

G. Gosse

**MESURE DES TEMPERATURES DE SURFACE
PAR RADIOMETRIE INFRA - ROUGE**

**I Principe de la mesure et
étalonnage du Radiothermomètre**



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

CENTRE D'ADIOPODOUNME - COTE D'IVOIRE

B. P. 20 ABIDJAN



Septembre 1973

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
CENTRE D'ADIPODOUME

Laboratoire de Bioclimatologie

MESURE DES TEMPERATURES DE SURFACE
PAR RADIOMETRIE INFRA-ROUGE

I . Principe de la mesure et étalonnage
du radiothermomètre.

par

G. GOSSE

INTRODUCTION :

La température de surface d'un corps est un paramètre important, utilisé dans de nombreux domaines :

- en médecine, détection des tumeurs superficielles
- en hydrologie et océanographie, détection aérienne des remontées d'eau froide, détermination de l'évaporation d'une nappe d'eau (1)
- en géologie, détection des concentrations minérales
- en bioclimatologie et météorologie, détermination de l'évapotranspiration d'une culture (1), détection de zones déficientes (zones mal irriguées ou atteintes d'une maladie...).

La température de surface apparaît comme la résultante des échanges d'énergie existant entre le corps considéré et l'atmosphère environnante. C'est ainsi que la détermination de ce paramètre synthétique entre dans le cadre de l'étude entreprise par l'équipe de bioclimatologistes d'Adiopodoumé: "Analyse du bilan d'énergie d'une culture".

Il existe actuellement plusieurs méthodes pour déterminer la température de surface :

- Méthode par thermocouples ou thermistances (2), (3); en réalité cette méthode permet de mesurer la température de l'air ou du corps au voisinage de la surface.
- Méthode par luminescence (4)
- Méthode par radiométrie infra-rouge (5), (6), (7), cette dernière est basée sur le principe de l'émission par les corps d'un rayonnement électromagnétique fonction de la température. Très satisfaisante sur le plan théorique (zone de mesure non perturbée), elle reste cependant d'un emploi assez délicat car les corps naturels ne sont pas des corps noirs et ne sont des corps gris qu'en première approximation.

Y. Rappel de thermodynamique*

Tout corps noir dont la température est différente du zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique dont les propriétés dépendent des lois suivantes :

- Formule de Planck donnant l'émittance** spectrale du corps noir :

$$dW_{\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_S}} - 1 \right)^{-1} d\lambda$$

avec dW_{λ} énergie émise pour la longueur d'onde λ considérée en Watt. m^{-2} A-

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{longueur d'onde en mètre} \\ T_S &= \text{température de surface en } ^\circ K \\ C_1 &= 3.740 \cdot 10^{-16} \text{ Watt. m}^2 \\ C_2 &= 1.4383 \cdot 10^{-2} \text{ m.}^\circ K. \end{aligned}$$

L'équation (1) est l'équation d'une famille de courbes cf. graphique n°1.

L'émittance totale est obtenue en intégrant dW_{λ} pour l'ensemble des longueurs d'onde :

