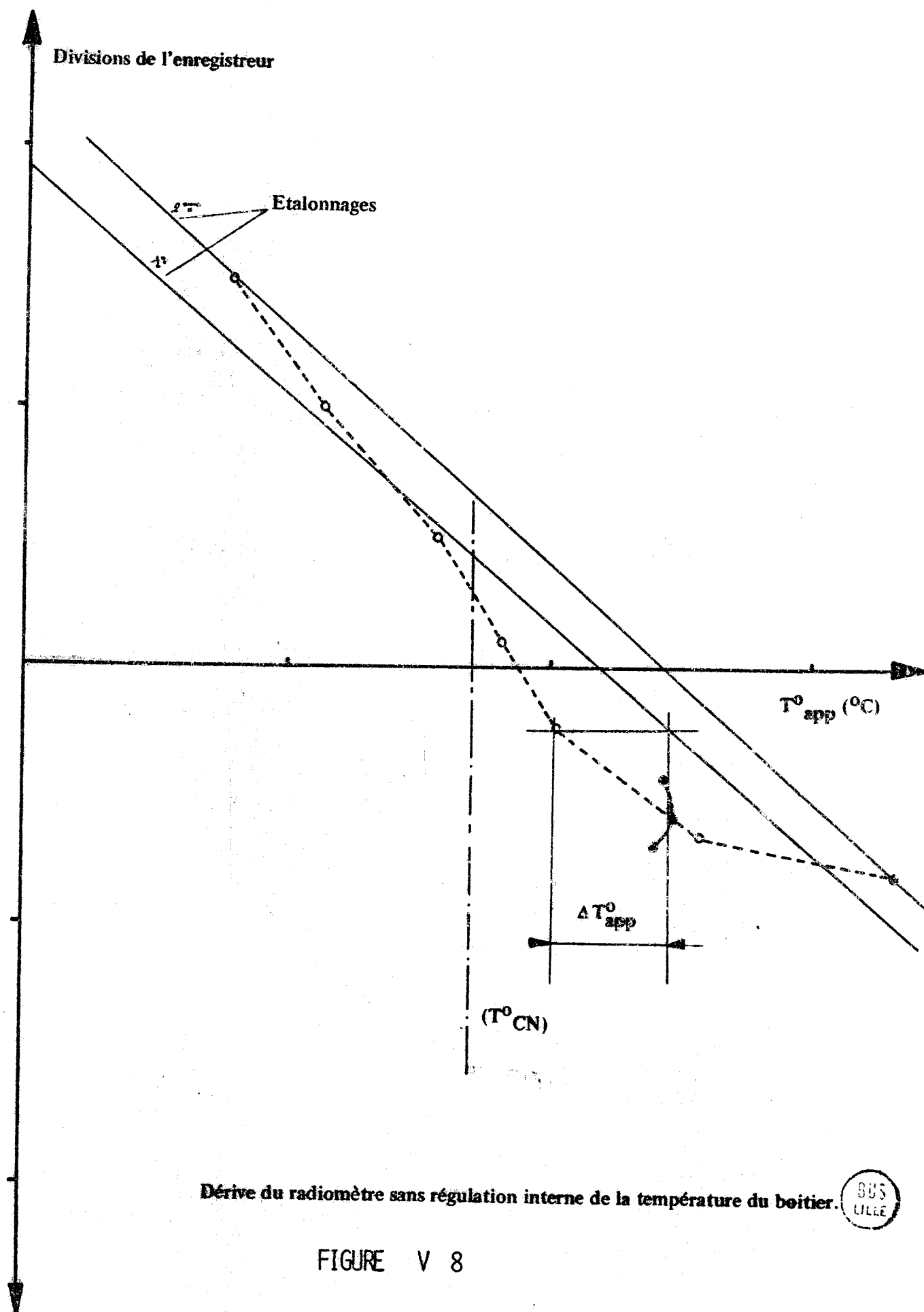
Nous venons de voir au §V-1 la précision maximum qu'il faut attendre du radiomètre.

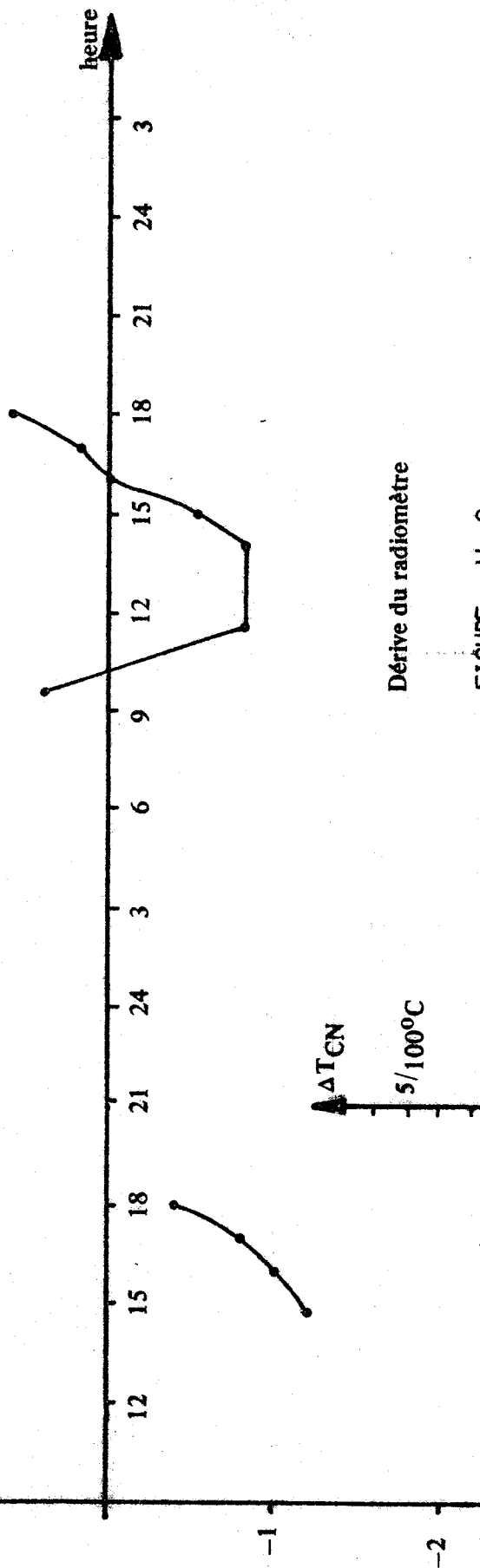
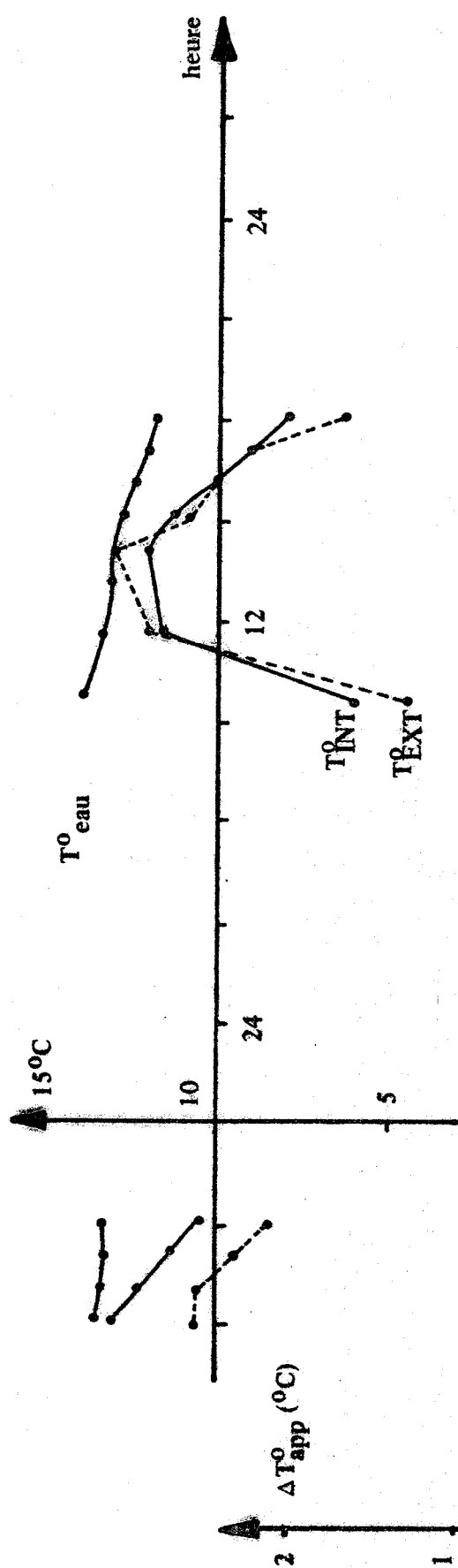
Cette valeur indique le seuil des variations de température apparente que l'on peut déceler à l'aide du détecteur. Mais ces variations de température apparente ne sont pas dues uniquement aux variations de température de la source à mesurer. En effet comme on l'a vu aux §III-5 et III-6, le modulateur et le corps noir introduisent des variations parasites chaque fois que la température au voisinage de ces éléments varie, bien que nous ayons réduit ces erreurs au minimum. Nous avons mis en évidence ces variations de la façon suivante: le radiomètre est installé à l'extérieur, au dessus d'un corps noir étalon, de manière à laisser une libre circulation de l'air entre l'ouverture du corps noir et celle du radiomètre.

On effectue un premier étalonnage nb division = $f(T_{\text{eau}} = T_{\text{app}})$, puis périodiquement on note la température de l'eau, celle du corps noir étalon (T_{eau}), la température interne du radiomètre (T_{INT}), la température extérieure (T_{EXT}), la température du corps noir interne du radiomètre (T_{CN}) et le nb de divisions et l'écart de température apparente que l'on trouve par rapport à la droite d'étalonnage initiale (ΔT_{app}) appelé par la suite "dérive".

Ces valeurs sont reportées sur les figures V-8 et 9. On peut y voir que la dérive est très importante par rapport à la précision relative de l'appareil; qu'elle est fortement corrélée avec la température extérieure et intérieure du radiomètre.

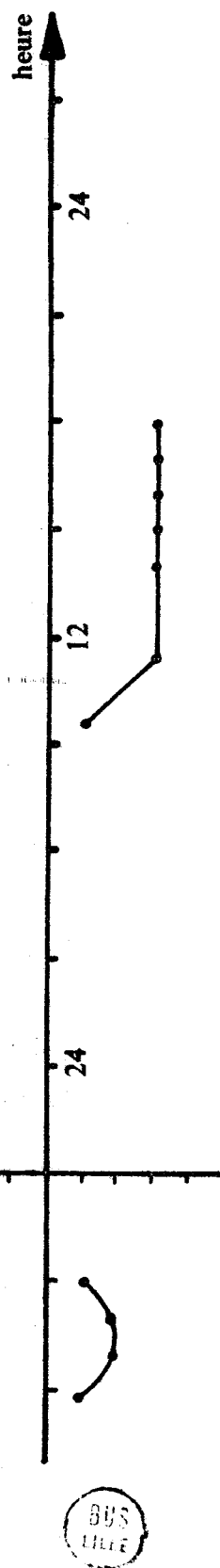
On retrouve ici toute l'utilité de stabiliser la température interne.





