

SUR LE FONCTIONNEMENT EN REGIME VARIABLE DU RADIOMETRE THERMOELECTRIQUE A DISQUE RECEPTEUR ABSORBANT

ABDOU MOUMOUNI

Ecole Normale Supérieure, Laboratoire d'Energie Solaire, Bamako, République du Mali

(Reçu le 3 Mai 1967)

Résumé—Le fonctionnement du radiomètre thermoélectrique à disque récepteur absorbant en régime variable (dynamique) est analysé en utilisant la méthode classique: dérivation des équations du régime transitoire relatif à un fonctionnement de l'appareil en régime permanent et application du théorème de Duhamel. Les résultats théoriques conduisent à prévoir une sensibilité variant avec l'ordre de grandeur du flux énergétique mesuré et l'observation, dans certaines conditions, d'une inversion de la f.e.m. thermoélectrique de l'appareil. Ils permettent de discuter le problème d'une interprétation correcte des courbes enregistrées. La comparaison des conclusions théoriques avec les observations expérimentales effectuées sur des radiomètres de différentes sensibilités indique un accord qualitatif et quantitatif satisfaisant entre les résultats théoriques et expérimentaux.

NOTATIONS

- a , rayon de la partie du disque récepteur non en contact thermique avec le bloc de métal;
 H, H' , coefficient d'échange superficiel respectifs aux contacts disque-air et disque-block: $h = H/K$, $h' = H'/K_0$;
 $J_n(\beta)$, fonction de Bessel d'indice n et d'argument β ;
 K, K' , conductivités thermiques n respectives des matériaux constituant le disque et le block;
 l , épaisseur de la tranche du disque considérée;
 q_0, q , flux thermiques incident et absorbé ($q = \epsilon q_0$);
 t , temps;
 ϵ , coefficient d'émission du revêtement absorbant;
 θ_0 , température Celsius du block de métal et de l'air ambiant (et également du contact extrême disque bloc);

- $\theta(r, z)$, température Celsius en un point de la tranche du disque récepteur du radiomètre;
 $\Delta\theta(r, z)$, $= \theta(r, z) - \theta_0$, différence de température entre un point et la masse du métal (ou entre le point considéré et le contact extrême disque bloc).

1. INTRODUCTION

LE FONCTIONNEMENT en régime permanent du radiomètre thermoélectrique à disque récepteur absorbant a été analysé dans un précédent travail [1]. La température du bloc métallique était supposée maintenue constante, condition qui ne coïncide pas toujours avec celles effectivement réalisées dans la pratique de l'utilisation du radiomètre thermoélectrique à disque. En particulier, l'analyse théorique et les observations expérimentales montrent que, lors de la mise en oeuvre de la méthode classique d'enregistrement appliquée par différents auteurs [2, 3, 4], la température du bloc métallique servant de relais thermique dans l'évacuation de la chaleur absorbée par le disque récepteur,

subit des variations dont l'importance dépend de la construction de l'appareil et des conditions concrètes de son utilisation.

L'appareil fonctionnant alors *de facto* en régime variable (dynamique) il est indispensable d'en analyser les conséquences éventuelles et leur répercussion sur le plan d'une interprétation et d'une exploitation correctes des enregistrements obtenus. Dans ce but, nous étudierons successivement le régime transitoire de fonctionnement du radiomètre à température constante du bloc métallique, puis le cas plus général d'un fonctionnement à température variable de ce dernier. Sur la base des résultats de l'étude théorique, les conditions de l'obtention d'enregistrements intégralement utilisables et de leur exploitation correcte sont alors examinées et discutées; enfin, les conclusions théoriques sont confrontées avec les observations expérimentales faites lors de l'étude expérimentale de la répartition de l'énergie du rayonnement concentré dans le plan focal de différents concentrateurs optiques.

2. FONCTIONNEMENT EN RÉGIME TRANSITOIRE DU RADIOMÈTRE THERMOÉLECTRIQUE À DISQUE (TEMPERATURE CONSTANTE DU BLOC MÉTALLIQUE)

2.1. Remarques préliminaires

2.1.1. Les notations sont celles utilisées lors de l'étude du régime permanent [1].

Il en est de même des conditions aux limites indépendantes du temps et des approximations faites dans la conduite des calculs.