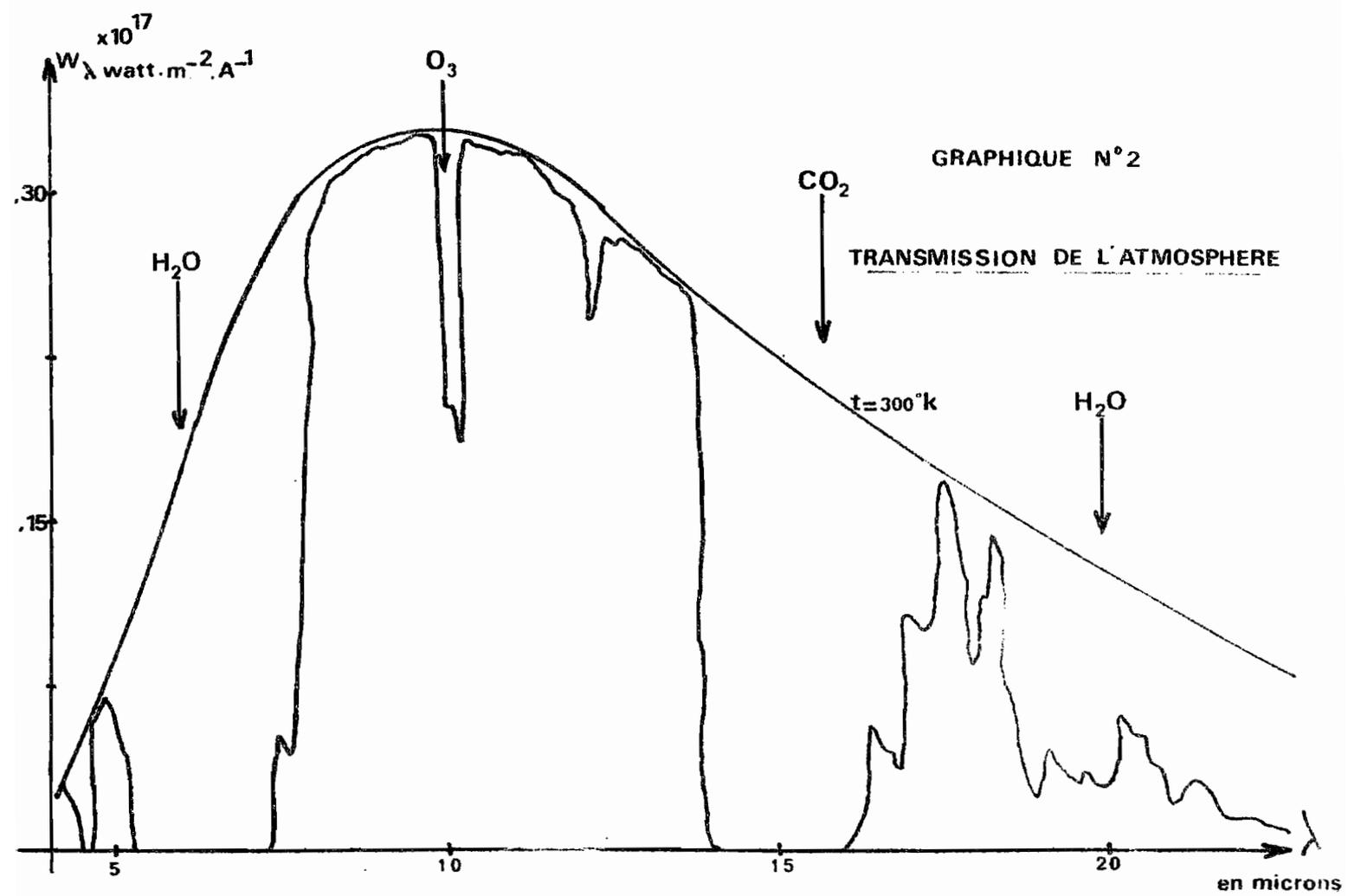
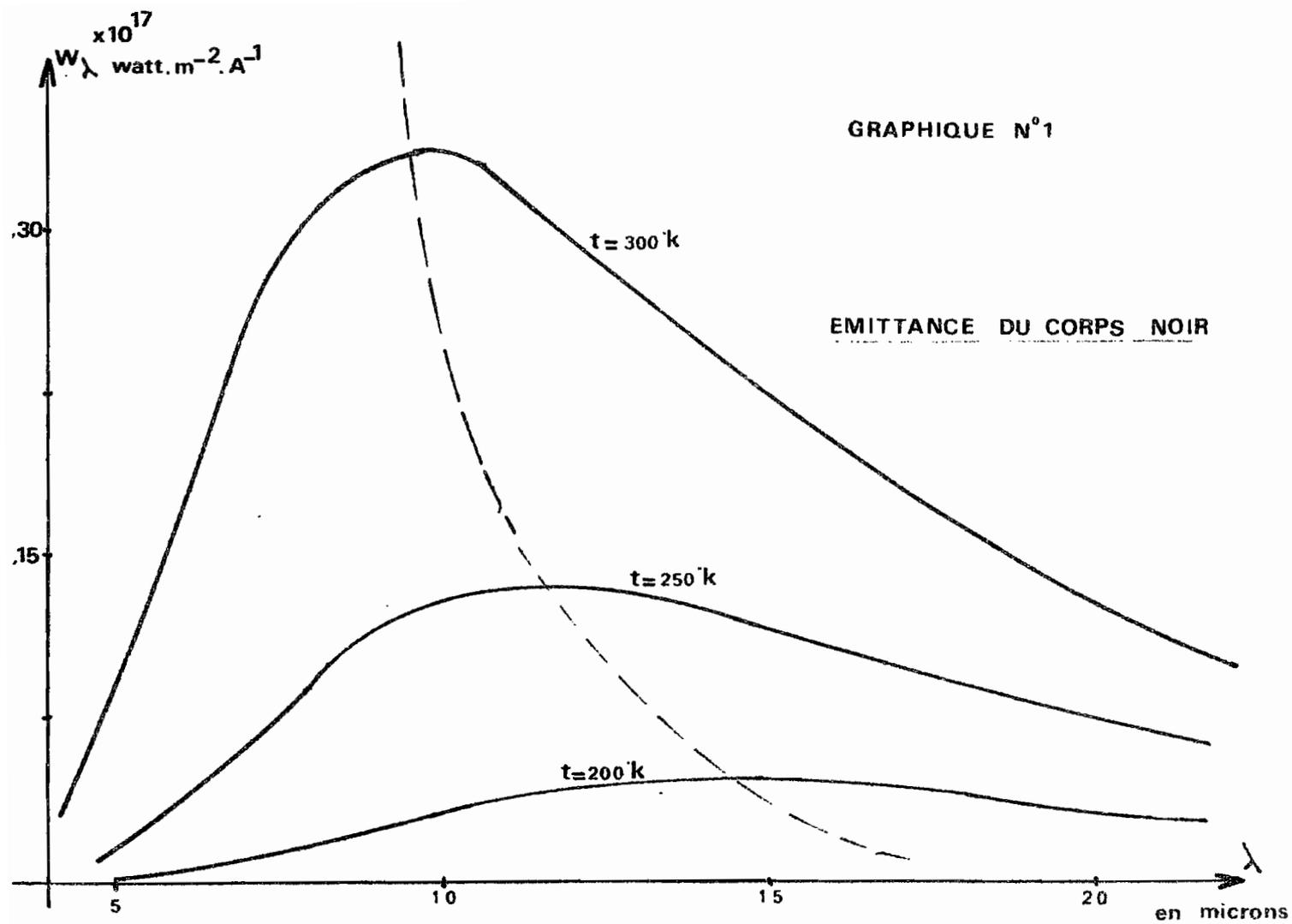
$$W = \int_0^{\infty} dW_{\lambda} = \int_0^{\infty} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_S}} - 1 \right)^{-1} d\lambda = \sigma T_S^4$$

Le résultat de l'intégrale est connu sous le nom de loi de Stefan-Boltzmann :

* Le système d'unités utilisé est le système MKS

Les notations et les valeurs numériques des différentes constantes sont celles données par LIST R.J. (Smithsonian Meteorological tables 1968).

** Emission : énergie émise par unité de surface de la source et par unité de temps dans un angle solide de 2π Stéradians.



$$W = \sigma T_S^4 \quad (2)$$

avec W = émittance totale en Watt. m^{-2}

T_S = température de surface en °K

σ = constante de Stefan-Boltzmann
($\sigma = 5,673 \cdot 10^{-8}$ Watt. m^{-2} °K $^{-4}$)

Par ailleurs, la longueur d'onde du maximum de la distribution de Planck est obtenue en dérivant l'équation (1) :

$$\text{Soit, } \lambda_M \cdot T_S = 2897 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

c'est la loi de déplacement de Wien.

avec λ_M = longueur d'onde du maximum d'émission en mètre.

