# De l'emploi des matières plastiques comme insolateurs à bas potentiel

H. Masson

LE JOURNAL DE PHYSIQUE ET LE RADIUM
PHYSIQUE APPLIQUÉE

SUPPLÉMENT AU N° 7.
TOME 20, JUILLET 1959, PAGE 76 A.

# DE L'EMPLOI DES MATIÈRES PLASTIQUES COMME INSOLATEURS A BAS POTENTIEL

Par H. MASSON,

Laboratoire de Physique Météorologique, Faculté des Sciences de Dakar.

**Résumé.** — L'échauffement par le soleil de quantités importantes d'eau peut se faire commodément en utilisant des gaines en matière plastique. On expose ici comment il est possible de calculer rapidement les possibilités de ce genre d'insolateur dans les conditions d'emploi données.

**Abstract.** — Heating of large quantities of water by means of the sun, can be easily done by the use of containers made of plastic material. Calculations necessary for such insolators, under practical conditions, are given in a simplified manner.

On appelle insolateur à bas potentiel un dispositif de chauffage permettant d'obtenir des élévations de température relativement faibles. Sont par conséquent exclus de la définition les appareils utilisant la concentration des rayons solaires. Le fluide à échauffer peut être liquide ou gazeux. Dans ce qui va suivre, nous considérerons uniquement le cas de l'eau.

S'il s'agit d'échauffer de faibles quantités d'eau c'est-à-dire d'obtenir des températures maximum, on peut recouvrir l'eau d'une substance destinée à absorber la chaleur et à la transmettre à l'eau (tôle noire par exemple). La théorie du procédé a fait l'objet d'une étude précédente [1].

On peut au contraire envisager d'élever de quelques degrés l'eau s'écoulant sous un grand débit. Dans ce cas il faudra utiliser de grandes surfaces et l'insolateur précédent, d'un prix de revient trop élevé au m$^2$, n'est plus rentable.

Dans ce qui va suivre on étudiera l'échauffement de l'eau circulant dans des « gaines » de matière plastique transparente. Les gaines utilisées doivent être évidemment d'un prix de revient assez bas, par mètre carré.

On sait que par application du procédé Claude Boucherot on peut utiliser en vue de la production de la force motrice les faibles différences de température qui existent entre la surface des mers tropicales et le fond (Énergie thermique des mers). Ces différences de température sont faibles (de l'ordre de 20 °C). On conçoit qu'une élévation peu importante de la source chaude puisse avoir pour conséquence une augmentation sensible du rendement théorique. On peut admettre en effet que pour les pressions considérées le rendement est proportionnel au carré des différences de température des sources.

**Définition du paramètre.** — On suppose la température de la gaine égale à celle de l'eau. L'ensemble est transparent. Toute la radiation incidente n'est donc pas utilisée. Si $Q$ est le nombre de calories reçues du soleil par seconde et par cm$^2$, une fraction $KQ$ seulement servira à échauffer l'eau.

Soit $x$ la longueur du parcours de l'eau soumise à l'échauffement, $V$ sa vitesse, $l$ la largeur de la gaine ; $\theta$ la durée du parcours, $S = lx$ est donc la surface insolée. La température de l'eau à l'entrée est $t_i$. $t$ est sa température quand elle a circulé pendant le temps $\theta$. On désigne par $t_a$ la température de l'air et par $t_s$ la température du sol. Pendant le temps $\mathrm{d}\theta$ l'espace parcouru par l'eau $\mathrm{d}x = V\,\mathrm{d}\theta$. $C_p$ et $C'_p$ sont les coefficients de perte des parois en contact avec l'air et avec le sol. Ce sont respectivement les quantités de chaleur perdues par seconde et par cm$^2$ de parois quand il y a entre cette paroi et le milieu (air ou sol) une différence de température de 1 °C.