2.1.2. En vue de réduire le volume de ces calculs, le faible gradient de température existant dans la tranche du disque récepteur est d'abord négligé. Des résultats obtenus—rigoureusement applicables aux seuls radiomètres dont

l'épaisseur du disque est infiniment petite—on déduit alors, par comparaison avec les résultats de l'étude du régime permanent de fonctionnement, des expressions approchées pour les différents paramètres physiques dans le cas général (épaisseur finie du disque récepteur).

2.2. Equations du régime transitoire dans l'hypothèse d'une variation exclusivement radiale de la température du disque récepteur

2.2.1. Posant

$$v(r, t) = \theta(r, t) - \theta_0; V = \frac{I}{K_0} \int_0^r K(v) dv$$

on obtient pour v et V les équations différentielles et les conditions aux limites ci-dessous:

$$\rho c \frac{\partial v}{\partial t} = KV^2v + \frac{q}{l} + \frac{\partial K}{\partial v} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (t > 0) \quad (2.1)$$

$$K \frac{\partial v}{\partial r} + H'v = 0, \quad (r = a, \quad t > 0) \quad (2.2)$$

$$\rho c \frac{\partial V}{\partial t} = K_0 V^2 V + \frac{q}{l}, \quad (t > 0) \quad (2.1')$$

$$K_0 \frac{\partial V}{\partial r} + H'V = 0, \quad (r = a, \quad t > 0). \quad (2.2')$$

La dernière équation résulte d'une approximation (substitution de V à v comme facteur de H'); enfin, quand la régime permanent est établi ($t \rightarrow \infty$), on doit avoir :

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} + \frac{2}{ah'} \right); h' = \frac{H'}{K_0} \quad (2.3)$$

les pertes sur les deux faces du disque étant considérées comme négligeables.

La solution, ne dépend que de la variable r des équations relatives au paramètre V , elle s'écrit :

$$V(r, t) = \frac{qa^2}{4K_0 l} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} + \frac{2}{ah'} \right) - 2ah' \frac{qa^2}{K_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp - \left(\frac{K_0 \beta_n^2}{\rho c a^2} t \right) J_0 \left(B_n \frac{r}{a} \right)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + a^2 h'^2) J_0(\beta_n)}$$

$$= \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\left[1 - \exp \left(-\frac{K_0 \beta_m^2}{\rho c a^2} t \right) \right] \cdot 8J_1(\beta_m) J_0 \left(\beta_m \frac{r}{a} \right)}{\beta_m^3 [J_0^2(\beta_m) + J_1^2(\beta_m)]}. \quad (2.4)$$

2.3. Solution correspondant à une variation radiale et axiale de la température du disque récepteur

La solution précédente, quand le régime permanent est établi, coïncide avec le résultat obtenu lors de l'étude du régime permanent pour une épaisseur infiniment petite du disque récepteur et en l'absence totale de pertes calorifiques sur les deux faces du disque récepteur. Dans l'approximation correspondant au traitement proposé pour le régime permanent, la solution générale (épaisseur finie du disque récepteur) doit s'écrire :

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0 \left(\beta_n \frac{r}{a} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{K_0 \beta_n^2}{\rho c a^2} t \right) \right] \cdot \beta_n \frac{l}{a} / \operatorname{sh} \beta_n \frac{l}{a}}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \quad (2.5)$$

expression qui tend bien vers la précédente quand $l \rightarrow 0$.

3. FONCTIONNEMENT DU RADIOMÈTRE THERMOÉLECTRIQUES À DISQUE EN RÉGIME VARIABLE

3.1. Remarques préliminaires

3.1.1. Dans le cas du fonctionnement en régime permanent du radiomètre (température constante du bloc métallique), et compte tenu de la définition du paramètre V par la relation

$$V = v \left(1 + \frac{1}{2} kv \right),$$

on voit que la condition satisfaite par ce paramètre à la limite de la zone de contact thermique bloc-disque récepteur est $V = 0$, puisque v s'annule.