T_S = température de surface en °K

Extension des lois précédentes aux corps gris :

Les corps gris sont des corps qui, pour l'émission du rayonnement électromagnétique, se comportent comme des corps noirs à un facteur multiplicatif près. Ce facteur est appelé émissivité de surface .

Notation : ϵ ($\epsilon < 1$).

L'émissivité d'un corps gris sera uniquement fonction de l'état de la surface.

La loi de Stefan Boltzmann devient alors :

$$W = \epsilon \sigma T_S^4 \quad (4)$$

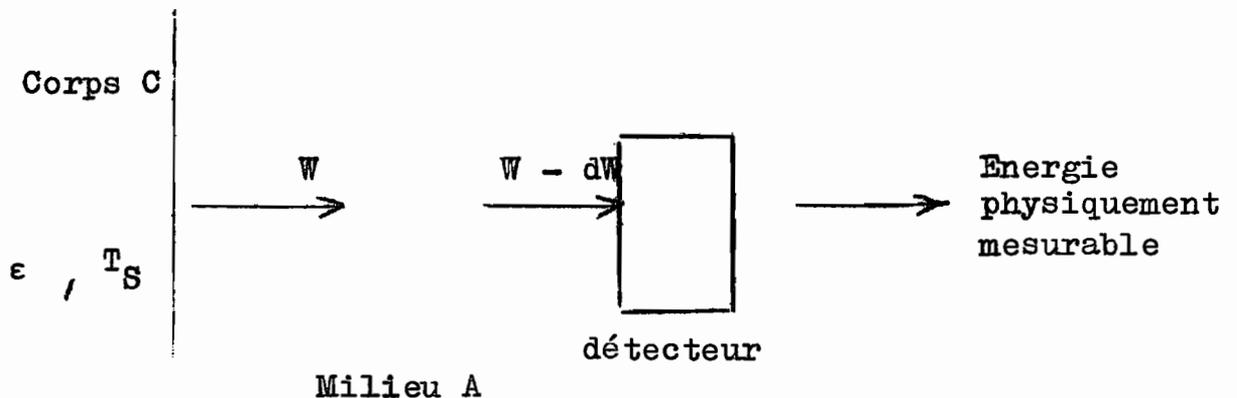
Les corps naturels ne sont des corps gris qu'en première approximation, car l'émissivité d'un corps naturel est une fonction complexe de la température du corps, de la longueur d'onde λ d'émission, de l'angle de visée i , et l'état de la surface du corps S

$$\epsilon = f (T, \lambda, i, S).$$

L'hypothèse que les corps naturels sont des corps gris est d'autant mieux vérifiée que l'on travaille dans une gamme de température restreinte, dans une gamme de longueur d'onde étroite et éloignée dans l'infra-rouge et pour un angle de visée voisin de la normale.

II. Principe des mesures de température de surface par radiométrie infra-rouge : (5), (6).

Schéma de la chaîne de mesure :



2.1. Explicitons l'énergie infra-rouge W provenant du corps C.

Les corps naturels n'étant pas des corps noirs, ils réfléchissent une partie du rayonnement ambiant

$$D'où \quad W = \epsilon \sigma T_S^4 + (1 - \epsilon) \phi_0 \quad (4)$$

avec ϕ_0 rayonnement infra-rouge émis par l'environnement.

L'équation (4) est l'équation de base de la radiométrie infra-rouge. La validité de cette équation dépend de l'hypothèse faite au paragraphe précédent :

Corps naturels = corps gris.

2.2. Origine du rayonnement infra-rouge émis par l'environnement:

Le rayonnement ϕ_0 a une origine triple :

- ϕ_0 ciel clair de par ces constituants : vapeur d'eau, gaz carbonique, ozone, aérosols
- ϕ_0 nuage
- ϕ_0 objets au sol

D'où

$$(5) \quad \phi_0 = \phi_0 \text{ ciel clair. } \Omega_1 + \phi_0 \text{ nuage } \Omega_2 + \phi_0 \text{ objet } \Omega_3$$

Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 , étant respectivement les angles solides sous lesquels sont vus le ciel clair, les nuages et les objets environnants.

