

Optimum de l'effet de serre

par G. RITOUX,
U.E.R. des Sciences
Université de Clermont II.

Dans le bulletin de l'Union des Physiciens n° 586, de juillet - août - septembre 1976, consacré à l'énergie solaire et l'énergie nucléaire, un des articles signé : J. FLÉCHON, G. MARTIN et J. TOURÉ était consacré à : *l'Etude de l'insolateur plan de capacité calorifique constante.*

Le paragraphe I. de l'article était consacré à l'étude thermostatique de l'insolateur. Les auteurs y étudiaient l'effet de serre d'un capteur sous vitrages et montraient brièvement qu'il existe un nombre optimum n de vitrages pour lequel l'effet de serre est maximum. Résumons brièvement leurs calculs, d'ailleurs classiques.

Le bilan thermique de chaque « étage » du capteur, plaque réceptrice, plus vitrages, nous donne successivement :

Plaque réceptrice :

$$\varepsilon_o \sigma T_e^4 = \varepsilon I_o (1 - r)^n + \varepsilon_o \sigma T_1^4$$

- ε = émissivité de la surface pour le rayonnement solaire,
- ε_o = émissivité des surfaces en regard pour le rayonnement thermique,
- I_o = constante solaire,
- r = coefficient de réflexion du vitrage en incidence normale,
- n = nombre de vitres,
- T_e = température d'équilibre du collecteur,
- T_1 = température d'équilibre de la vitre 1 proche du collecteur.

Repérons également par T_n la température de la dernière vitre, la plus extérieure. A l'équilibre, on a :

$$2 T_n^4 = (T_{n-1})^4.$$

On montre facilement que : $T_1^4 = n T_n^4$.

Or, l'équilibre de la première vitre donne :

$$2 T_1^4 = T_e^4 + T_2^4$$

de sorte que l'on peut tirer de ces équations les deux égalités suivantes :

$$\boxed{T_e^4 = (n + 1) T_n^4} \quad (1)$$

et :

$$\boxed{T_e^4 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0 \sigma} (n + 1) (1 - r)^{2n} \dot{I}_0} \quad (2)$$

La première relation, nous disent les auteurs, explicite l'effet de serre : pour T_n donné, T_e augmente avec n , et la deuxième relation montre que le gain dépend de l'extrémum de la fonction :

$$\varphi(n) = (n + 1)(1 - r)^{2n}.$$

Ils affirment alors que l'extrémum est atteint pour $n = 11$. Mais ayant négligé l'absorption, ceci donne $n = 7$ et enfin la multiplication du nombre de vitrages, éloignant la plaque réceptrice de l'aire de captage, ce nombre maximal ne peut dépasser cinq.

Cette question nous a intéressé et nous avons voulu étudier en détail ce problème afin de déterminer pour quelle valeur de n , l'effet de serre est maximum, en tenant compte des flux incidents (flux directs et infrarouges) des pertes du capteur, pertes par rayonnement, conduction ou convection et ceci pour différentes valeurs de l'énergie incidente.

I. ETUDE SIMPLIFIEE DE L'EFFET DE SERRE.

Afin de bien situer le problème, nous reprenons l'équation 2 précédemment écrite, en tenant compte cette fois de l'absorption par les vitrages. Soit a le coefficient d'absorption d'une vitre, la température d'équilibre du collecteur est donnée par :

$$\boxed{T_e^4 = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 \sigma} (n + 1) (1 - r)^{2n} (1 - a)^n \dot{I}_0} \quad (3)$$

T_e est maximum lorsque :

$$n + 1 = \frac{-1}{2 \text{Ln}(1 - r) + \text{Ln}(1 - a)}.$$

Application numérique :

Les valeurs courantes pour les coefficients a et r sont en incidence normale :

$$a = 0,05, \quad r = 0,04.$$

On trouve : $n + 1 = 7,52 \approx 8$

d'où : $\underline{n = 7.}$

Si nous prenons $n = 7$, $\epsilon_o = \epsilon_c = 0,96$, avec $\dot{I}_o = 800 \text{ W/m}^2$, la valeur de T_e est :

$$T_e = 459 \text{ K} = 186^\circ \text{C}.$$

Cette température semble élevée et surtout le nombre de vitres n est grand, mais notre calcul comporte des approximations qu'il nous faut étudier.

Critique des résultats.

1) Transmission des flux - Première approximation.

Nous avons négligé les réflexions multiples, tant entre les vitrages qu'entre la vitre n et le collecteur. Nous avons également négligé les réflexions multiples à l'intérieur même des vitrages, de sorte que les coefficients a et r sont certainement faux, de même que les flux transmis.