3.1.2. Dans le cas où la température du bloc métallique varie dans le temps, $\theta'_0 = \theta_0 + \phi(t)$, la relation satisfaite par le paramètre V devient, en remarquant que

$$v = \theta'_0 - \theta_0 = \phi(t), V = \phi(t) \left[1 + \frac{k}{2} \phi(t) \right].$$

3.1.3. Les deux résultats précédents et l'ensemble des équations (2.1', 2.2') auxquelles doit satisfaire V montrent qu'on peut appliquer le théorème de Duhamel [5, 6] si l'on remarque que l'équation (2.2') n'est qu'une forme explicitée de la condition :

$$K_0 \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{\text{disque}} = K'_0 \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{\text{bloc}}.$$

3.2. Régime variable de fonctionnement de radiomètre dans l'hypothèse d'une variation exclusivement radiale de la température du disque récepteur

3.2.1. L'application du théorème de Duhamel conduit, à partir de la solution correspondant au régime transitoire, à l'expression :

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_0(\beta_n r/a) J_1(\beta_n)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_0(\beta_n r/a) J_1(\beta_n) \exp\left[-\frac{t}{\tau_n}\right]}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \int_0^t \frac{1}{\tau_n} \exp\left(\frac{\lambda}{\tau_n}\right) \phi(\lambda) \left[1 + \frac{k}{2} \phi(\lambda)\right] d\lambda \quad (3.1)$$

le calcul explicite de l'intégrale,

$$I = \int_0^t \frac{1}{\tau_n} \exp\left(\frac{\lambda}{\tau_n}\right) \phi(\lambda) \left[1 + \frac{k}{2} \phi(\lambda)\right] d\lambda = \int_0^t \frac{1}{\tau_n} \exp\left(\frac{\lambda}{\tau_n}\right) \Phi(\lambda) d\lambda.$$

donne le résultat

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \left\{ \Phi(t) - \tau_n \Phi'(t) + \tau_n^2 \Phi''(t) + \dots + (-1)^p \Phi^{(p)} + \dots - \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \left[\Phi(0) - \tau_n \Phi'(0) + \tau_n^2 \Phi''(0) + \dots + (-1)^p \Phi^{(p)}(0) + \dots \right] \right\} \quad (3.2)$$

où l'on a posé, pour la commodité de l'écriture,

$$K = K_0/\rho c, \text{ et } \tau_n = a^2/K\beta_n^2.$$

La présence de l'exponentielle dans le dernier terme entre accolades permet de la négliger si, conformément aux exigences d'un enregistrement correct—exigences généralement satisfaites—la constante de temps de l'appareil est suffisamment faible et la variation avec le temps de la température du bloc métallique du radiomètre (en fait de la région de contact thermique bloc-disque) assez lente (vitesse de translation et refroidissement convenables de l'appareil). L'expression précédente se simplifie alors :

$$V \simeq \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \right) \Phi(t) = \phi(t) \left[1 + \frac{k}{2} \phi(t) \right]. \quad (3.3)$$

3.2.2. Les relations

$$V = v \left(1 + \frac{1}{2} kv \right) \quad E = \alpha v_1 \left(1 + \frac{1}{2} k' v_1 \right)$$

de définition de V et de la f.e.m. thermoélectrique (approximation parabolique) où

$$v = \theta - \theta_0, \quad v_1 = \theta - \theta'_0 = v - \phi(t)$$

permettent de déduire successivement :

$$E = \alpha V \frac{v_1}{v} \cdot \frac{\frac{1 + \frac{k'}{2} v_1}{1 + \frac{k}{2} v}}{=} = \alpha V \frac{v - \phi(t)}{v} \cdot \frac{\frac{1 + \frac{k'}{2} [v - \phi(t)]}{1 + \frac{k}{2} v}}{=}$$

$$E = \alpha \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \frac{v - \phi(t)}{v} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v - \frac{k'}{2} \phi(t) \right] \times \left(\sum \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \right). \quad (3.4)$$