Dérive du radiomètre

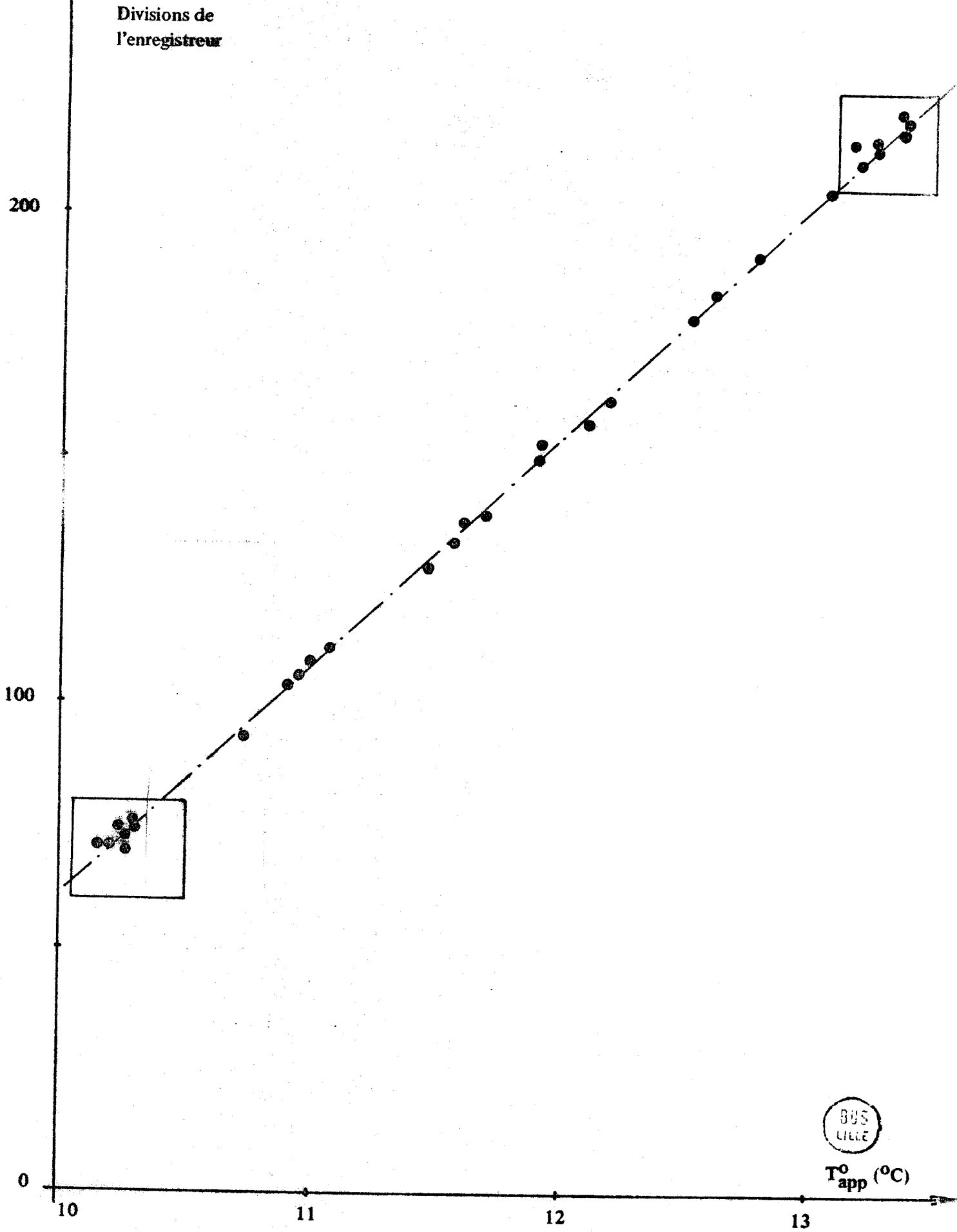
FIGURE V 9



BUS
11111

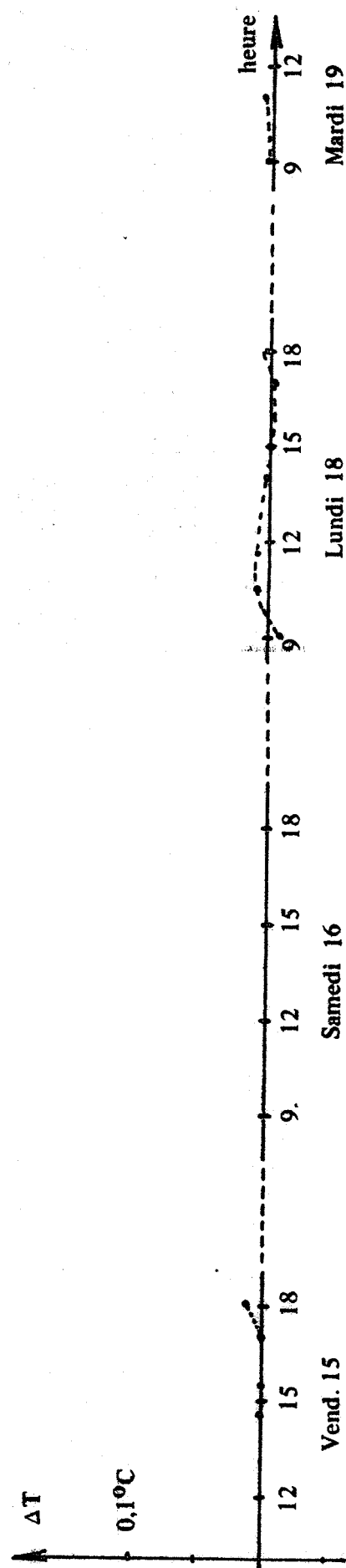
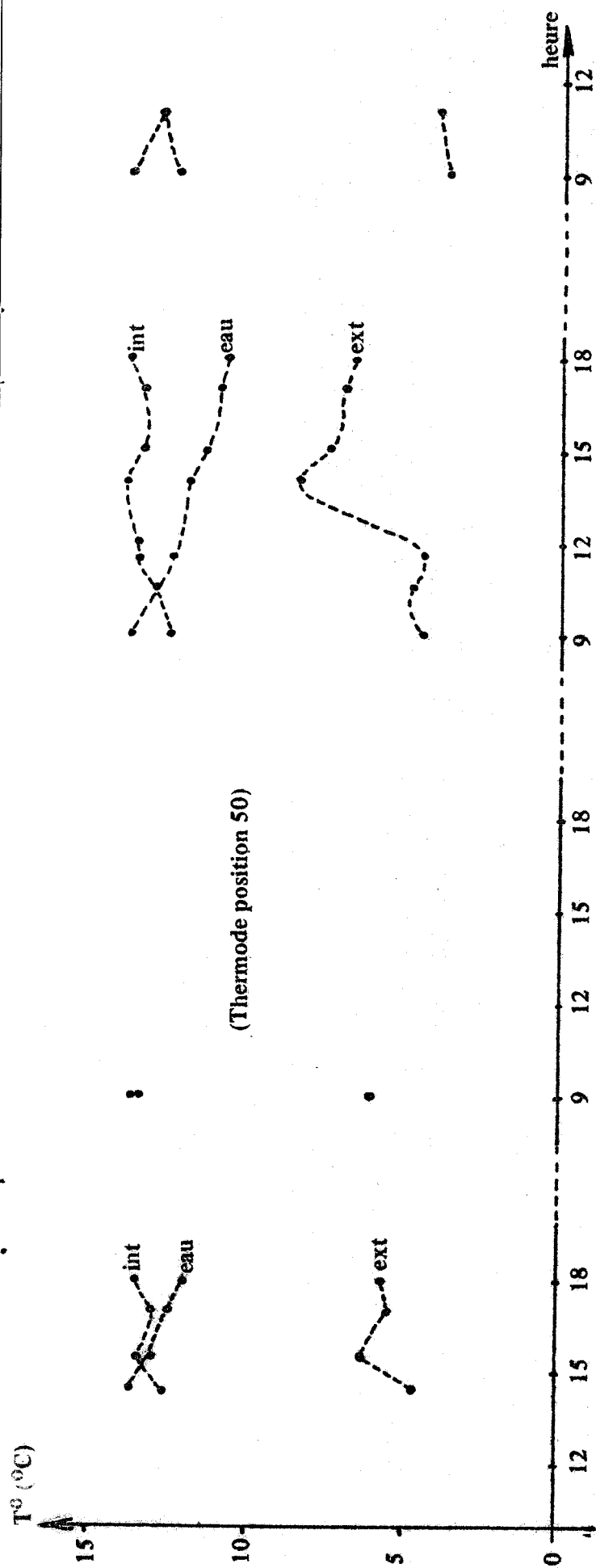
C'est ce qui a été fait dans l'expérience suivante: à l'aide d'un système de régulation proportionnel, nous avons maintenu la température du boîtier relativement stable et nous avons renouvelé les mesures précédentes, en faisant matin, midi et soir un étalonnage; mais en calculant ΔT_{app} par rapport au premier étalonnage de l'expérience, les résultats sont reportés (fig. V-10 et 11). On peut voir que la dispersion des points est plus grande près des points d'étalonnage. Ceci semble dû aux gradients de température à l'intérieur du corps noir étalon. Une autre expérience est venue confirmer cette hypothèse. En effet, nous avons mesuré en permanence le rayonnement issu du corps noir et reporté (fig. V-12) l'ensemble des points de mesure comme on peut le voir sur l'espace de 40 heures environ, la dérive est de l'ordre de $\pm 0,1^\circ \text{C}$ pour des variations de la température ambiante d'environ 10°C et pour une stabilisation de la température ambiante intérieure du radiomètre de $23^\circ \text{C} \pm 1^\circ \text{C}$. Par ailleurs, en laboratoire, nous avons mesuré l'influence de la température interne du radiomètre. Pour cela, on vise un corps noir étalon et après étalonnage, on varie fortement et rapidement la température interne du boîtier, et on note le ΔT_{app} (fig. V-13). On retrouve sensiblement $0,15^\circ \text{C}$ pour 10°C ce qui fait que, dans l'expérience précédente, la dérive n'aurait dû être que de $0,015^\circ \text{C}$. D'autres techniques doivent être mises en pratique pour affiner ces mesures de dérive qui pour l'instant apparaissent de l'ordre de $\pm 0,1^\circ \text{C}$ à long terme.