2.3. Influence du milieu A sur le rayonnement à détecter.

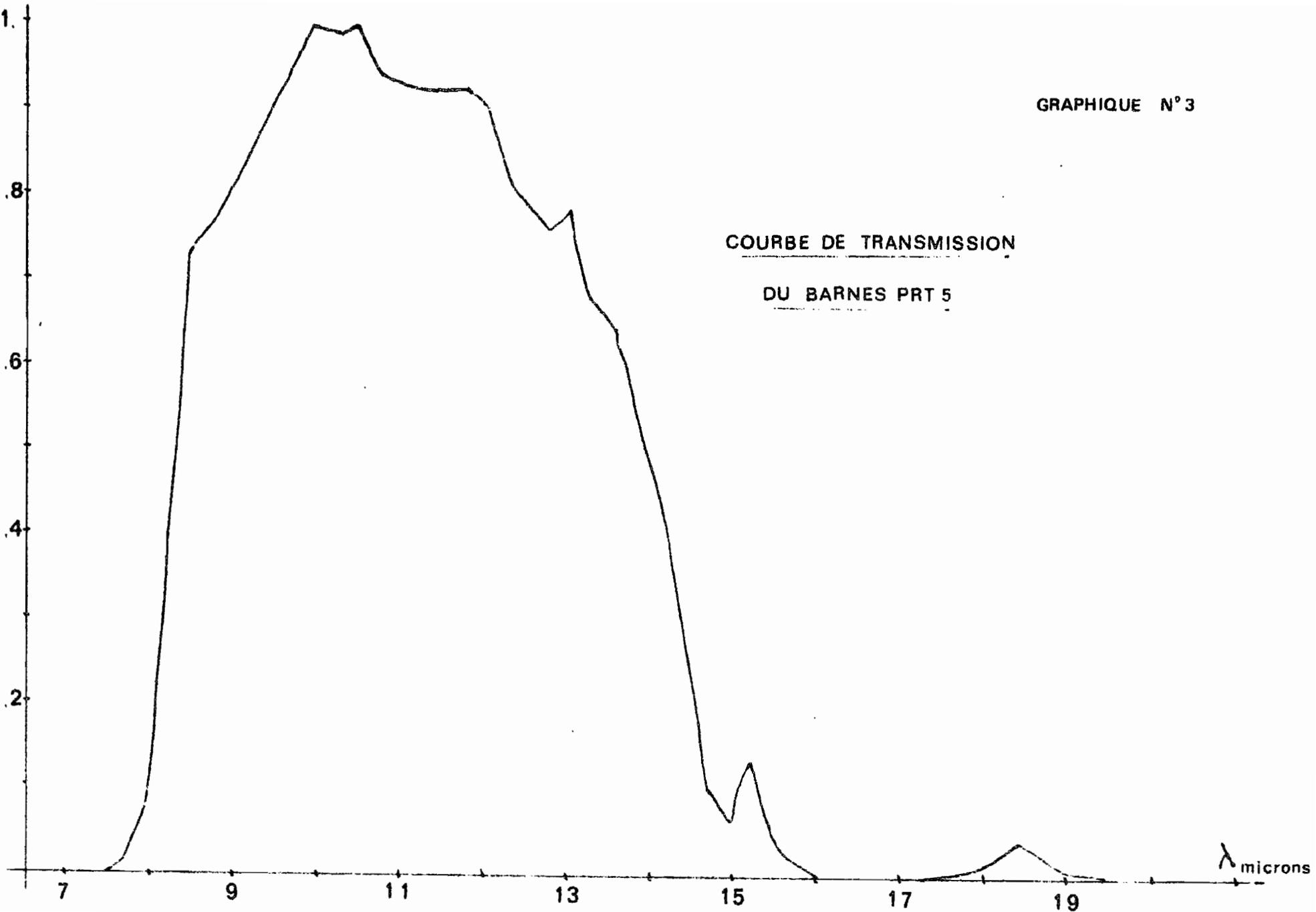
Dans le cas présent, le milieu A est l'atmosphère. Plusieurs constituants (CO_2 , H_2O notamment) de l'atmosphère ont des bandes d'absorption dans l'infra-rouge; pour éviter ces perturbations on essaie de se placer dans une zone où l'atmosphère se comporte comme un gaz presque inerte (cf. graphique n°2).

Parmi les différentes bandes possibles, la bande 8-14 microns est la plus indiquée, car elle correspond en outre au maximum d'émission pour une température ambiante ($T = 300^\circ\text{K}$ $\lambda_M = 10$ microns); aussi il est nécessaire de filtrer le rayonnement à détecter pour ne garder que la fraction non perturbée.

(cf. graphique n°3 de la courbe de transmission du filtre "BARNES").

GRAPHIQUE N°3

COURBE DE TRANSMISSION
DU BARNES PRT 5



2.4. Etude sommaire du détecteur : (8).

Les détecteurs de rayonnement infra-rouge sont de types variés (thermique, pneumatique, quantique...). Le détecteur qui nous intéresse est le détecteur thermique type bolomètre. Les bolomètres sont basé sur le principe de la variation de conductance des métaux ou des semiconducteurs en fonction de la température.

Dans le cas du Barnes PRT 5, le détecteur est un bolomètre à semiconducteur ou thermistor. La variation de résistivité d'un semiconducteur avec la température est exponentielle. Il suffit alors d'introduire le thermistor dans un pont de mesure de résistance pour obtenir un signal électrique, fonction de l'énergie infra-rouge incidente.

Le laboratoire de Bioclimatologie d'Adiopodoumé est équipé d'un radiothermomètre BARNES PRT 5, cf. fiche technique.

Fiche technique du radiothermomètre Barnes PRTc 5

(d'après la notice d'utilisation délivrée par la Barnes Engineering Company).

- Détecteur : Bolomètre à thermistor immergé
- Optique : champ 20°, lentille en Irtran
- Filtre 8-14 μ cf. courbe de transmission.
- Gamme de température
 - Low range -20° C, + 15°C
 - Medium range +10° C, + 45°C
 - High range +40° C, + 75°C
- Temps de réponse 5,50 ou 500 millisecondes
- Sensibilité (gamme 5 msec.) inférieure à 0,1°C
- Température de référence 45°C
- Sortie enregistreur 1V d.c pour une impédance de 10 k. Ω et 50 mV d.c pour 500 Ω
- Température ambiante de fonctionnement -20°C à 40°C.

2.5. Protocole expérimental des mesures de température de surface en conditions naturelles.

L'équation (4) montre que la détermination d'une température T_s nécessite la connaissance simultanée de trois paramètres :

- ϵ émissivité de la surface
- ϕ_0 rayonnement infra-rouge émis par l'environnement
- W rayonnement infra-rouge provenant de la surface.

La mise en oeuvre de la méthode se fait en quatre temps :

1. Etalonnage du radiothermomètre ou test de la réponse du capteur à l'énergie émise par un corps noir
2. Détermination de l'émissivité de la surface à étudier
3. Etude du rayonnement infra-rouge ϕ_0
4. Détermination simultanée de ϕ_0 et de W .

III. Étalonnage du radiothermomètre .

Principe : L'étalonnage est réalisé en visant un corps noir de référence dont on mesure la température par un autre procédé (thermocouple par exemple).

3.1. Réalisation du corps noir : cf. Schéma du corps noir.

La réalisation d'un corps noir absolu est délicate mais on peut en approcher facilement, à mieux de 1 %, en réalisant une cavité cylindrique, peinte en noir mat (9).