2) Deuxième approximation.

Nous écrivons dans nos équations d'équilibre que le flux rayonné par unité de surface d'une vitre est : $\Phi_r = \epsilon_o \sigma T^4$ et que la totalité de ce flux est absorbé par les deux vitres qui l'entourent. Ceci est contradictoire. En effet, si l'émissivité à une température donnée est inférieure à un pour un corps, c'est que son coefficient d'absorption est aussi inférieur à un à la même température.

3) Troisième simplification.

Le flux solaire est composé de radiations de courte longueur d'onde, en regard des flux émis par les vitres ou le capteur. Les taux d'absorption ne sont pas les mêmes dans les deux cas. D'autre part, les flux émis par les vitrages sont des flux diffus, alors que le flux incident solaire est directif, là aussi les coefficients d'absorption ne sont pas les mêmes pour les deux types de flux. Nous pouvons d'ailleurs noter que ce problème est un des plus délicats à résoudre et qu'il est certainement pour une bonne part dans les différences que l'on relève ici ou là.

4) Quatrième approximation.

Hors la vitre extérieure qui émet à la fois vers l'intérieur et vers l'extérieur et perd donc la moitié du flux qu'elle capte, nous avons négligé les pertes. Pertes par rayonnement, par conduction ou par convection, interne ou externe.

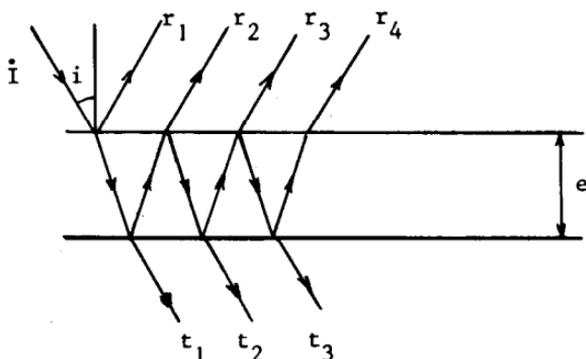
Nous allons tenter de répondre à toutes ces questions en nous demandant chaque fois ce qu'il est légitime de négliger.

II. FLUX TRANSMIS, REFLECHI ET ABSORBE PAR UNE VITRE.

Nous nous posons le problème de la transmission par une lame à faces parallèles. Les coefficients seront notés :

a : coefficient d'absorption pour le rayonnement incident, dans un trajet interne à la lame de verre,

r : coefficient de réflexion pour le rayonnement incident à l'interface air-verre (ou verre-air).



1) Taux de réflexion $R(r)$.

Par définition, c'est le rapport de l'énergie réfléchi à l'énergie incidente. Si $\dot{I} = 1$, ce taux de réflexion est la somme des flux réfléchis.

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots$$

d'où :

$$R(r) = \left(1 + \frac{(1-r)^2(1-a)^2}{1-r^2(1-a)^2} \right) r \quad (4)$$

2) Taux d'absorption $A(r)$.

L'absorption du vitrage, rapport entre le flux absorbé et le flux incident a lieu lors des trajets internes :

$$A(r) = \frac{1-r}{1-r(1-a)} a \quad (5)$$

3) Taux de transmission $T(r)$.

Pour un flux incident unité, il est donné par la somme des flux émergents : t_1, t_2, t_3, \dots

$$T(r) = \frac{(1-r)^2(1-a)}{1-r^2(1-a)^2} \quad (6)$$

On vérifie bien sûr que : $A + R + T = 1$.

Ces expressions remplaceront dans le calcul complet, les coefficients de réflexion, de transmission ou d'absorption des vitrages utilisés précédemment.

III. PERTES SUBIES PAR LE CAPTEUR.

1) Pertes par rayonnement.

La fraction réfléchiée de tout rayonnement incident arrivant sur la vitre extérieure est perdue. De même, la fraction transmise par cette même vitre d'un flux sortant est aussi perdue. L'application à tout flux arrivant sur le vitrage des taux A, R et T prend en compte automatiquement ces pertes. De la même façon, les pertes par rayonnement de la vitre extérieure sont prises en compte dans l'équation d'équilibre thermique.

Le capteur rayonne également par sa face arrière. Pour éviter cela au maximum, on place des écrans infrarouges constitués par des feuilles métalliques polies (aluminium en général). A titre indicatif, rappelons que l'aluminium a dans le proche infrarouge (3—10 μ m), un pouvoir réflecteur supérieur à 95 %.