Nous avons par ailleurs, profité, au cours de cette série de mesure, de tester la réponse du corps noir aux coups de vent. La figure V-14 montre le résultat de cet essai. Le vent était, comme on le voit particulièrement violent pour la région, avec des pointes de 45 noeuds. Le radiomètre était disposé sur un support à 45° et n'était pas spécialement protégé des bourrasques. Comme on peut le voir, la température du corps noir accuse les coups de vent, mais reste dans des limites tout à fait admissibles pour une bonne précision de l'appareil.



Dérive du radiomètre avec régulation de la température interne du boîtier.

FIGURE V 10



Contrôle de l'efficacité de la régulation de la température du boîtier

FIGURE V 11

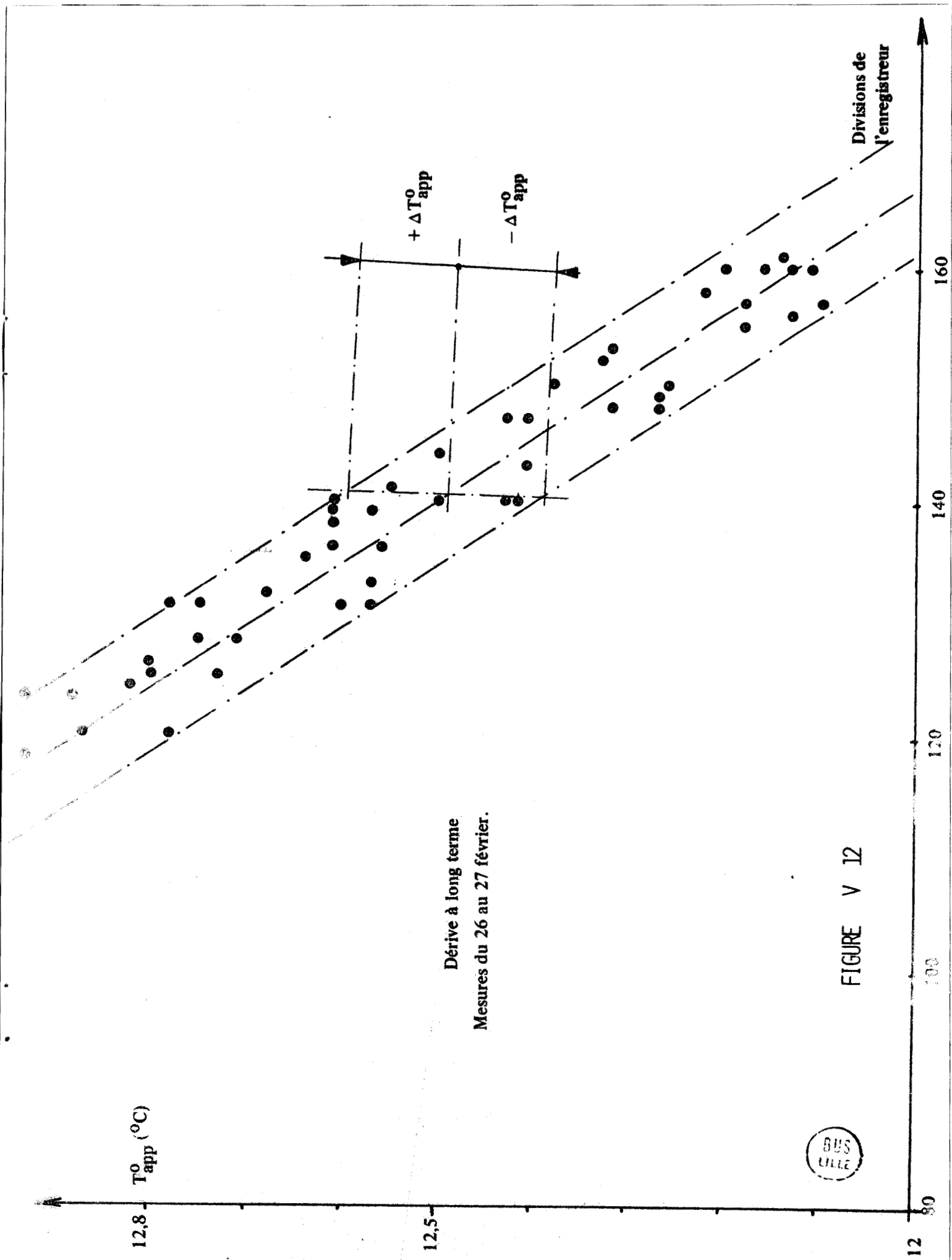
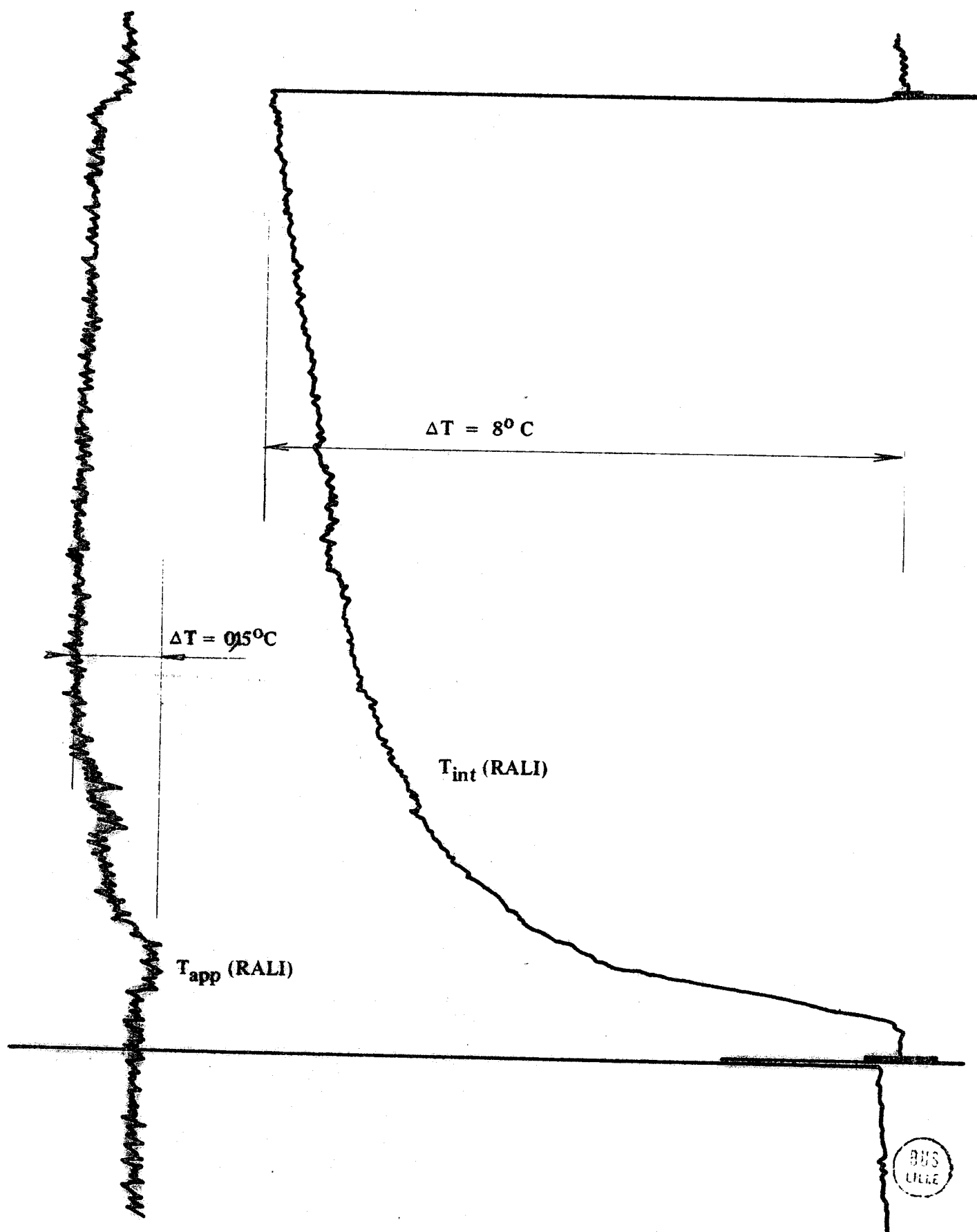
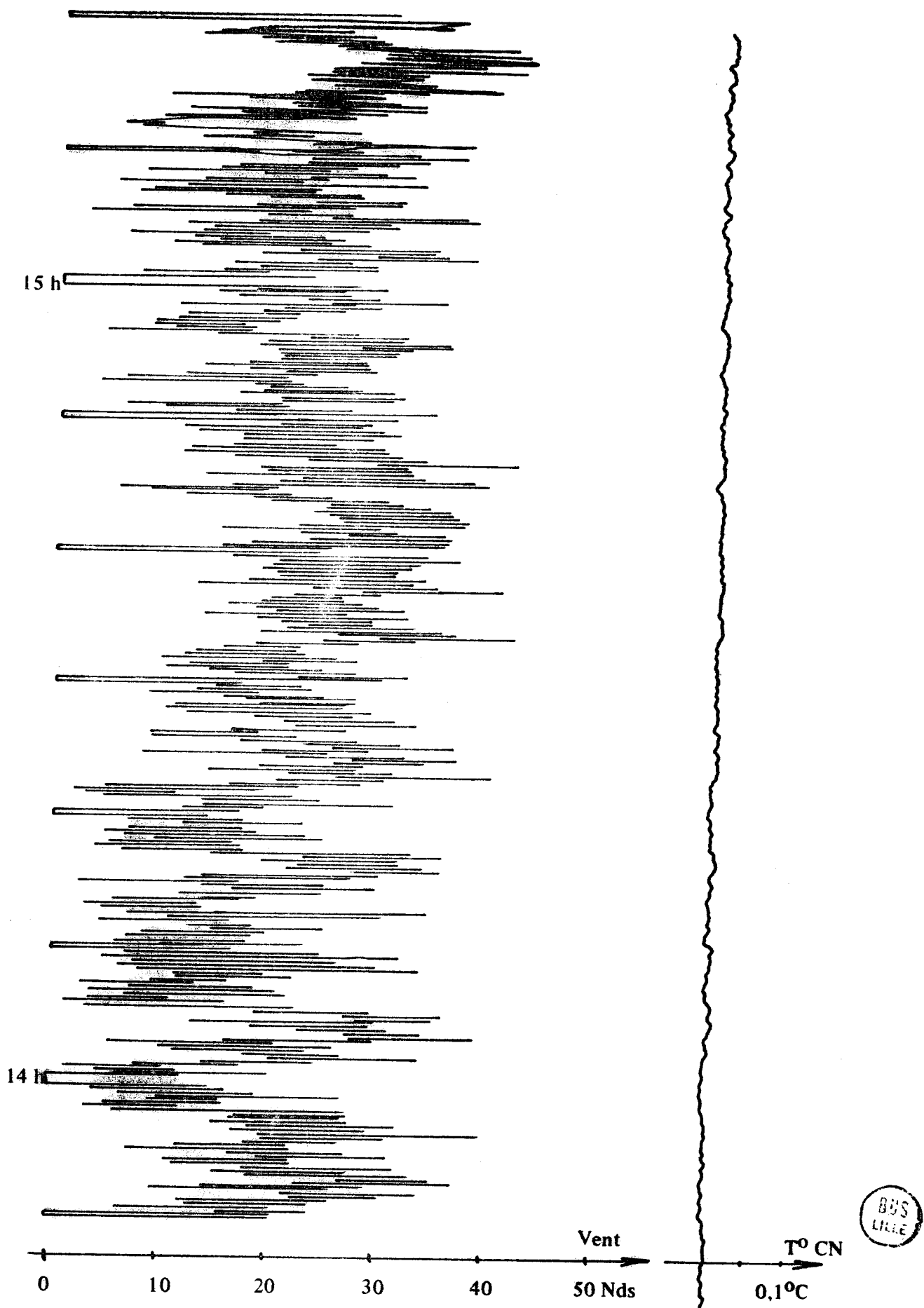


FIGURE V 12



Dérive du radiomètre

FIGURE V 13



Réponse de la température du corps noir aux coups de vent.