D'où pour f.e.m. thermoélectrique maximum (centre du disque récepteur)

$$E_m = \alpha \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \frac{v_m - \phi(t)}{v_m} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v_m - \frac{k'}{2} \phi(t) \right] \times \left(\sum \frac{8J_1(\beta_n)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \right).$$

$$= \alpha \left(1 + \frac{2}{ah'} \right) \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \frac{v_m - \phi(t)}{v_m} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v_m - \frac{k'}{2} \phi(t) \right]. \quad (3.5)$$

3.2.3. Discussion de la sensibilité de l'appareil fonctionnant en régime variable.

a. L'équation (3.5) correspond à une relation entre E_m et q beaucoup plus complexe que celle relative au fonctionnement de l'appareil en régime permanent.

Il est en particulier manifeste qu'il n'y a plus, dans le cas général, [$\phi(t) \neq 0$], proportionnalité entre la f.e.m. thermoélectrique et l'intensité du rayonnement incident. Pour $\phi(t) = 0$ on retrouve bien cette proportionnalité correspondant à un fonctionnement en régime permanent de l'appareil.

b. On remarque en outre que l'écart à la linéarité est, toutes choses égales par ailleurs, d'autant plus important que le terme variable dans l'expression de la température du bloc métallique a une valeur absolue plus élevée; simultanément, il varie dans le même sens que le rapport de ce terme variable à l'écart de température entre les soudures chaude et froide de l'appareil.

c. Cependant l'incidence des termes non linéaires (relativement à l'intensité du rayonnement incident) dépend étroitement de l'ordre de grandeur de cette dernière :

Pour des valeurs suffisamment grandes de l'intensité du rayonnement incident, l'écart est faible, pourvu que la composante variable de la température du bloc n'ait pas une valeur trop élevée, condition réalisable avec une construction et une réfrigération convenables de l'appareil. Dans le cas contraire, l'écart peut devenir notable et correspond à une valeur par défaut pour l'intensité du rayonnement déduite de la courbe expérimentale en admettant une proportionnalité de la force électromotrice thermoélectrique au flux thermique incident.

Dans le cas de faibles valeurs de l'intensité du rayonnement incident, même pour une valeur relativement faible de la composante variable de la température du bloc, la relation (3.5) écrite sous la forme,

$$\frac{E_m}{q_0} = \alpha \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \frac{\Phi(t)}{q_0} \right] \frac{v_m - \phi(t)}{v_m} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v_m - \frac{k'}{2} \phi(t) \right] \left(1 + \frac{2}{ah'} \right)$$

conduit à distinguer différents cas, suivant l'importance relative de $\phi(t)$ par rapport à v_m .

— Si $v_m < \phi(t)$ on pourra observer une inversion de la f.e.m. thermoélectrique de l'appareil.

— Si $v_m \sim \phi(t)$ sans qu'il y ait forcément inversion de la f.e.m. thermoélectrique on pourra observer selon le cas, une valeur pratiquement nulle ou, dans le cas le plus favorable, considérablement réduite de cette dernière. D'où un écart important par défaut pour la valeur de l'intensité du

rayonnement incident déduite de la courbe enregistrée en admettant une linéarité de la f.e.m. thermoélectrique par rapport au flux incident.

On remarque par ailleurs que dans tous les cas l'incidence des termes non linéaires dépend, comme on pouvait le prévoir, de la sensibilité de l'appareil par l'intermédiaire du terme

$$\Phi(t) \frac{ea^2 q_0}{4K_0 l},$$

sous cet angle et toutes choses égales par ailleurs, l'écart (par défaut) est d'autant plus grand que l'appareil est plus sensible.

3.2.4. Constante de temps et temps de réponse de l'appareil.

En fait, l'expression du paramètre V (3.2) est donnée avec une meilleure approximation et un domaine plus général de validité par :

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a) \Phi(t - \tau_n)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]},$$

ce qui montre qu'on peut adopter comme valeur approchée de la constante de temps de l'appareil

$$\tau_1 = \frac{a^2 \rho c}{K_0 \beta_1^2},$$

résultat qui coïncide bien avec celui déduit de l'étude du régime transitoire de fonctionnement.