Selon SPARROW et al (9), un cylindre de longueur L , de diamètre d , d'émissivité $\epsilon = 0,9$ possède pour un rapport L/d supérieur à 4, une émissivité apparente de 0,999 pour une distance à l'orifice du cylindre égale à $3d$. Selon ce principe nous avons réalisé un corps noir à l'aide d'un tube d'aluminium (bon conducteur de la chaleur afin de diminuer les hétérogénéités dans la répartition de la température).

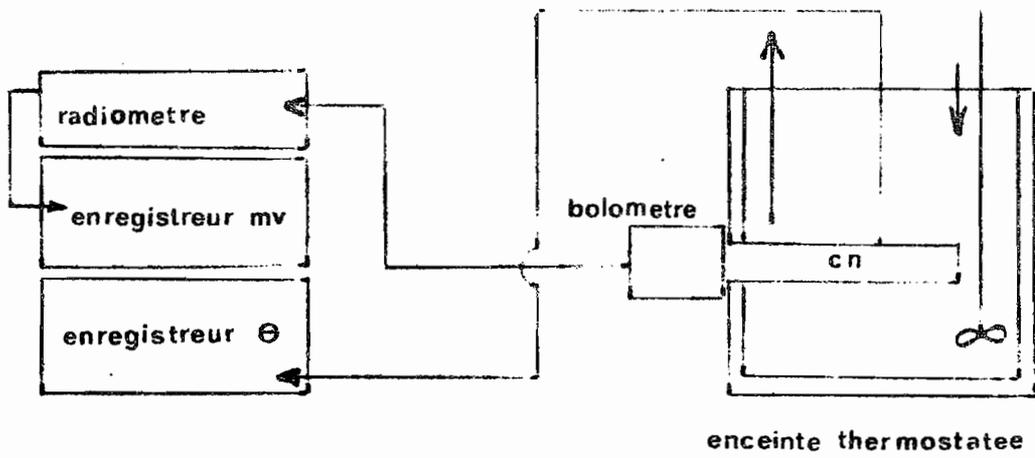
Avec les dimensions choisies ($L = 24$ cm, $d = 4$ cm) et l'optique du radiothermomètre ($F = 20^\circ$) nous obtenons une émissivité apparente de 0,998.

La régulation en température est assurée par une circulation d'eau thermostatée, cf. schéma du dispositif d'étalonnage.

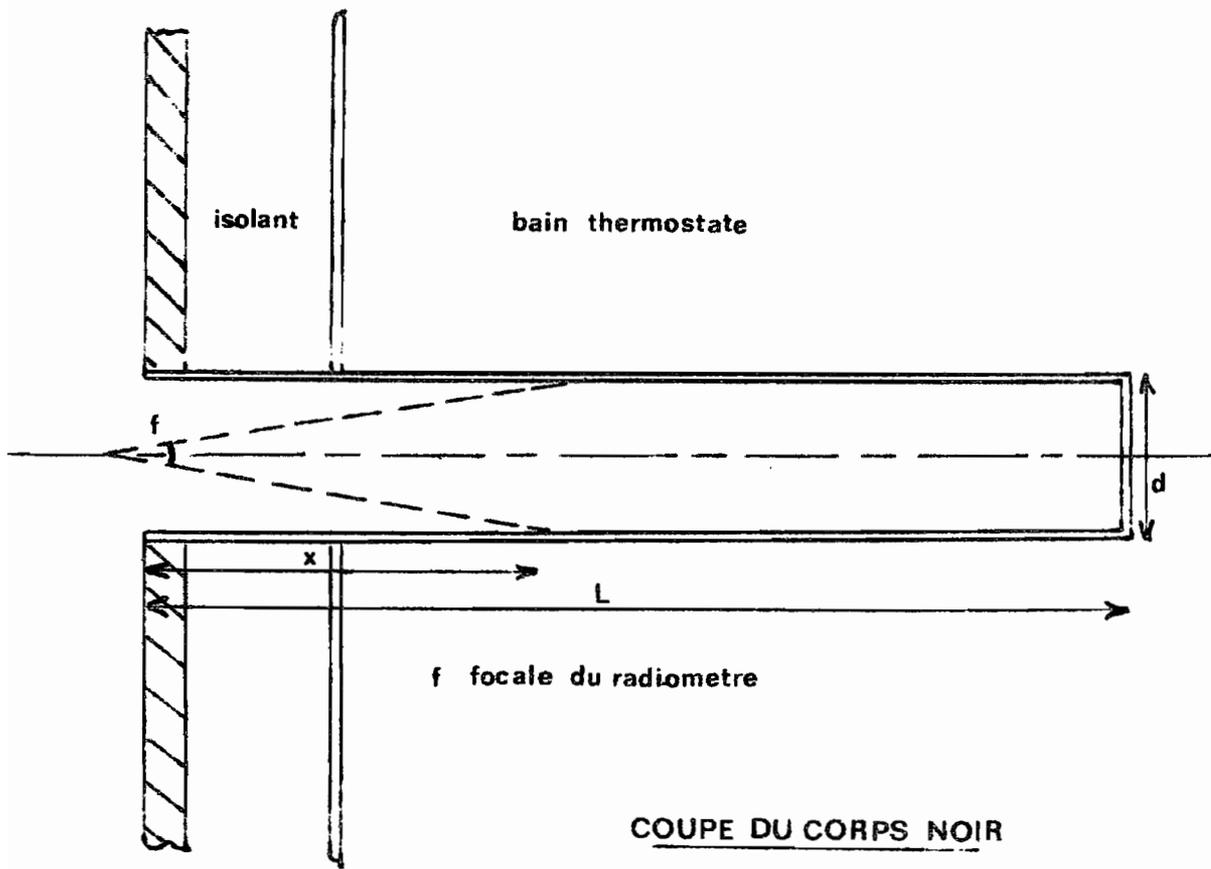
3.2. Test d'uniformité de la température du corps noir.