FIGURE V 14

V-5 - TESTS DE L'APPAREIL EN OPERATION {17}

Pour tester l'appareil de façon opérationnelle, nous l'avons utilisé au cours de deux campagnes de mesure :

- L'une, MEDOC 73 nous a permis de mettre en évidence certaines améliorations à apporter et à amener à la présentation actuelle de l'appareil.

Les photos présentent :

Photo 1 - L'avion sur lequel sont effectuées les mesures. Il s'agit d'un quadrimoteur de type DC 7 de la section AMOR du CEV de Brétigny sur Orge.

Outre la température de surface, l'ensemble de l'appareillage de l'avion permet de mesurer précisément :

- Sa position par un système de radionavigation ou de plateforme à inertie,

- La température de l'air.

- La vitesse du vent.

- L'humidité relative au niveau du vol.

Photo 2 - Le radiomètre en position de mesure, on remarquera sa position à 50° pour travailler en lumière polarisée.

Photo 3 - Le radiomètre en position d'étalonnage.

Un corps noir étalon, dont le principe de stabilisation est le même que celui du corps noir interne du radiomètre, permet un étalonnage périodique du radiomètre au cours du vol, afin de mesurer les corrections éventuelles à apporter à la mesure.

Photo 4 - Montre l'ensemble de l'électronique d'amplification, de détection, d'enregistrement et d'étalonnage.

La mise en évidence de l'erreur de transmission s'est faite lors de cette campagne de mesure. Nous disposions à bord de l'avion de deux radiomètres, un BARNES équipé d'un filtre $8 < \lambda < 15 \mu\text{m}$ qui visait à la verticale et notre radiomètre équipé d'un filtre $8 < \lambda < 12 \mu\text{m}$ qui visait à 45°.

La mesure de l'erreur de transmission se fait de la façon suivante, l'avion passe successivement au dessus d'un bateau (J. CHARCOT) à différentes altitudes et l'on note à chaque passage les températures apparentes trouvées. La température de la mer est mesurée par le bateau. Une correc-



PHOTO N° 1

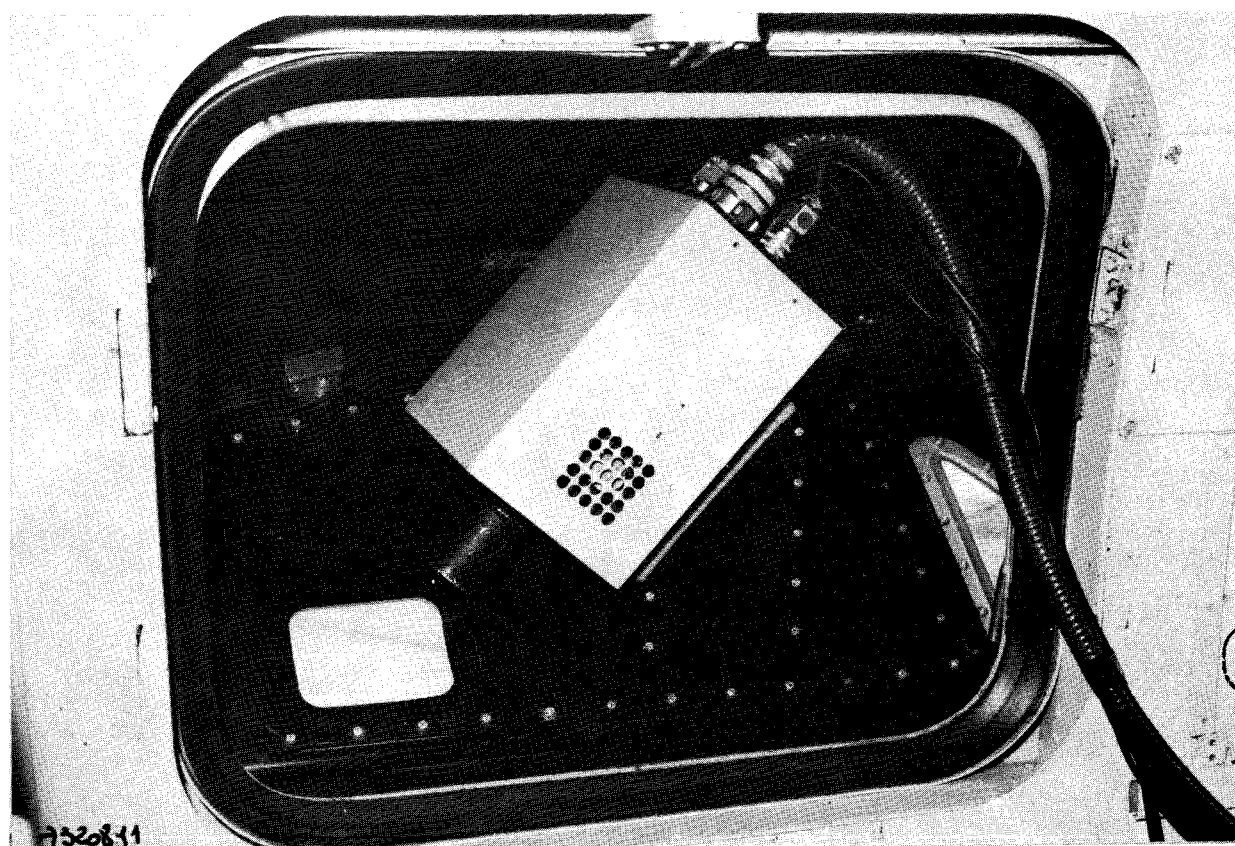


PHOTO N° 2

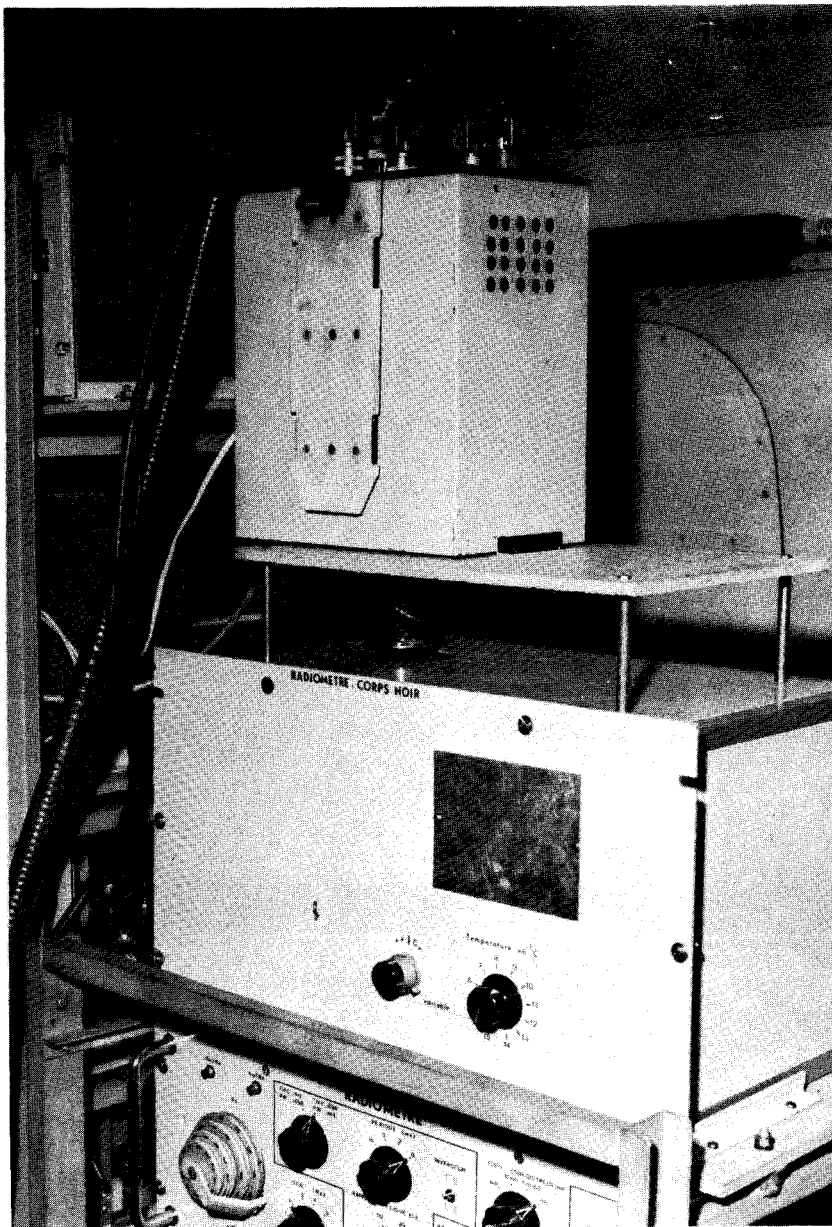
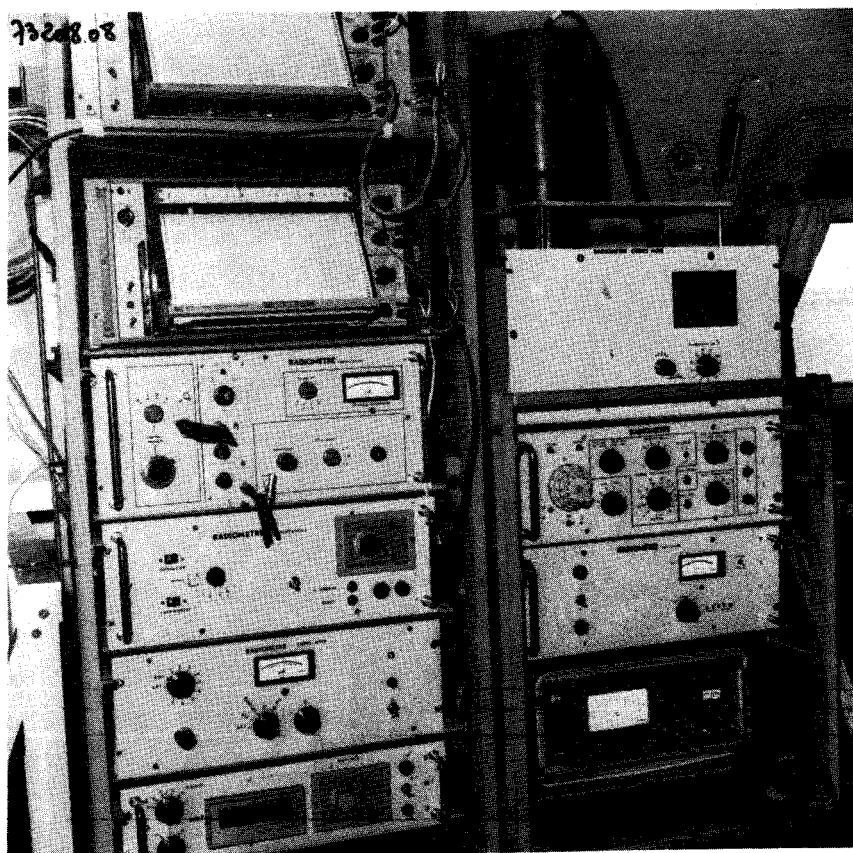