**Étude théorique.** — L'eau durant le temps $\mathrm{d}\theta$ reçoit la quantité de chaleur $KQl\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\theta$. Mais pendant ce même temps elle perd par les parois :

$$C_p\, l\, \mathrm{d}x\, \mathrm{d}\theta(t - t_a) \quad \text{et} \quad C'_p\, l\, \mathrm{d}x\, \mathrm{d}\theta(t - t_s).$$

La quantité de chaleur conservée par l'eau sert à élever la température de la tranche considérée. Cette quantité de chaleur s'exprime par $\sigma V\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}t$ en appelant $\sigma$ la section droite de la gaine.

On a donc l'équation :

$$KQl\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\theta - C_p(t - t_a)\, l\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\theta - C'_p(t - t_s)\, l\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}\theta = \sigma V\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}t$$

et puisque $\mathrm{d}x = v\,\mathrm{d}\theta$

$$KQl\,\mathrm{d}\theta - C_p(t - t_a)\, l\,\mathrm{d}\theta - C'_p(t - t_s)\, l\,\mathrm{d}\theta = \sigma\,\mathrm{d}t. \quad (1)$$

Soit $t_i$ la température au temps zéro.

Si

$$C_p = C'_p = 0 \qquad \mathrm{d}t = \frac{KQl\,\mathrm{d}\theta}{\sigma} \qquad t - t_i = \frac{lKQ}{\sigma}\theta.$$

S'il n'y a pas de perte, l'élévation de température $\Delta t = t - t_i$ est proportionnelle à $Q$.

[1] *Journal de Physique et le Radium* (*Physique appliquée*, juin 1956, **17**, pp. 108 A-110 A).

Dans la suite nous supposerons toujours $C_p$ et $C'_p \neq 0$.

L'équation (1) donne donc :

$$d\theta = \frac{\sigma}{l} \frac{dt}{KQ + C_p t_a + C'_p t_s - (C_p + C'_p) t}$$

$$= -\frac{\sigma}{l(C_p + C'_p)} \frac{dt}{t - \dfrac{KQ + C_p t_a + C'_p t_s}{C_p + C'_p}}.$$

En intégrant et en tenant compte de la température initiale $t_i$ de l'eau on obtient :

$$t - \frac{KQ + C_p t_a + C'_p t_s}{C_p + C'_p}$$

$$= \left(t_i - \frac{KQ + C_p t_a + C'_p t_s}{C_p + C'_p}\right) e^{-\frac{l}{\sigma}(C_p + C'_p)\theta}.$$

Posons

$$B = \frac{KQ + C_p t_a + C'_p t_s}{C_p + C'_p}$$

l'équation précédente devient :

$$t - B = (t_i - B)\, e^{-\frac{l}{\sigma}(C_p + C'_p)\theta}$$

et en écrivant $\Delta t = t - t_i$

$$\Delta t = (B - t_i)\left(1 - e^{-\frac{l}{\sigma}(C_p + C'_p)\theta}\right) \qquad (2)$$

Si $\theta = 0$ $\quad \Delta t = 0 \quad t = t_i$

Si $\theta = \infty$ $\quad t = B = \dfrac{KQ + C_p t_a + C_p t_s}{C_p + C'_p}.$

Les coefficients de perte. — En pratique $C_p \# C'_p$. On peut écrire : $C_p = C'_p = C$ d'où

$$B = \frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2}.$$

Quand $C$ est très grand $B \# \dfrac{t_a + t_s}{2}$.