Afin de détecter les différences de température à la surface du corps noir, nous avons disposé, dans une expérience préliminaire 4 soudures Cuivre-constantan en différents endroits du cylindre. Les différences de température ainsi obtenues n'excèdent pas $0,1^\circ\text{C}$ pour la gamme de température étudiée ($0-55^\circ\text{C}$).

Le corps noir utilisé peut être considéré comme isotherme.



SCHEMA DU DISPOSITIF D' ETALONNAGE



echelle .5

3.3. Mesure de la température du corps noir.

La mesure de température est assurée par deux thermocouples Cuivre-Constantan (coefficient d'étalonnage 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) collés à la surface du corps noir :

- un des thermocouples TC_1 , à la surface côté bain thermostaté
- l'autre TC_2 , à la surface côté radiomètre.

Lors des cinétiques d'échauffement du corps noir le thermocouple TC_1 donne une température supérieure de 0,3 à 0,4 $^\circ\text{C}$ au thermocouple TC_2 . Dans ce cas c' est la température du thermocouple TC_2 qui a été retenue pour l'étalonnage.

Lors des cinétiques de refroidissement du corps noir les deux thermocouples donnent la même température.

Le gradient de température existant à l'échauffement n'a pu être expliqué.

3.4. Résultats de l'étalonnage du radiothermomètre.

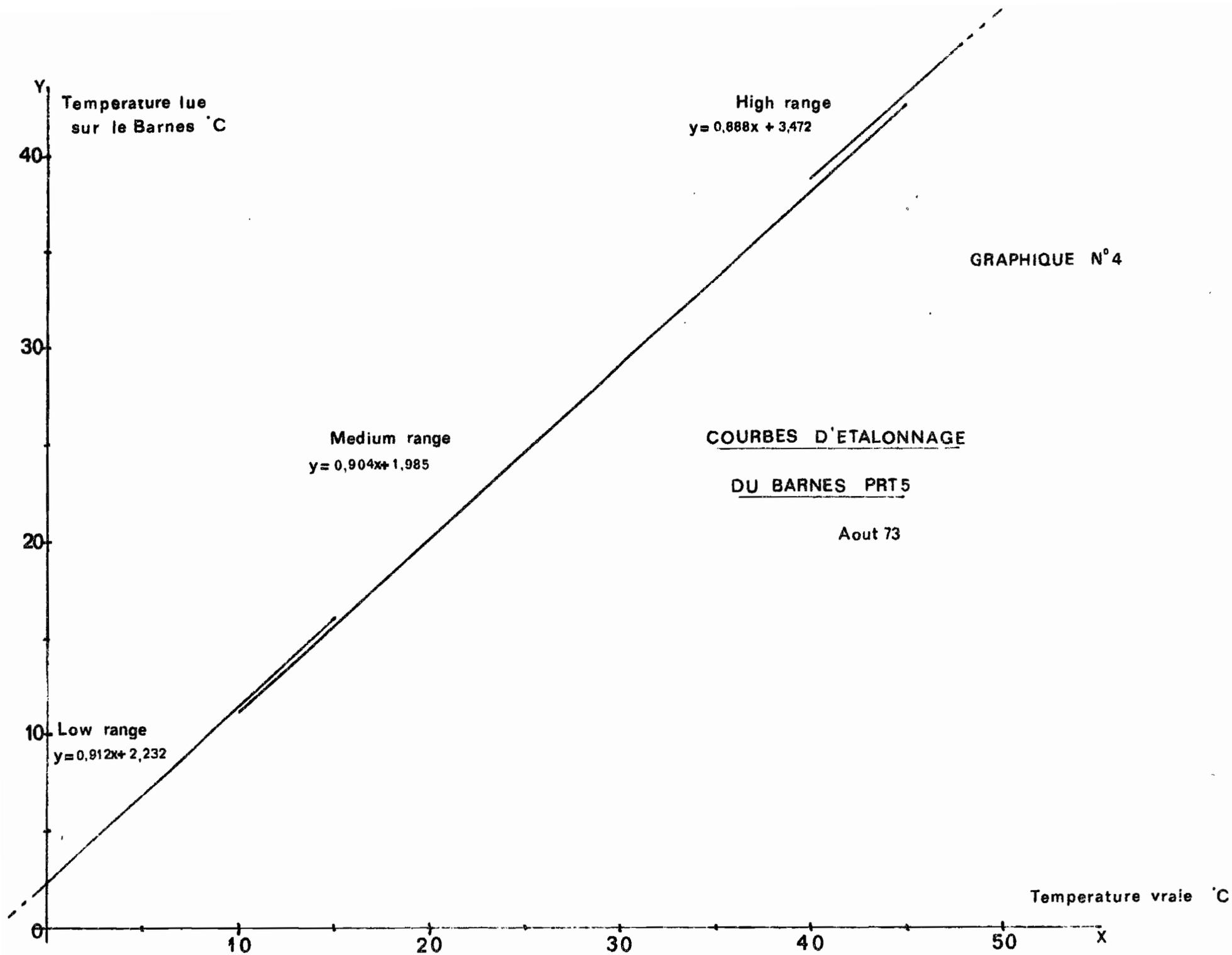
Nous avons effectué deux séries d'étalonnage :

- 1 $^\circ$ - étalonnage de la lecture directe faite sur le cadran du radiomètre, pour les trois échelles et les trois temps de réponse;
- 2 $^\circ$ - étalonnage de la sortie enregistreur (50 mv - 500 Ω) pour les trois échelles et les trois temps de réponse.

Etalonnage 1 (graphique n $^\circ$ 4)

La température lue sur le cadran du radiomètre correspond à la température vraie au voisinage de la température ambiante mais sous estime systématiquement aux températures supérieures et surestime aux températures inférieures.

L'étalonnage a été effectué pour les trois échelles de température (High, Low, Medium), le recouvrement de ces trois échelles n'est pas parfait mais la sensibilité reste pratiquement constante d'une échelle à l'autre.