PHOTO N° 3

PHOTO N° 4



BUS
LILLE

tion de cette valeur doit être apportée qui tient compte de l'erreur de réflexion, fonction de l'état du ciel et de l'état de la mer (réf. 7). Cette correction est évidemment différente pour chaque radiomètre et très faible pour RALI. On peut alors tracer pour chaque appareil la courbe $\Delta T_{\text{transmission}} = (T^{\circ} \text{ à l'altitude de vol} - T^{\circ} \text{ au sol})$ en fonction de l'altitude du vol (fig. V-15).

Il faut remarquer que le trajet atmosphérique, lors de l'emploi d'un radiomètre polarisant, est plus grand du fait de la visée à 45° (environ 1,5). Si l'on fait la correction de distance (courbe 8 $\leq \lambda \leq 12(\mu)$), on retrouve les rapports dus à la différence de largeur spectrale prévus au §II-1.

- La deuxième expérience in situ s'est faite au large d'ABIDJAN dans le cadre d'études d'assistance à la pêche aux thons, entreprises par le centre de recherches océanographiques au sein de l'ORSTOM (Organisme de Recherche Scientifique d'Outre Mer).

Cette expérience a permis de souligner l'intérêt d'un radiomètre polarisant (18). En effet, à la demande du service de recherche océanographique d'Abidjan (CRO), nous avons procédé à un relevé de carte thermique, à l'aide du RALI, conjointement, avec un avion (BRITAIN-NORMAN) équipé par notre laboratoire d'un radiomètre classique (BARNES PRT 5) et qui, lui, patrouillait journallement l'océan, à la recherche de zones favorables à la présence de thons. En effet, l'expérience a montré que les concentrations de poissons (ce que les pêcheurs appellent des mappes) étaient importantes dans des zones à fort gradient de température. La carte thermique autour d'une mappe (fig. V-16) présente soit un isotherme formant une boucle, soit une tache plus chaude. Comme on peut le voir sur la carte, les variations thermiques rencontrées sont de l'ordre de $0,5^{\circ} \text{ C}$.

Au cours de la mission du 9 août 1973, ces deux avions ont donc été affectés ce jour là à la même mission de cartographie thermique. Les plans de vol respectifs sont portés sur la figure V-17, et le réseau d'isotherme a été déduit à partir des résultats des deux avions.

On peut voir apparaître sur ce réseau, entre le point B et C, une boucle de l'isotherme 26° déduite uniquement des mesures faites au radiomètre BARNES (fig. V-18). Nous croyons qu'il faut être très prudent dans de



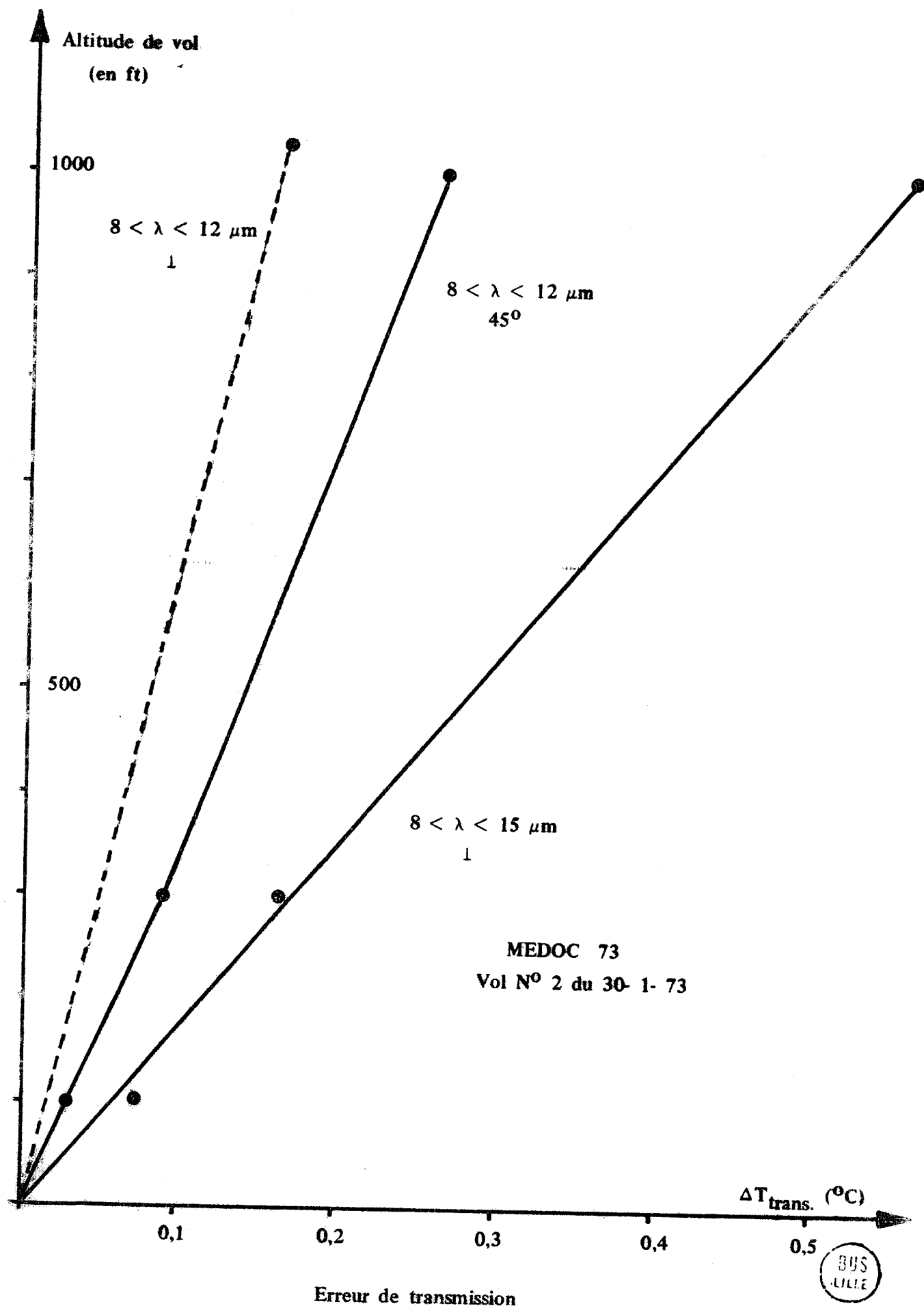
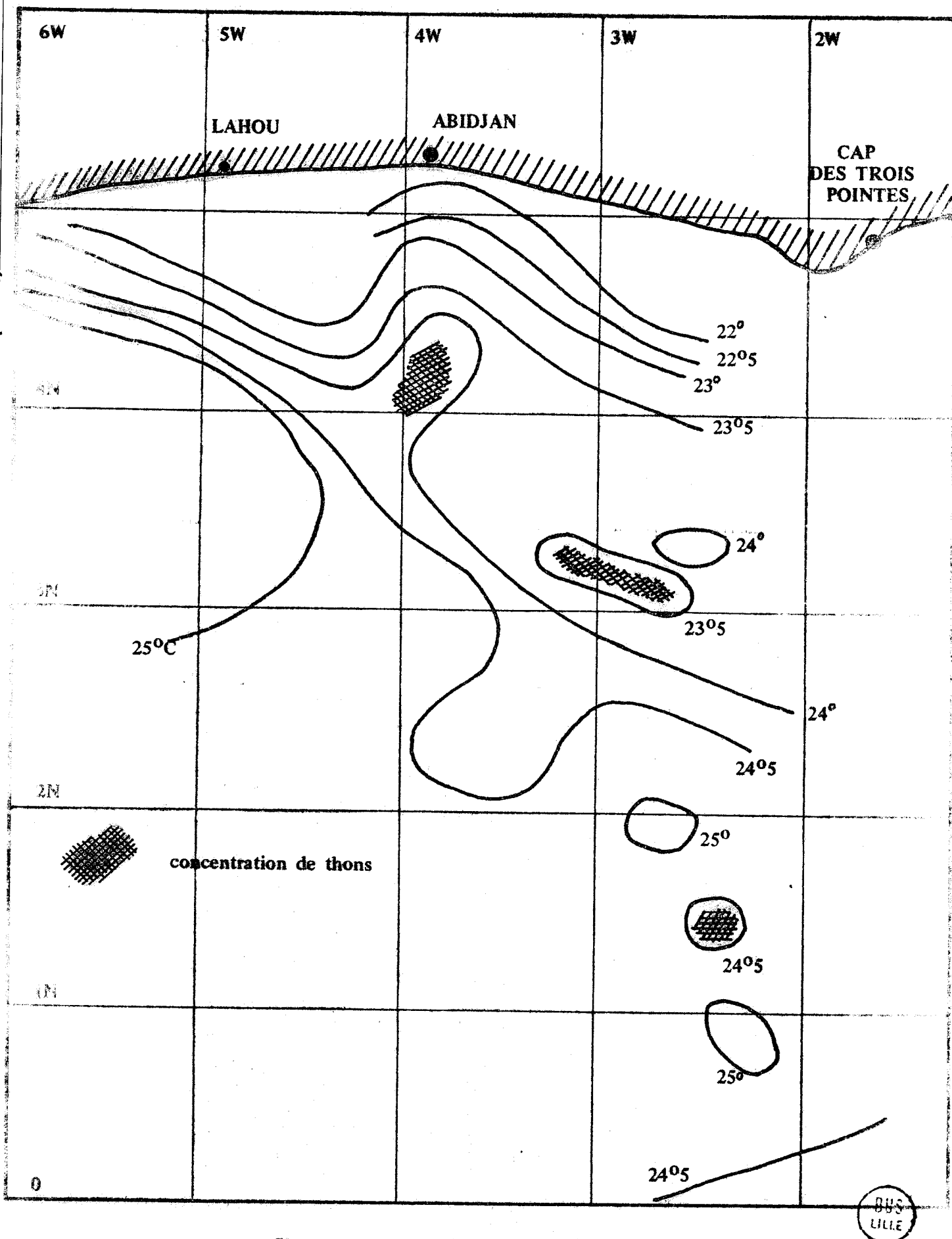
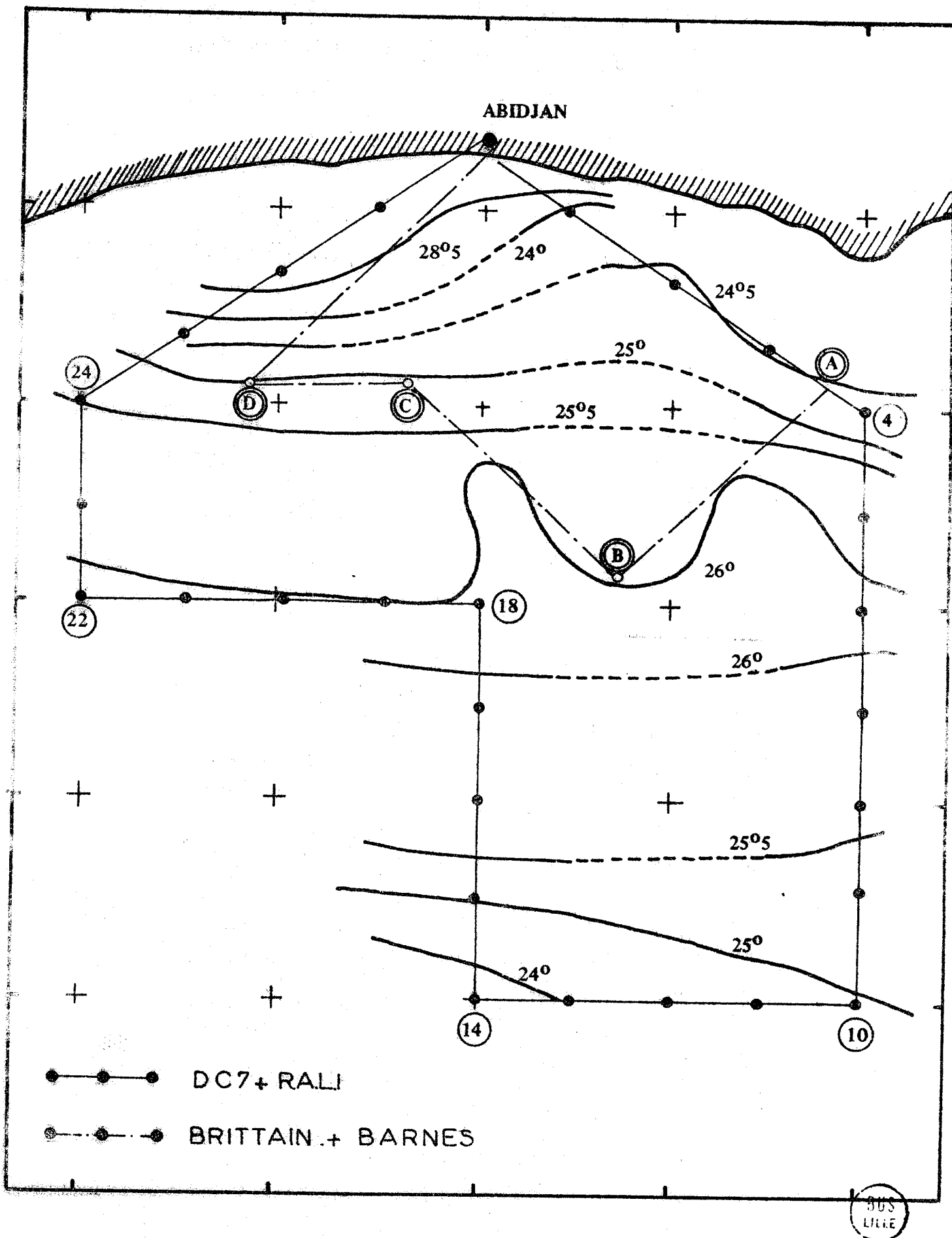