Il est commode pour calculer $C$ de prendre $Q = 0$ (on laisse le système se refroidir). $\Delta t$ est alors négatif. L'équation (2) devient :

$$\Delta t = \left(\frac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)\left(1 - e^{-2lC\theta/\sigma}\right)$$

D'où

$$C = \frac{\sigma}{2l\theta} \operatorname{Log}\left(\frac{t_a + t_s - 2t_i}{t_a + t_s - 2t_i - 2\Delta t}\right).$$

Dans le cas d'une gaine cylindrique l'expression se simplifie. Si $d$ est le diamètre du cylindre

$$\left(l = \frac{\pi d}{2}\right)$$

$$C = \frac{d}{4\theta} \operatorname{Log}\left(\frac{t_a + t_s - 2t_i}{t_a + t_s - 2t_i - 2\Delta t}\right). \qquad (3)$$

On peut étudier le refroidissement d'un cylindre plein d'eau dont les parois sont constitués par un échantillon de la matière plastique étudiée. La moitié de la surface rayonne dans l'air, l'autre moitié est en contact avec le sol. En appliquant la relation (3) à un cylindre de Rilsan (épaisseur 150 $\mu$) et à un cylindre de Polyane (épaisseur 75 $\mu$) on obtient :

Pour le Rilsan :

$$C = \frac{3,2}{10^4} \pm \frac{0,2}{10^4} \text{ C. G. S.}$$

Pour le Polyane :

$$C = \frac{8,0}{10^4} \pm \frac{0,2}{10^4} \text{ C. G. S.}$$

Discussion. — La courbe représentative de $\Delta t$ en fonction du temps (équation 2) est de la forme indiquée sur la figure 1. $\Delta t$ croît constamment. La concavité de la courbe reste tournée vers les ordonnées négatives. Au temps $\theta = \dfrac{\sigma}{2lC}$ l'élévation de température atteint les 63/100 de sa valeur maximum.

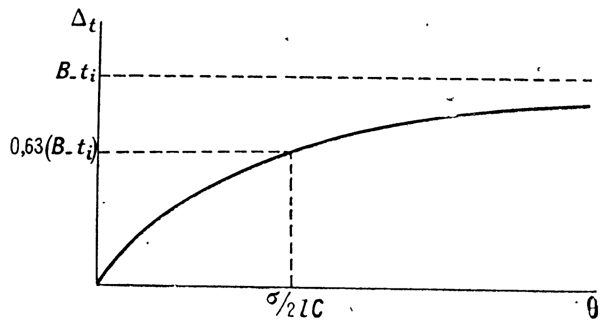


Fig. 1. — Élévation de température en fonction du temps.

La quantité de chaleur utilisée au bout du temps $\theta$ est :

$$Q = \sigma x \left(\frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)\left(1 - e^{-\frac{2lC\theta}{\sigma}}\right).$$

On peut définir le rendement $\rho$ par le rapport entre la quantité de chaleur utilisée à l'échauffement de l'eau et la quantité de chaleur reçue du soleil. On aura :

$$\rho = \frac{\sigma x \left(\dfrac{KQ}{2C} + \dfrac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)\left(1 - e^{-\frac{2lC\theta}{\sigma}}\right)}{KQxl\,\theta}. \qquad (4)$$

Posons :

$$\rho = \frac{P(1 - e^{-\alpha\theta})}{\theta}$$

avec

$$P = \frac{\sigma x\left(\dfrac{KQ}{2C} + \dfrac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)}{KQxl} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{2lC}{\sigma}.$$

Si $\theta \# 0$ on aura $\rho \# P\alpha$.

D'autre part

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \frac{P\,\theta\alpha\, e^{-\alpha\theta} - P(1 - e^{-\alpha\theta})}{\theta^2}$$

$$= \frac{P}{\theta^2}(\alpha\theta + 1)\left(\frac{1}{e^{\alpha\theta}} - \frac{1}{\alpha\theta + 1}\right).$$

Comme $e^{\alpha\theta}$ est toujours supérieur à $\alpha\theta + 1$, la deuxième parenthèse est toujours négative et la dérivée est toujours du signe contraire de $\rho$.

Si P est positif c'est-à-dire si $\frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2} > t_i$, le rendement décroît quand le temps croît. Sa valeur initiale maximum pour $\theta \# 0$, obtenue en développant $1 - e^{-\alpha\theta}$, en série est

$$\rho_0 = P\alpha = \frac{2C}{KQ}\left(\frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)$$

$$= 1 + \frac{C}{KQ}(t_a + t_s - 2t_i).$$

La valeur de $\rho_0$ dépend du signe de $t_a + t_s - 2t_i$.