3.3. Régime variable de fonctionnement du radiomètre thermoélectrique à disque : variation radiale et axiale de la température du disque récepteur

3.3.1. L'utilisation de la procédure déjà appliquée précédemment (§2) conduit, à partir des résultats du paragraphe précédent, à l'expression générale :

$$V = \frac{qa^2}{4K_0 l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a) (\beta_n l/a)/(sh\beta_n l/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a) (\beta_n l/a)/(sh\beta_n l/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \times \Phi(t - \tau_n). \quad (3.6)$$

3.3.2. On obtient, pour la f.e.m. thermoélectrique une forme généralisée de l'équation (3.4) :

$$E \simeq \alpha \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \frac{v - \phi(t)}{v} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v - \frac{k'}{2} \phi(t) \right] \times \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) J_0(\beta_n r/a) (\beta_n l/a)/(sh\beta_n l/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \right).$$

En particulier

$$E_m \simeq \alpha \left[\frac{qa^2}{4K_0 l} + \Phi(t) \right] \frac{v_m - \phi(t)}{v_m} \left[1 + \frac{k' - k}{2} v_m - \frac{k'}{k} \phi(t) \right] \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{8J_1(\beta_n) (\beta_n l/a)/(sh\beta_n l/a)}{\beta_n^3 [J_0^2(\beta_n) + J_1^2(\beta_n)]} \right).$$

3.3.3. La discussion de la sensibilité de l'appareil s'effectue alors de façon tout à fait parallèle à celle conduite plus haut et les différentes conclusions correspondantes gardent toute leur validité, à la réduction près de la sensibilité de l'appareil, du fait de l'épaisseur finie du disque récepteur.

4. COMPARAISON DES RÉSULTATS THÉORIQUES AVEC LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES; PROBLÈMES POSÉS PAR L'INTERPRETATION ET L'EXPLOITATION DES ENREGISTREMENTS

4.1. *Considérations générales relatives aux conséquences d'un fonctionnement en régime variable du radiomètre. Validité de la courbe expérimentale enregistrée*

4.1.1. Les résultats de la discussion de la sensibilité de l'appareil indiquent que dans le cas de l'étude expérimentale d'une répartition de flux énergétique (exploration de la tache focale d'un concentrateur optique), l'enregistrement obtenu ne correspond à la distribution réelle que si la température du bloc métallique du radiomètre demeure constante ou varie peu au cours du déplacement de ce dernier. Cette condition, qui n'est jamais rigoureusement satisfaite dans la pratique, semble cependant pouvoir l'être approximativement par un choix judicieux des différentes caractéristiques et une construction particulièrement étudiée de l'appareil.

4.1.2. En général, la courbe enregistrée ne peut être considérée comme donnant une image correcte de la répartition étudiée que pour de grandes valeurs de flux énergétique (zone centrale de la tache explorée) en supposant le radiomètre convenablement refroidi. Un écart subsiste d'ailleurs entre les valeurs réelle et déduite de la courbe du flux mesuré, écart d'autant plus faible que la température du bloc varie moins pendant l'enregistrement. Pour les faibles valeurs de flux énergétique (région périphérique), l'écart est généralement important. Selon le cas (sensibilité du radiomètre et efficacité du dispositif de refroidissement), on pourra observer une inversion ou non de la f.e.m. thermoélectrique; la présence de ce phénomène pouvant servir de critère d'appréciation d'une construction, d'un fonctionnement et d'une sensibilité satisfaisants de l'appareil. Il y a exception quand la température du bloc varie peu pendant l'enregistrement et, si l'on s'adresse à la moitié de la courbe qui correspond à la décroissance observée de la température du

bloc après passage du radiomètre dans la zone de flux énergétique maximum. Là encore, les phénomènes seront plus ou moins nets suivant la sensibilité et la construction générale de l'appareil.

4.1.3. Ce qui précède indique que l'on doit aborder la question de l'interprétation et de l'exploitation des enregistrements de radiomètres à disque avec beaucoup de circonspection, surtout qu'il s'agit des portions de la courbe expérimentale relatives aux faibles valeurs de l'intensité du rayonnement. Il semble justifié de considérer que tant que l'inversion signalée de la f.e.m. thermoélectrique n'est pas observée sur la courbe expérimentale, cette dernière ne peut raisonnablement servir de base à une représentation correcte de la distribution étudiée.