FIGURE V 15



Situation thermique du 20 au 27 Août 1972

FIGURE V 16



Situation thermique le 18 Août 1973

FIGURE V 17

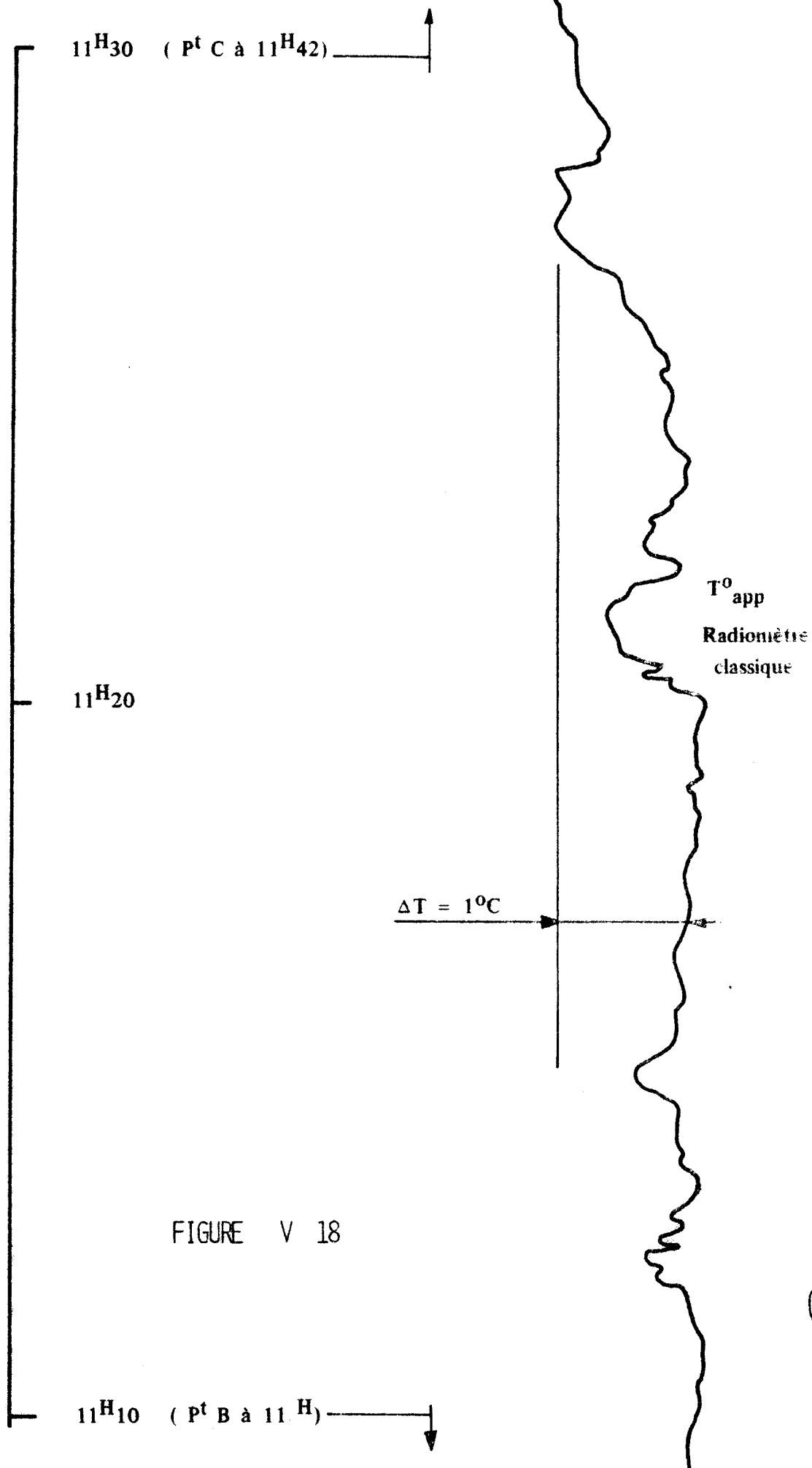


FIGURE V 18



telles circonstances car cet avion ne faisait pas, en parallèle, des mesures de rayonnement du ciel.

Or le dépouillement des mesures de rayonnement, fait à bord de l'autre avion, montre, que c'est près de cette zone (pt 18) et à la même heure que les variations de rayonnement venant du ciel furent les plus importantes (fig. V-19).

On conçoit tout de suite le risque qu'il y a de déduire des conclusions hâtives de tels résultats et de dérouter pour rien une flottille de pêche. On peut vérifier aussi figure V-19 que la température apparente mesurée au radiomètre polarisant reste insensible aux variations de l'énergie venant du ciel et que la précision en temps réel au cours d'une mission aérienne en est donc fortement accrue.

V-6 - UTILISATION DU RADIOMETRE EN CORPS NOIR ASSERVI {19}

Plusieurs essais d'utilisation pratique du radiomètre avec le montage en corps noir asservi (fig. III-2) ont été tentés, soit en laboratoire, soit en opération, notamment à bord de la frégate Météorologie (FRANCE II). Il faut dire honnêtement que cette méthode, tout en étant parfaitement réalisable présente quelques défauts qui nécessitent un nouvel examen qui sera exposé en conclusion.

Premièrement, dans ce cas d'asservissement, c'est évidemment le rayonnement du corps noir, arrivant sur le détecteur après réflexion sur le modulateur, que l'on asservit à celui de la source à mesurer.

Ce rayonnement est donc entaché de l'erreur, due au coefficient de réflexion du modulateur, qui peut varier suivant la température interne du radiomètre. Cette température, nous l'avons vu au cours de nos expériences, est difficilement stabilisable à long terme.