Nous avons testé la réponse de l'appareil par les différents temps de réponse (5, 50, 500 millisecondes) mais aucune différence significative dans les étalonnages n'a pu être mise en évidence aussi bien dans le cadre de l'étalonnage 1 que dans celui de l'étalonnage 2.

La détermination de l'équation des courbes d'étalonnage a été réalisé par la méthode des moindres carrés (cf. tableau des coefficients).

Etalonnage 2 .

Nous avons étalonné la sortie enregistreur (50 mv 500 Ω) avec comme enregistreur un potentiomètre Philips PR 3500.

Les courbes d'étalonnage obtenues ne sont pas des droites mais des courbes du 4^e degré dont l'ajustement a été réalisé par la méthode des moindres carrés (10); les calculs ont été réalisés sur une calculatrice Hewlett-Packard 9100 B.

Pour les échelles Low et High, les points de mesure n'étant pas suffisamment étalés, un ajustement linéaire donne une précision suffisante (cf. tableau des coefficients d'étalonnage).

3.5. Traitement des données brutes.

Un programme d'exploitation des données sur H-P. 9100 B a été mis au point selon l'organigramme ci-joint, afin de réduire au minimum les calculs intermédiaires.

GRAPHIQUE N°5

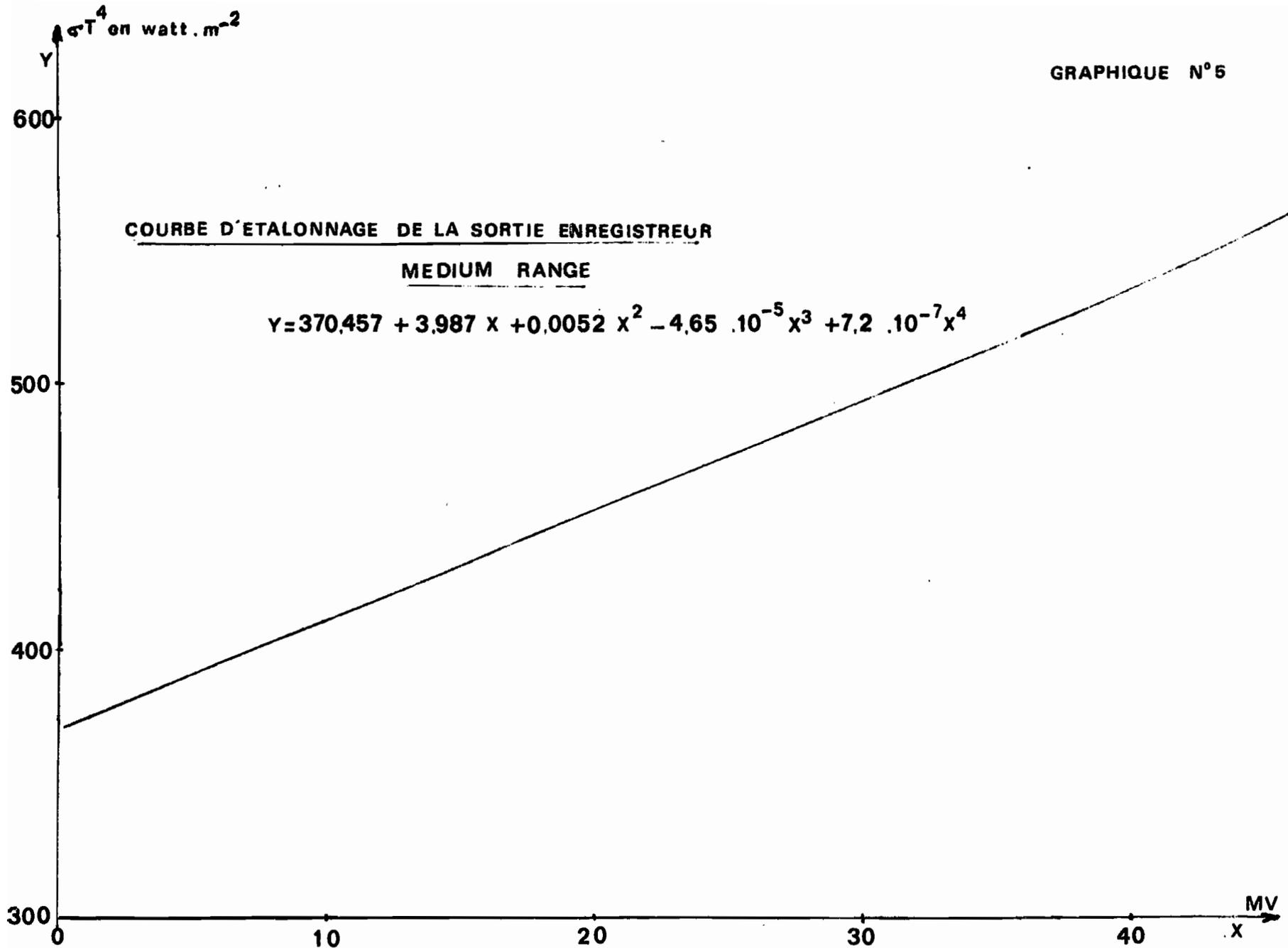


Tableau des coefficients des courbes d'étalonnage de la sortie-enregistreur (50 mV - 500 Ω). Aout 1973.