Si $t_i > \frac{t_a + t_s}{2}$, $\rho_0 < 1$ la chaleur $Q_0$ reçue à l'instant $\theta \# 0$ est en partie perdue par la paroi.

Si $t_i = \frac{t_a + t_s}{2}$, $\rho_0 = 1$. A l'instant $\theta = 0$ il n'y a aucun échange de chaleur par la paroi.

Si $t_i < \frac{t_a + t_s}{2}$, $\rho_0 > 1$. A l'instant $\theta = 0$ les parois contribuent à échauffer l'eau. Le rayonnement n'est pas la seule source de chaleur.

Pour $\theta = \infty$, $\rho = 0$.

La courbe du rendement à l'allure indiquée sur la figure 2.

Enfin si $P < 0$ c'est-à-dire si $t_i > \frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2}$ l'eau perd de la chaleur ($\Delta t < 0$).

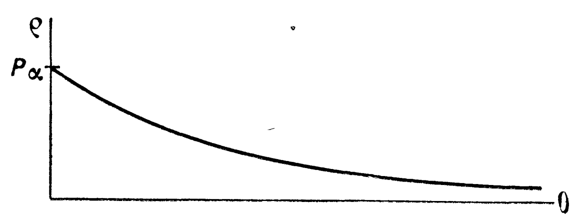


FIG. 2. — Variation du rendement en fonction du temps d'insolation.

CALCUL DES TEMPÉRATURES EN FONCTION DU DÉBIT ET DE LA LONGUEUR DU PARCOURS. — On suppose que l'eau s'écoule en régime continu à la vitesse $V$, $x$ étant le chemin parcouru. L'équation (1) donne en remplaçant $\theta$ par $\frac{x}{V}$

$$\Delta t = (B - t_i)\left(1 - e^{-\frac{2lCx}{\sigma V}}\right).$$

D'où l'on tire, puisque le débit $D = \sigma V$

$$\Delta t = (B - t_i)(1 - e^{-2lCx/D})$$

$$= \left(\frac{KQ}{2C} + \frac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)(1 - e^{-2lCx/D}). \quad (5)$$

Cherchons la longueur correspondant à une valeur de $\Delta t = 0{,}63\,(B - t_i)$. On a :

$$\frac{x}{D} = \frac{1}{2lC}.$$

Il peut être intéressant d'autre part d'étudier la variation de $\Delta t$ en fonction du débit pour une longueur d'onde donnée.

De l'équation (5) on tire pour

$$D = 0 \qquad \Delta t = (B - t_i)$$

$$D = \infty \qquad \Delta t = 0.$$

La dérivée première

$$\frac{d(\Delta t)}{dD} = -(B - t_i)\frac{2lCx}{D^2}e^{-\frac{2lCx}{D}}$$

est toujours négative si $B > t_i$.

Donc $\Delta t$ diminue quand le débit augmente.

La dérivée seconde

$$\frac{d^2(\Delta t)}{dD^2} = \frac{4(B - t_i)\,lCx\,e^{-2lCx/D}}{D^4}(D - lCx)$$

s'annule pour $D = lCx$. La courbe présente pour cette valeur un point d'inflexion. Elle aura l'allure indiquée par la figure 3.

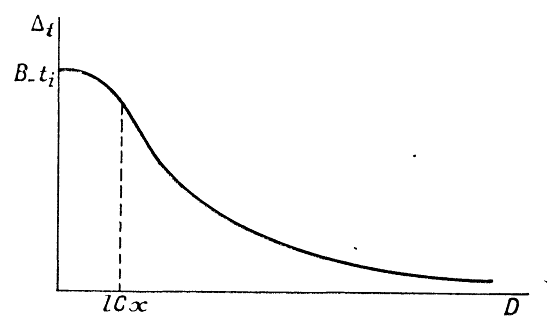


FIG. 3. — Variation de $\Delta t$ en fonction du débit.