On peut noter que pour diminuer les pertes dues au rayonnement, on doit utiliser des verres dont le coefficient de réflexion est le plus petit possible, donc à faible indice de réfraction et aussi dont le coefficient de transmission soit le plus grand possible. Les verres les plus efficaces de ce point de vue sont les verres blancs à haute teneur en silice.

2) Pertes par convection.

Là, comme pour le rayonnement, on peut protéger efficacement l'arrière du capteur et ses côtés, par les procédés habituels qui limitent la convection : laine de verre, polystyrènes et autres matériaux semblables en épaisseur convenable.

Mais on ne peut éviter les pertes par convection sur la vitre extérieure, et aussi les flux convectifs internes. On essaie d'exprimer ces flux sous la forme simple suivante :

$$\Phi_c = \beta S \Delta T$$

ΔT : différence de température entre les deux milieux,

S : aire de la surface d'échange,

β : coefficient d'échange convectif.

Ce dernier coefficient est extrêmement complexe, différent selon qu'il s'agit de convection naturelle ou forcée, à écoulement laminaire ou tourbillonnaire ; il est de plus en général fonction des températures de surface, ou plutôt de l'écart en température ΔT , fonction aussi de l'orientation des surfaces et de leur

forme, fonction enfin pour la convection forcée, de la vitesse d'écoulement des filets d'air.

Nous avons retenu pour la convection naturelle une loi du type :

$$P_c = \varepsilon S (\Delta T)^{5/4} = \varepsilon S \Theta^{5/4}.$$

Cette loi convient bien également entre les surfaces internes, à condition que leur écartement soit suffisant (supérieur à 10 mm), le coefficient ε étant toutefois différent s'il s'agit de convection avec le milieu extérieur, ou de convection entre surfaces planes voisines.

Pour l'extérieur, la convection est en général forcée, le moindre vent accentuant les pertes. La plupart des auteurs proposent des formules monômes pour le coefficient de convection, fonction de la vitesse V d'écoulement des filets d'air :

$$\varepsilon = AV^n \quad \text{et} \quad P_c = \varepsilon S \Theta$$

où A et n sont des nombres empiriques avec n compris entre 1/2 et 1.

Il s'agit de bien remarquer que la convection interne, entre les étages du capteur participe à l'équilibre général en température, au même titre que le rayonnement et en même temps que lui, alors que seule la convection extérieure participe aux pertes globales que nous voulons évaluer. A ce titre, seul le dernier vitrage est concerné car nous supposons que l'arrière du capteur et les surfaces latérales sont bien protégés. Donc $\Delta T = \Theta = T_1 - T_a$, où T_1 est la température de cette vitre et T_a la température extérieure ambiante. Enfin, nous avons pris comme vitesse moyenne des filets d'air : $V = 3$ m/s, ce qui évidemment est insuffisant pour certains sites particulièrement ventés.

3) Pertes par conduction.

Ce sont les plus faciles à calculer et en même temps les plus faibles. En effet, l'emploi d'un matériau isolant limite par sa nature même la conduction sur toutes les surfaces protégées. Pour la première vitre, elles se limitent donc à la déperdition de chaleur à travers ce vitrage et l'on sait que cette perte est faible devant celles dues à la convection et au rayonnement. Signalons enfin dans ce paragraphe, que les pertes par conduction se produisent aussi dans les canalisations d'amenée ou d'évacuation du fluide caloporteur qui, de ce fait, devront également être isolées.

IV. METHODES DE CALCUL DES FLUX ABSORBES.

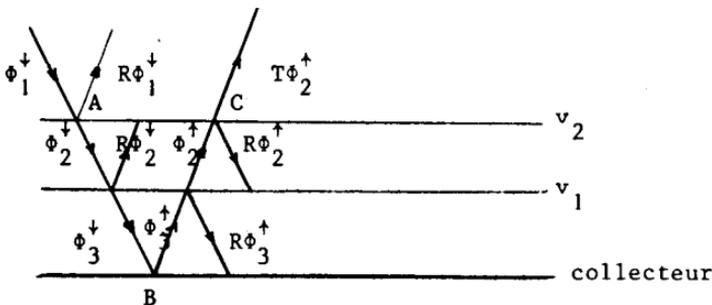
Il semble *a priori* qu'il n'y ait qu'à reprendre la méthode utilisée pour le calcul simplifié au paragraphe I, en tenant compte

des termes négligés. Mais on se heurte très vite à la très grande complexité des flux. En effet, sur les vitrages, chaque flux incident se partage en trois fractions : la fraction réfléchie Φ_r , la fraction absorbée Φ_a et la fraction transmise Φ_t . Ce dernier flux par exemple subit alors entre les deux vitres une suite de réflexions multiples où chaque fois il donne naissance aux 3 mêmes types de flux.