Deuxièmement, comme on l'a vu dans les courbes de réponse de stabilisation du corps noir (fig. IV-12), il subsiste au moment d'un changement de consigne, un rebondissement de température, dû au choix des constantes de temps du "PID". Dans le cas du corps noir stabilisé, ce rebondissement n'est pas très grave, car la consigne ne varie pas et l'action de la température extérieure est lente. Par contre, dans le cas du corps noir

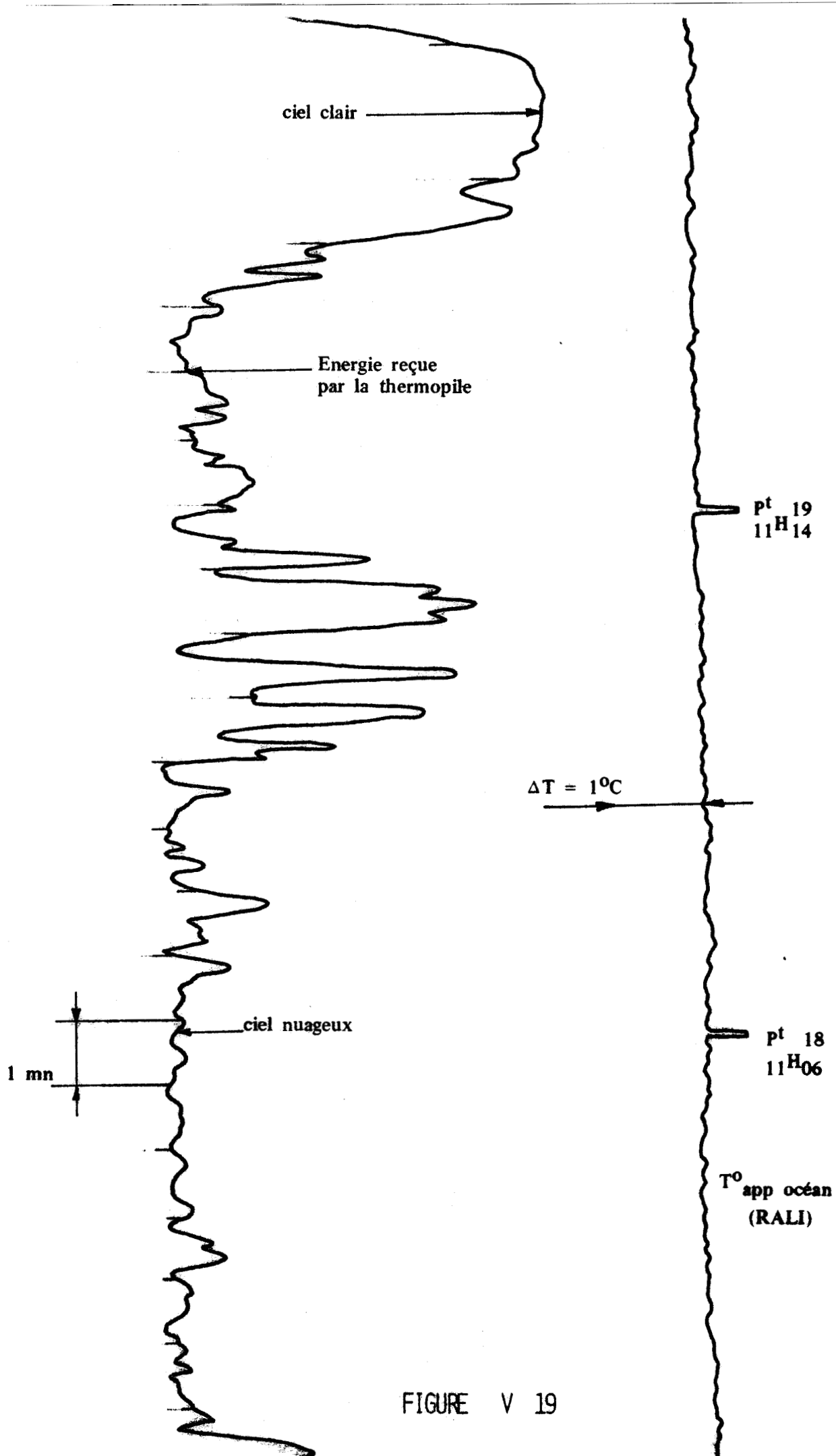


FIGURE V 19

asservi, le changement de consigne est permanent et parfois brutal; ce qui fait que pratiquement la chaîne n'est jamais à l'équilibre très longtemps. Il faut alors, dans le cas de mesures fines, tenir compte du signal d'erreur, pour avoir la température à mesurer. Et il est difficile d'avoir une précision relative supérieure à $0,1^{\circ}\text{C}$, ce qui, pour beaucoup d'applications, n'est pas suffisant. C'est pourquoi nous avons repensé cette utilisation qui reste très valable dans certains cas et que nous expliquerons en conclusion.

CONCLUSION

En conclusion de ce travail, nous pouvons dire que nous disposons d'un appareil opérationnel mais nécessitant des opérateurs spécialisés et qui est encore un peu encombrant pour de petits avions, par exemple. Cet appareil présente actuellement les caractéristiques suivantes.

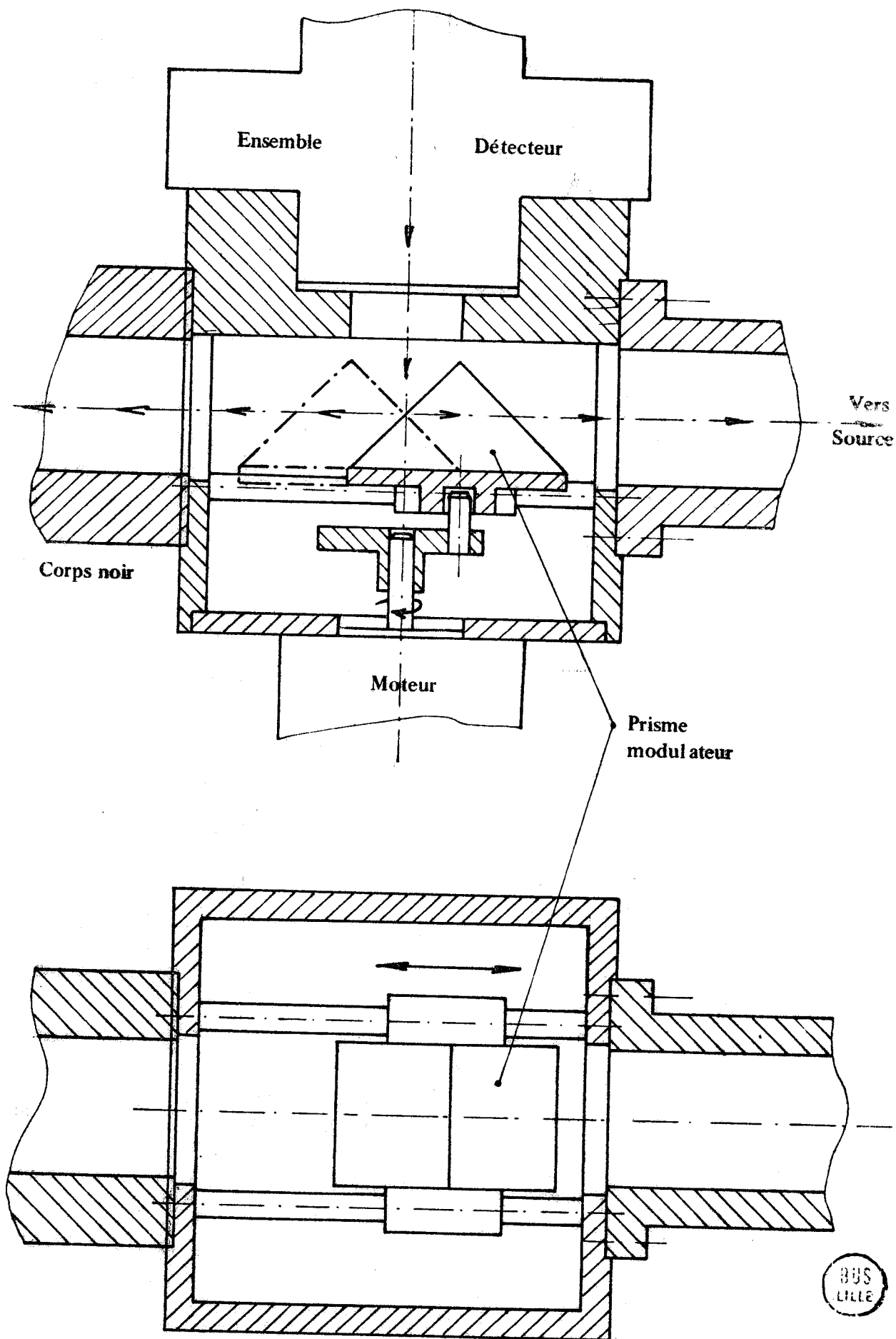
- Précision relative $0,03^{\circ}$ C
- Précision à moyen terme (1 semaine) $0,1^{\circ}$ C
- C^{st} de temps la plus rapide 1 seconde
- Encombrement de la tête optique $30 \times 30 \times 30$ cm
- Encombrement de l'électronique 15 Unites Standard
- Champ de visée = 5°
- Nécessité de visée à $= 45^{\circ}$
- Correction optimum de l'effet de réflexion pour des surfaces polarisantes telles celle de l'eau.

Par ailleurs, il faut préciser que cet appareil a été utilisé lors de mesures en laboratoire pour des études fines de refroidissement de surface de l'eau et de films d'hydrocarbures. De plus, dans le cadre d'une étude plus générale des échanges océan-atmosphère, nous avons pu correctement réaliser une série de mesures dans la soufflerie de l'Institut de mécanique statistique de Luminy près de Marseille {20}.

Sur un plan opérationnel, entre les deux missions précédemment citées, nous l'avons installé sur la frégate météorologique (FRANCE II) lors d'une série d'essais en mer (au point K). Ces essais avaient pour but la préparation du matériel de l'expérience tropicale GATE 74. Cette série d'essais a surtout mis en évidence les difficultés de dépouillement en corps noir asservi et des défauts d'ordre mécanique.

Enfin, cet appareil, ou un autre de construction similaire, doit équiper la bouée laboratoire (BORHA II) pour des mesures de routine de la température de surface et l'évolution des flux au niveau de la surface de l'océan.