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$$

avec x en mV

y en Watt. m⁻²

	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
Low Range 0-15°	211,890	3,750	-	-	-
Medium Range	370,457	3,987	5,2. 10 ⁻³	-4,65. 10 ⁻⁵	7,2. 10 ⁻⁷
High Range 40-55°	554,039	6,730	-	-	-

Tableau des coefficients des droites d'étalonnage du BARNES PRT 5. Août 1973

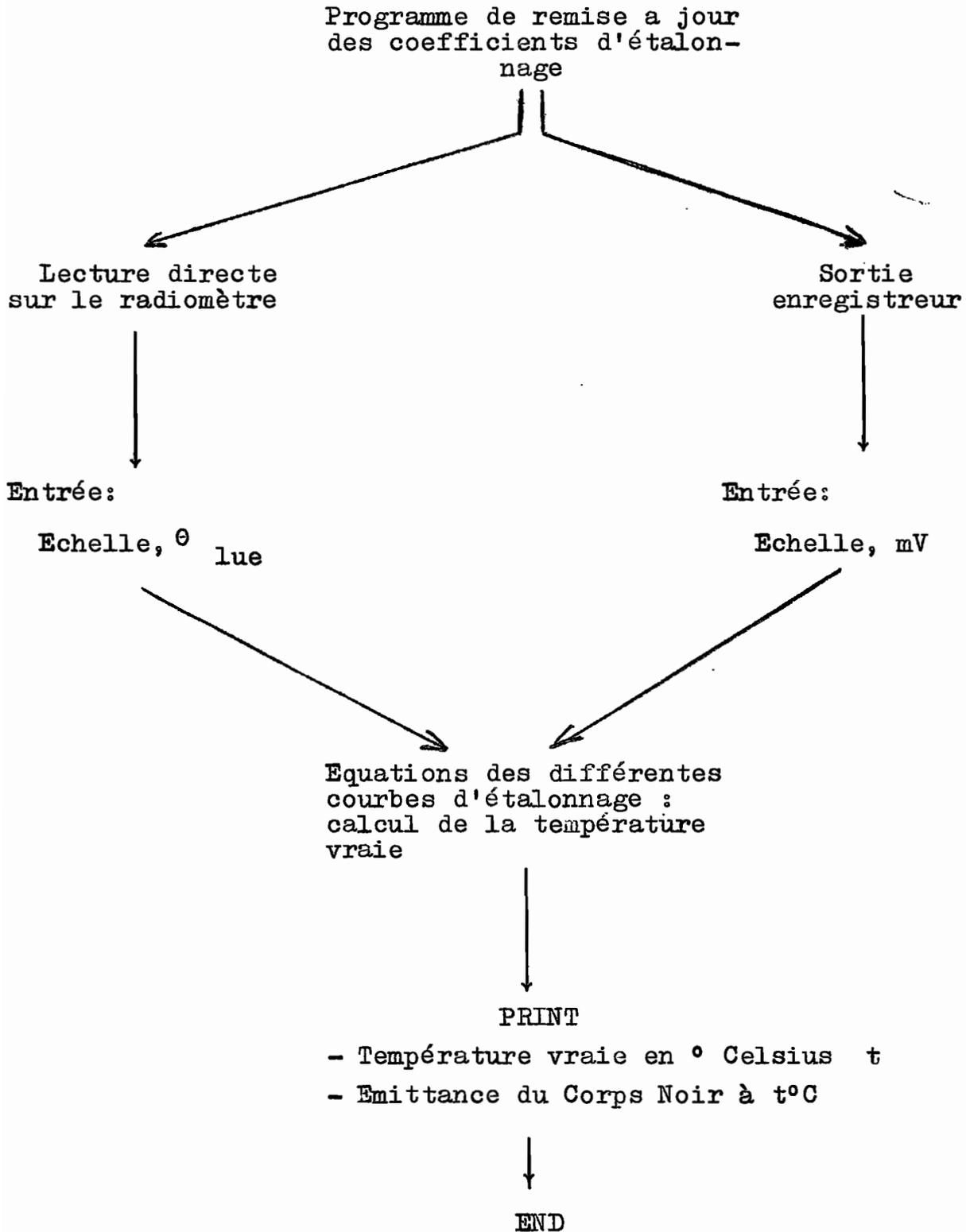
$$y = a_0 + a_1 x$$

y température lue sur le Barnes

x température vraie.

	a ₀	a ₁
Low Range	2,232	0,912
Medium Range	1,985	0,904
High Range	3,472	0,888

Organigramme du programme "Température de surface"
sur H.P. 9100 B.



CONCLUSION

Cet étalonnage, assez long à réaliser, sera complété à l'avenir par une technique moins élaborée mais plus rapide permettant une détection immédiate des variations dans la sensibilité de l'appareil.

L'étalonnage de base ne peut alors être fait qu'environ une fois par an, ou à la suite d'une variation brutale dans la sensibilité de l'appareil.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) J. CONAWAY, C.H.M. VAN BAVEL. 1967.
Evaporation from a wet soil surface calculated from radiometrically determined surface temperatures.
J. appl. Meteor. Vol. 6 p. 650-655.
- (2) R. DURAND. 1970.
Utilisation des thermocouples.
in Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA. p 131-141.
- (3) G. LAMBOLEY, 1970.
Utilisation des thermistances.
in Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA. p. 153-157.
- (4) A. PERRIER, 1970.
Mesure des températures de surface par les méthodes de luminescence.
in Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA. p. 159-167.
- (5) A. PERRIER, 1970.
Mesure des températures de surface par radiométrie infra-rouge.
in Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. INRA. p. 169-178.
- (6) FUCHS M. - TANNER C.B. 1966.
Infrared thermometry of vegetation.
Agronomy Journal Vol.58 - n°6. p 597-601.
- (7) GOSSE G., 1970.
Détermination du facteur d'émission de surfaces végétales en vue de l'utilisation de la thermométrie infra-rouge en bioclimatologie.
D.E.A. de Météorologie dynamique. PARIS, 17 pp.
- (8) G. CHOL et al. 1966.
Les détecteurs de rayonnement infra-rouge.
DUNOD. 231 pp.

(9) E.M. SPARROW - L.U. ALBERS - E.R.G. ECKERT, 1962.
Thermal radiation characteristics of cylindrical
enclosures.
Journal of heat transfer. p. 73-81.

(10) E. MORICE. F. CHARTIER. 1954.
Methode statistique.
Deuxième partie : Analyse statistique. pp 319-322.