Définissons le rendement comme précédemment par le rapport entre la quantité de chaleur reçue par la gaine et celle fournie à la gaine par le soleil. On a :

$$\rho = \frac{V\sigma\left(\frac{KQ}{2} + \frac{t_a + t_s}{2} - t_i\right)(1 - e^{-2lCx/D})}{KQlx} \quad (6)$$

avec $V\sigma = D$.

Quand $D$ tend vers l'infini, le rendement tend vers la valeur

$$\rho_l = 1 + \frac{t_a + t_s - 2t_i}{\frac{KQ}{C}}. \quad (7)$$

**Étude expérimentale.** — La théorie précédente permet le calcul rapide des caractéristiques d'un insolateur dans des conditions d'emploi déterminées. Prenons à titre d'exemple des expériences faites sur du Polyane d'épaisseur 75 μ. Des mesures préliminaires ont fourni les valeurs suivantes :

$C = 8 \times 10^{-4}$ C. G. S. $t_a = 25$ °C $t_s = 31$ °C
(au voisinage immédiat de la gaine)

$t_i = 29$ °C $K = 0{,}83$

$Q = 0{,}94$/cal/min/cm².

On trouve ainsi $B - t_i = 17{,}1$ °C (élévation de température maximum). On peut calculer facilement à partir de quelle longueur $x$ de gaine $\Delta t = 0{,}63\ (B - t_i)$. On trouve $x = \dfrac{D}{2lC} \# 13{,}9$ m. On voit qu'il serait onéreux et sans profit de chercher à obtenir des valeurs de $\Delta t$ égales à 0,99 $(B - t_i)$ par exemple. Il faudrait une longueur de 55 m.

Sur la figure 4, ont été juxtaposées la courbe théorique et la courbe expérimentale. Les températures à l'intérieur de l'eau ont été enregistrées à l'aide d'aiguilles thermoélectriques. La courbe expérimentale est au-dessus de la courbe théorique. L'échauffement est plus rapide que ne le prévoit la théorie. Le sol, au voisinage immédiat de la gaine, chauffé par le rayonnement solaire, contribue à l'échauffement de l'eau. Les rendements $\rho$ et $\rho_l$ exprimés en 6 et en 7 sont ici supérieurs à 1 (on est donc dans le cas où $t_a + t_s > 2t_i$). Dans le cas présent $\rho_l = 1{,}11$. On a trouvé pour $\rho$ les valeurs expérimentales suivantes :

Au bout d'un mois 0,75, au bout de deux mois 0,71, au bout de trois mois 0,55.

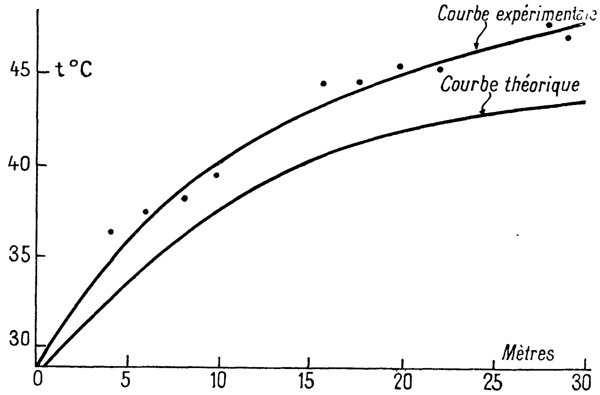


Fig. 4. — Température d'une eau circulant dans un tube de matière plastique avec un débit de 180 litres à l'heure.

La rentabilité du procédé dépend évidemment de la résistance aux agents atmosphériques de la matière plastique utilisée. Des expériences sont en cours avec des matières plastiques susceptibles de résister sans altération durant 5 ans aux différents agents atmosphériques.

Manuscrit reçu le 15 juin 1959.