Néanmoins, comme nous l'avons démontré et vérifié dans les chapitres précédents, il subsiste lors des mesures à long terme, une source d'instabilité qui est due principalement au modulateur. C'est pourquoi nous avons mis à l'étude un nouveau type de modulateur (fig. VI-1). Ce modulateur se présente

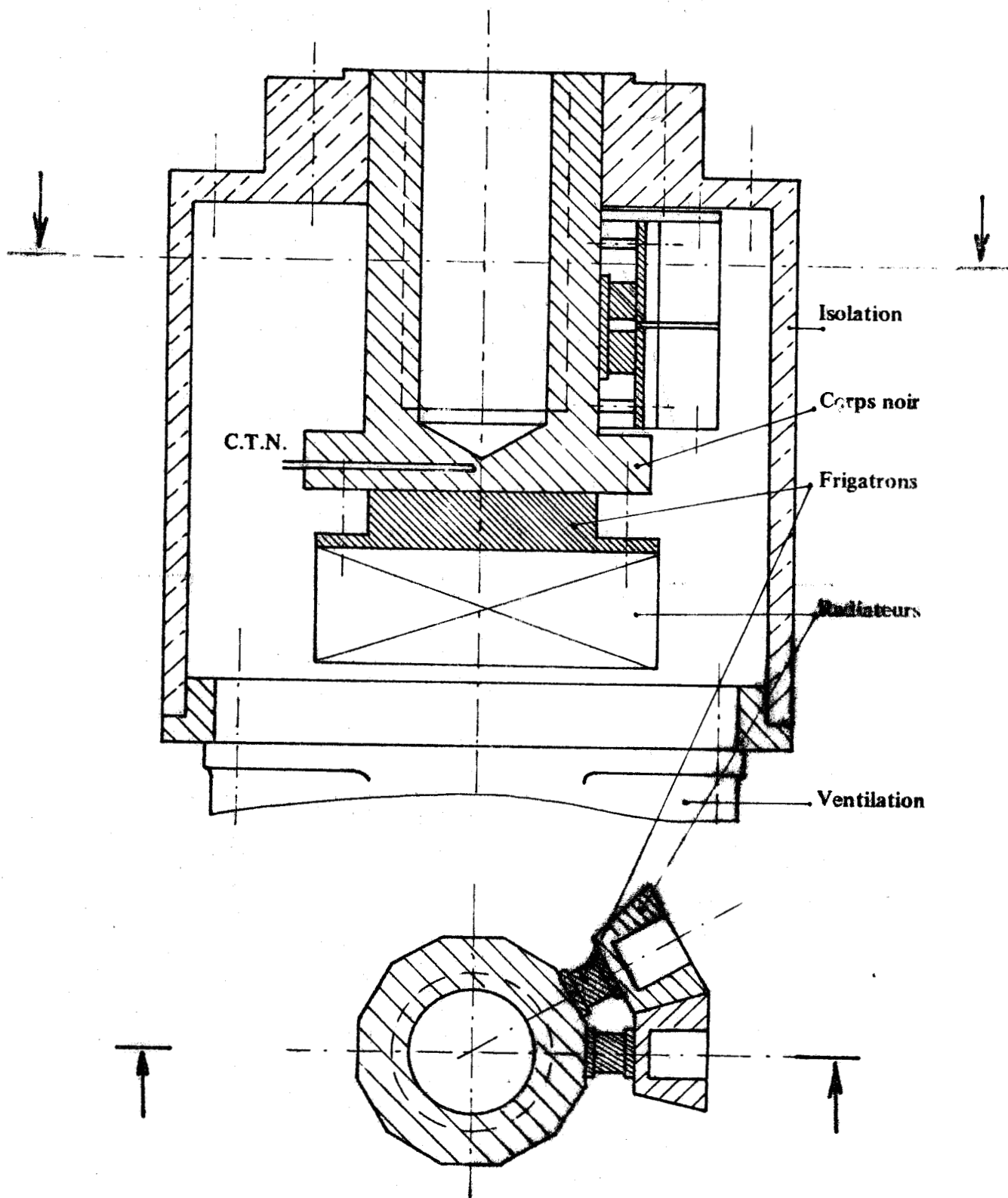


Système de modulation par prisme

sous la forme d'un prisme animé d'un mouvement de va et vient et qui rend symétriques les deux chemins optiques : Source-modulateur-détecteur et Corps noir-modulateur-détecteur. Les essais mécaniques sont en cours mais ils présentent plus de difficulté que le secteur tournant. Par contre ce système doit permettre, nous semble-t-il, de ne pas être obligé de stabiliser la température interne du radiomètre. De plus, lors de mesures en corps noir asservi, les chemins optiques étant égaux, la précision de la mesure sera plus grande.

Pour le corps noir, nous avons pensé à une autre méthode de conduite en température qui doit permettre de garder les qualités de stabilisation, dans une plus grande plage de température. Il s'agit, comme il est illustré figure VI-2, de conduire la température du corps noir à l'aide de deux systèmes de batterie à effet Peltier, l'une serait dans le fond du corps noir, l'autre sur le pourtour. Celle du pourtour pourrait soit être à puissance constante, soit programmée par l'action intégrale du régulateur PID. De cette manière la batterie du fond travaillerait toujours au voisinage du courant nul, là où le rendement est le meilleur. Pour le système de corps noir asservi, nous pensons que son emploi se justifie très bien lors de mesures de faible précision ($0,1^{\circ}\text{C}$). Nous pensons par exemple aux cas de relevés cartographiques pour l'aide à la pêche.

Dans le cas de mesures fines, l'expérience a prouvé que les mesures infrarouges nécessitent toujours un opérateur compétent qui peut donc faire les étalonnages nécessaires, et que le système à corps noir stabilisé est préférable. Néanmoins dans le cas de mesure de routine de bonne précision (par exemple sur une bouée ou un bateau), il semble nécessaire d'installer un système à seuil. Ce système pourrait, par exemple, changer la température de consigne du corps noir quand la température apparente présente un écart de plus de 1°C par rapport à celle du corps noir. Un autre reproche que l'on peut faire est celui de la puissance utile et de l'encombrement du dispositif. Ces problèmes sont actuellement en cours d'étude, ainsi que la possibilité de passer alternativement sur réseau 50 Hz ou sur 400 Hz. Il sera alors plus aisé d'installer le dispositif sur de petits avions souvent équipés de génératrices 400 Hz.



Corps noir de référence



FIGURE VI- 2

Une dernière difficulté de la mesure infrarouge aérienne subsiste dans l'erreur de transmission. Des méthodes ont été proposées et sont en cours d'analyse. Néanmoins et nous l'avons vu § II-1, pour des missions où la précision peut être faible (de l'ordre de quelques dixièmes de degrés), il est possible de réduire la bande passante du filtre. De cette façon, on égalise les deux erreurs, celle de la précision de l'appareil et celle de la transmission. Cette technique associée à celle du radiomètre polarisant et celle du corps noir asservi, par exemple, doit permettre de réaliser des cartographies thermiques pratiquement en temps réel, à l'aide de petits avions sommairement équipés.

Il faut préciser aussi que cet appareil a été étudié et développé dans le but bien précis de mesures aériennes radiométriques à basse altitude ou à bord de bateaux ou de bouée. (Cela veut dire qu'il n'est pas possible de le transposer tel quel sur un satellite par exemple). Par contre de telles mesures s'avèrent de plus en plus indispensables pour étalonner ou dépouiller les mesures satellites en pratiquant par exemple, à intervalles réguliers, la cartographie thermique de grandes radiales. Ces mesures peuvent servir, par exemple, à compléter ou remplacer les mesures satellites, lors d'une couverture nuageuse importante, à donner une indication précieuse sur la transparence de l'atmosphère dans la zone considérée et à calculer les corrections nécessaires à apporter aux mesures satellites.

Enfin, nous ajouterons que certaines parties de l'étude que nous présentons ici, ont permis la réalisation d'un sondeur infrarouge pour la basse atmosphère {21} et que la plupart des dispositifs décrits ont fait l'objet d'un brevet pris conjointement par l'ANVAR et le CNEXO {22}.

BIBLIOGRAPHIE

- {1} - L'océanographie au C.N.R.S. - Perspective 1973
- {2} - P.Y. DESCHAMPS, P. LECOMTE, J.C. VANHOUTTE - Mesure radiométrique de la température de surface de l'océan - Rapport d'activité d'octobre 1970 - Contrat C.N.E.X.O..
- {3} - P.Y. DESCHAMPS - Etude et réalisation d'un radiomètre infrarouge - Thèse de 3e cycle 1968 - Lille - N° 114.
- {4} - P.Y. DESCHAMPS, P. LECOMTE, J.C. VANHOUTTE - Interprétation des mesures de température de la mer par radiométrie infrarouge - AGARD - Conférence N° 90.
- {5} - A. DAUGUET - La détection des radiations infrarouges.
- {6} - MET MAR - N° 78 - janvier 1973 - Assistance météorologique à la campagne thonière en 1972.
- {7} - P.Y. DESCHAMPS, P. LECOMTE, J.C. VANHOUTTE - Etude du refroidissement superficiel - Rapport d'activité - novembre 1972 - Contrat C.N.E.X.O..
- {8} - P. LECOMTE, P.Y. DESCHAMPS, J.C. VANHOUTTE - Améliorations apportées à la mesure de la température de surface de l'océan par l'utilisation d'un radiomètre infrarouge polarisant - Applied Optics - Vol 12 - P 2115 - septembre 1973.
- {9} - J. LASNE - Etude et réalisation d'un corps noir asservi en température - Thèse d'Ingénieur du C.N.A.M. - Lille - 1971.
- {10} - BARNES ENGINEERING COMPANY - Infrared Barnes Covers the spectrum - Note d'application - 1971.
- {11} - BARNES ENGINEERING COMPANY - Application Notes for Pyroelectric Detectors - Bulletin N° 2-611.
- {12} - P. PRUVOST - Contribution à l'étude des échanges radiatifs océan-atmosphère - Thèse de 3e cycle 1972 - Lille - N° 341.
- {13} - J.C. VANHOUTTE - Etude et réalisation d'un corps noir étalon - Toute l'électronique - janvier 1972.
- {14} - C.H. CHAMPNESS - Tellurides for Thermoelectric Applications - Applied Physics - N° 39 P 4177 - 1968.
- {15} - Princeton Applied Research Corporation (P.A.R.) - How to use Noise Figure Contours - Note d'application - 1969.

- {16} - F.X. FUSEY - Mesures de la température de surface par un radiomètre polarisant - Thèse de 3e cycle 1974 - Lille - N° 462.
- {17} - P.Y. DESCHAMPS, P. LECOMTE, J.C. VANHOUTTE - Améliorations apportées aux techniques de mesure de la température de surface de la mer par radiométrie infrarouge. Applications aux levés aériens de température - 2 nd International Conference for Marine Research and Ocean Utilisation - Dusseldorf Germany - novembre 1973.
- {18} - Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer ORSTOM - Résultat de la campagne de radiométrie - Abidjan 1973 - Rapport de L. VERCESI.
- {19} - Mesure de rayonnement sur la Frégate Météo - FRANCE II - Rapport interne 1974.
- {20} - F.Y. FUSEY, P. LECOMTE, J.C. VANHOUTTE - Etude du refroidissement de surface en soufflerie I.M.S.T. de Luminy - Rapport à paraître 1974.
- {21} - G. BROGNIEZ - Etude et réalisation d'un sondeur infrarouge - Thèse de 3e cycle - Lille - à paraître.
- {22} - ANVAR - Brevet N° 072.39.966 1972 - Améliorations apportées à la mesure de la température de certains corps gris - Applications à la mesure de température de surface de l'océan par radiométrie infrarouge.