On pourrait, à la rigueur, en pratiquant comme pour les réflexions multiples dans le vitrage, résoudre ce problème. Mais ce faisant, nous n'avons considéré que les flux extérieurs. Or, chaque étage du capteur rayonne à son tour et donne naissance à un flux infrarouge diffus sur chacune de ces faces, ces flux subissant bien entendu des réflexions multiples des absorptions, etc. Ce problème atteint très vite, dès que $n > 2$, une très grande complexité et il nous faut trouver une autre méthode de calcul.

1) Principe de la méthode.

La méthode que nous avons utilisée est une méthode par itérations successives, assez simple pour être programmée sur les petites calculatrices de poche. Elle consiste à faire la distinction entre « flux descendants », ceux qui entrent dans le capteur et « flux montants », ceux qui sortent des capteurs.



On écrit, par exemple, pour le flux descendant : Φ_2^\downarrow :

$$\Phi_2^\downarrow = T\Phi_1^\downarrow + R\Phi_2^\uparrow + \frac{\Phi_{v2}}{2} \quad \text{avec} \quad \Phi_{v2} = \text{flux capté par la vitre 2.}$$

Bien entendu, les taux de transmission T ou de réflexion R sont ajustés au type de flux : diffus ou direct solaire ou infrarouge. Chaque itération comporte le trajet ABC, « aller et retour ». On montre facilement que cette méthode tient compte des réflexions multiples de tous les types de flux entre chaque étage du capteur. Chaque flux traversant un vitrage voit sa fraction A absorbée et on peut aussi connaître l'énergie captée par tous les vitrages et par le collecteur.

Nous devons maintenant nous pencher sur le problème des valeurs numériques des taux A, R et T pour les différents types de flux arrivant sur le capteur afin de calculer les températures atteintes à l'équilibre.

2) Action de l'incidence sur les flux captés directs.

Le coefficient de réflexion sur une surface vitreuse est fonction de l'angle d'incidence i . En lumière naturelle, nous avons :

$$r = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(i-i')}{\sin^2(i+i')} + \frac{\text{tg}^2(i-i')}{\text{tg}^2(i+i')} \right] \quad (7)$$

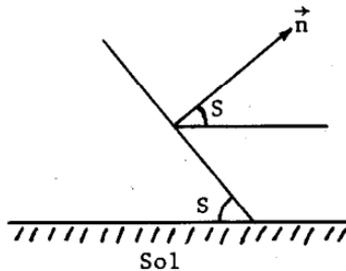
avec $\sin i = n \sin i'$. En incidence normale pour $i = 0$, cette formule se réduit à :

$$r = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

Les formules 4, 5 et 6 donnant les taux relatifs à une vitre sont fonction de r , donc de i . On pourra donc pour chaque incidence, calculer $A(i)$, $R(i)$ et $T(i)$ qu'on appliquera au rayonnement solaire direct. On peut d'ores et déjà observer que pour connaître l'énergie captée en une journée par exemple, nous serons amenés à faire des intégrations numériques.

3) Flux diffus interceptés par le capteur.

Soit S l'inclinaison du capteur sur l'horizontale, cette position du capteur fait que celui-ci reçoit le flux diffus issu de la voûte céleste et celui venu du sol. Il faut bien voir que ces flux



sont de deux types, aussi bien celui issu de la voûte céleste que celui issu du sol. Le premier est un flux diffus formé de radiations de courte longueur d'onde, du même type que celles du rayonnement solaire direct. Une partie de ce flux provient de la voûte céleste et l'autre provient du sol qui n'absorbe pas la totalité du flux reçu, mais en diffuse une partie plus ou moins grande

selon la nature du sol et sa couverture (neige - forêt - glace, mer...). Le second est formé de radiations de grande longueur d'onde, c'est un flux infrarouge. L'atmosphère en effet absorbe une partie du flux solaire incident, mais réémet elle-même, dans l'infrarouge un flux diffus. Pour le sol, tous ces composants rayonnent également dans l'infrarouge proche un flux diffus à la température où ils se trouvent.