4.2. *Comparaison des résultats théoriques avec les observations expérimentales relatives à différents radiomètres à disque*

Différents auteurs ont utilisé le radiomètre thermoélectrique à disque dans l'étude expérimentale de la répartition de l'énergie du rayonnement concentré dans le plan focal de divers concentrateurs optiques (miroirs paraboliques de révolution, systèmes de lentilles, etc.). Les radiomètres employés comportent toujours un dispositif de refroidissement du bloc métallique et fonctionnent néanmoins en régime variable eu égard à leurs dimensions, aux conditions géométriques de leur déplacement dans le plan focal et à l'ordre de grandeur du flux énergétique moyen dans la tache focale (quelques centaines de calories/cm²s). Par ailleurs, d'autres méthodes de mesure (calorimétriques, photométriques) ont été concurremment utilisées pour l'exploration de la tache focale des concentrateurs optiques de rayonnement, ce qui fournit une base de comparaison et d'appréciation.

4.2.1. Blau [2], Lazlo [3], Glaser [4] et l'auteur ont étudié la répartition de l'énergie dans le plan focal de miroirs paraboliques avec

des radiomètres thermoélectriques à disque de caractéristiques différentes (mais malheureusement rarement publiées). Les courbes correspondantes ont une allure générale illustrée

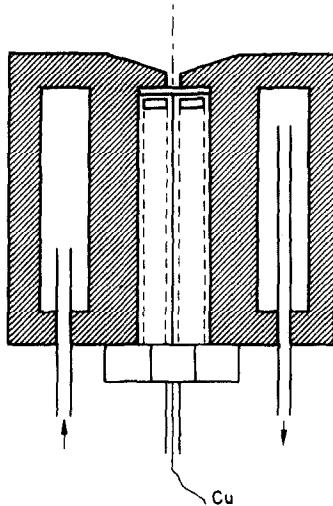


FIG. 1. Radiomètre à bloc de cuivre et disque de constantan (thermocouple cuivre constantan) et réfrigération par circulation d'eau, utilisé par l'auteur avec des disques de différentes épaisseurs.

par la Fig. 2: maximum très aigu au foyer, décroissance exponentielle de part et d'autre.

4.2.2. L'auteur, avec le radiomètre de la Fig. 1 et en faisant varier progressivement l'épaisseur

du disque récepteur de 0,2 à 0,1 mm, a pu observer le passage graduel du type de courbe précédent à des courbes présentant une inversion de la f.e.m. thermoélectrique sur la

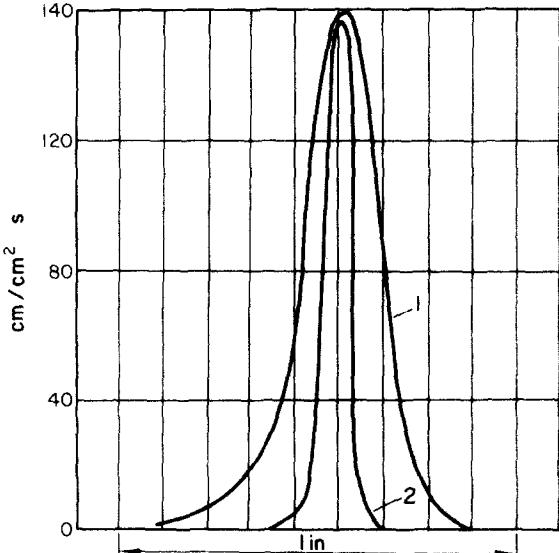


FIG. 2. Courbes d'allure exponentielle à décroissance monotone, obtenues par différents auteurs (T. S. Lazlo, H. Blau, P. Glaser).

première moitié de l'enregistrement, et ce dans le cas de tous les miroirs paraboliques précis étudiés aux laboratoires de l'Energie Solaire et des Ultra-Réfractaires à Mont-Louis (Figs. 3, 4). En même temps, sur la deuxième moitié du

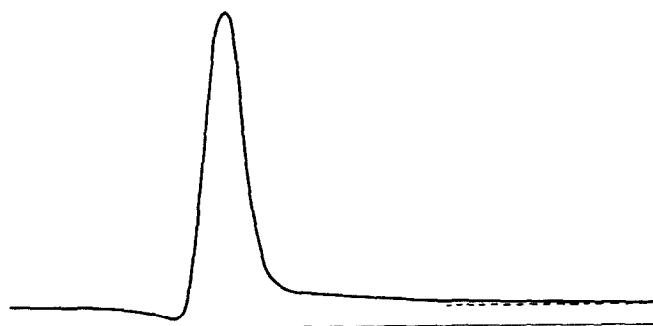


FIG. 3. Courbe enregistré par l'auteur lors de l'exploration radiométrique de la tache focale d'un miroir parabolique de 2 m du Laboratoire de Mont-Louis (on remarque l'apparition de l'inversion de la f.e.m. thermoélectrique sur une moitié de l'enregistrement).

même enregistrement, on observe un maximum secondaire dont l'existence, prévue théoriquement, est confirmée par des mesures photométriques [7, 8]. Il est remarquable qu'une

(2) Les résultats théoriques indiquent, dans le cas général, un fonctionnement dynamique du radiomètre caractérisé par une sensibilité variable (non linéarité de la f.e.m. thermo-

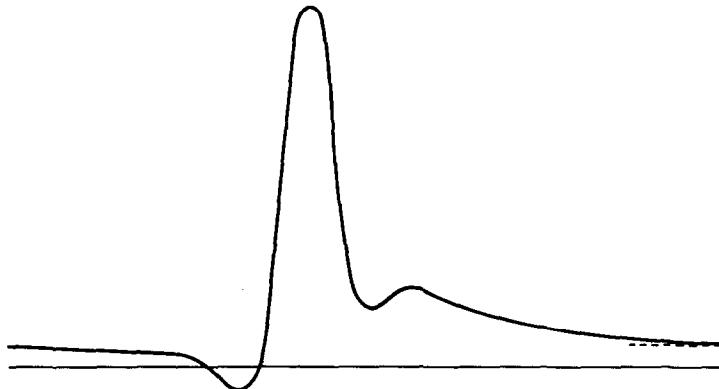


FIG. 4. Courbe enregistrée dans les mêmes conditions avec un radiomètre de plus grande sensibilité (disque de plus faible épaisseur).

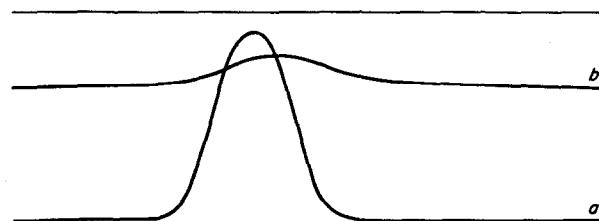


FIG. 5. Courbes enregistrées avec un radiomètre de construction différente. *a*. Courbe correspondant à la variation de la densité de flux énergétique dans la tache focale d'un miroir parabolique de 2 m. *b*, Courbe illustrant la variation de la température du bloc de cuivre (soudure froide) de l'appareil.

amélioration ultérieure de la sensibilité ramène à des courbes du premier type, du moins dans des conditions apparemment défavorables d'enregistrement (température du bloc métallique variant notablement du fait de la taille de l'appareil, malgré une double réfrigération de l'appareil utilisé, comme le montre la deuxième courbe de la Fig. 5).

5. CONCLUSIONS

(1) Le traitement théorique proposé confirme le caractère très complexe—observé expérimentalement—du fonctionnement des radiomètres thermoélectriques à disque.

électrique par rapport à l'intensité du rayonnement incident). Il en résulte des écarts entre les valeurs mesurée et réelle de cette dernière, écarts d'autant plus notables que l'intensité est plus faible.

(3) Les observations expérimentales semblent confirmer les conclusions théoriques en même temps qu'elles nontrent les difficultés réelles de réalisation d'un appareil, qui en régime dynamique de fonctionnement, conduise à une courbe "correcte" pour les valeurs faibles de l'intensité du rayonnement étudié.

(4) Les particularités du régime dynamique de fonctionnement du radiomètre thermo-

électrique à disque semblent expliquer la non observation par différents expérimentateurs, du maximum secondaire de flux énergétique du rayonnement concentré dans le plan focal des miroirs paraboliques précis, maximum dont l'existence est pourtant établie dans ce cas par des méthodes de mesure indépendantes.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. MOUMOUNI, Analyse des particularités du fonctionnement des radiomètres thermoélectriques à disque récepteur absorbant en régime permanent, *Int. J. Heat Mass Transfer* **10**, 1339 (1967).
2. H. H. BLAU, Measurement of flux, emittance and related properties, in *Proceedings of an International*

Symposium on High Temperature Technology, p. 45. McGraw-Hill, New York (1960).

3. T. S. LAZLO, Temperature and flux distribution vs. geometrical perfection, *Sol. Energy* **1**, 2/3, 78 (1957); **6** (2), 69 (1962).
4. P. GLASER, Industrial applications—the challenge to solar furnace research, in *Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy*, p. 360. United Nations, New York (1964).
5. H. S. CARSLAW and J. C. JAEGER, *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford (1959).
6. R. COURANT and D. HILBERT, *Methods of Mathematical Physics*. Interscience, New York (1962).
7. A. MOUMOUNI, *C.R. Hebd. Séanc. Acad. Sci. Paris* **263**, série B, 5-265, (1966).
8. R. APARISSI, Eksperimentalnjaja ustavovka dlja poluchenija vusokikh temperatur, *Ispolzovanie solnechnoj energii Sbnik I*, Izd-vo Akad. Nauk S.S.R. 151 (1957).

Abstract—The dynamic functioning of the circular foil radiometer is analysed by the classical method: derivation of equations for the transient temperature distribution corresponding to a steady regime of functioning of the instrument and further use of the Duhamel theorem. The theoretical results lead to a sensitivity changing with the incident flux magnitude and permits the anticipation of the observation under definite conditions, of a reversal for the instrument thermoelectric e.m.f. They also give a basis for discussing the question of a correct interpretation with regard to registered experimental curves. Comparison with observations made on several circular foil radiometers having different sensitivities shows a qualitative and quantitative satisfactory agreement between theoretical results and experimental data.

Zusammenfassung—Die dynamische Arbeitsweise eines Kreisfolien-Radiometers wird nach der klassischen Methode analysiert: Ableitung der Gleichungen für die instationäre Temperaturverteilung entsprechend einem stationären Regime der Arbeitsweise des Instruments und darauf folgender Anwendung des Duhamel Theorems. Die theoretischen Ergebnisse führen zu einer Änderung der Empfindlichkeit, abhängig von der Grösse des einfallenden Stromes und erlauben unter bestimmten Bedingungen die Vorausberechnung der Umkehr der thermoelektrischen EMK des Instruments. Sie schaffen auch eine Grundlage zur Diskussion der Frage einer korrekten Interpretation der aufgezeichneten Versuchskurven. Ein Vergleich von Beobachtungen an mehreren Kreisfolien-Radiometern von unterschiedlicher Empfindlichkeit zeigt qualitativ und quantitativ befriedigende Übereinstimmung zwischen theoretischen Ergebnissen und experimentellen Werten.

Аннотация—Для анализа динамической характеристики кругового радиометра из фольги применяется классический метод: выводятся уравнения для нестационарного температурного распределения, соответствующего стационарному режиму работы прибора, а затем используется теорема Дюамеля. Теоретические результаты показывают изменение чувствительности при изменении величины падающего потока и дают возможность наблюдателю при определенных условиях заранее рассчитать перемену знака термо — д.с. прибора.

На основе этих результатов обсуждается вопрос о правильной обработке данных с учетом экспериментальных кривых. Сравнение с наблюдениями, сделанными на основе работы нескольких круговых радиометров из фольги, имеющих различную чувствительность, показывает удовлетворительное качественное и количественное соответствие теоретических результатов с экспериментальными данными.