La valeur des taux absorbés ou réfléchis par le capteur dépend de l'inclinaison S du capteur. On montre en effet pour un calcul classique que si Φ_d est le flux de la voûte céleste, le capteur en reçoit la fraction :

$$\Phi_v = \Phi'_d \frac{1 + \cos S}{2} \quad (8)$$

De même, si le flux du sol est noté Φ'_d , le capteur en reçoit la fraction :

$$\Phi_s = \Phi'_d \frac{1 - \cos S}{2} \quad (9)$$

4) Taux moyens pour les flux diffus.

Connaissant les flux diffus qui arrivent sur la face d'entrée du capteur, on peut étudier quelles fractions de ces flux sont absorbées, transmises ou réfléchies par les vitrages. Il suffit pour cela d'observer que ces taux sont fonction de l'angle d'incidence i , et d'intégrer sur tout l'espace concerné situé devant le capteur.

Pour la voûte céleste par exemple, la fraction de ce flux qui sera absorbée s'écrira :

$$\begin{aligned} d\Phi_{va} &= A(i) d\Phi_v \\ &= \frac{1}{\pi} \Phi_d A(i) \cos i \sin \Theta d\Theta d\Phi \end{aligned}$$

avec : $\cos i = \sin \Theta \sin(\Phi + S)$.

Donc :

$$\Phi_{va} = \frac{\Phi_d}{\pi} \int_0^\pi \sin^2 \Theta d\Theta \int_0^{\pi-S} A(i) \sin(\Phi + S) d\Phi.$$

Le taux moyen absorbé sera donné par le rapport de Φ_{va} au flux total incident Φ_v , soit, d'après (8) :

$$\bar{A} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 + \cos S} \int_0^\pi \sin^2 \Theta d\Theta \int_0^{\pi-S} A(i) \sin(\Phi + S) d\Phi \quad (10)$$

et deux relations du même type pour \bar{T} et \bar{R} .

Pour le flux issu du sol, un raisonnement analogue permet d'écrire le taux moyen absorbé sous la forme :

$$\bar{A} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 - \cos S} \int_0^\pi d\theta \int_{\pi/2}^{\theta_0} A(i) |\sin S \sin \theta \sin \Phi + \cos S \cos \theta| \sin \theta d\theta$$

avec : $\cos i = \sin S \sin \theta \sin \Phi + \cos S \cos \theta$

et θ_0 donné par : $\text{tg } \theta_0 = \Pi - \text{Arc tg } \frac{1}{\text{tg } S \sin \Phi}$

et, bien sûr, 2 autres relations du même type pour \bar{R} et \bar{T} .

Des considérations générales de symétrie permettent de montrer que plusieurs de ces intégrales sont égales et ainsi de réduire les calculs. Le tableau ci-après nous donne les résultats pour quatre inclinaisons du capteur :

$S = 90^\circ$ pour une surface verticale ; $S = 65^\circ$ et 48° pour un capteur incliné de 65° (ou 48°) sur l'horizontale et $S = 0$ pour une surface horizontale.

	Flux solaire - $a = 0,05$			Flux infrarouge - $a_0 = 0,96$		
	\bar{A}	\bar{R}	\bar{T}	\bar{A}_0	\bar{R}_0	\bar{T}_0
$S = 90^\circ$						
ϕ_v	0,04968	0,15376	0,79656	0,87204	0,09476	0,03320
ϕ_s	0,04968	0,15376	0,79656	0,87204	0,09476	0,03320
$S = 65^\circ$						
ϕ_v	0,04973	0,13776	0,81251	0,88266	0,08340	0,03394
ϕ_s	0,04956	0,19801	0,75843	0,84650	0,12205	0,03145
$S = 48^\circ$						
ϕ_v	0,04975	0,13366	0,81659	0,88547	0,08041	0,03412
ϕ_s	0,04935	0,25488	0,69577	0,88394	0,16750	0,02856
$S = 0$						
ϕ_v	0,04968	0,15376	0,79656	0,87204	0,09476	0,03320

V. TEMPERATURES ATTEINTES PAR LE CAPTEUR.

Afin de préciser l'optimum de l'effet de serre, nous sommes maintenant en mesure de calculer les températures atteintes par le capteur en fonction du nombre de vitres n , en tenant compte des pertes envisagées et en introduisant les taux A, R et T précédemment calculés.

1) Modèle utilisé.

— *Le capteur fixe est incliné d'un angle $S = 48^\circ$ sur l'horizontale, ce qui le 20 mars par exemple, donne une incidence quasi normale à midi TSV.*

— *Il reçoit trois types de flux :*

Le flux solaire direct d'intensité \dot{I}_o variable.

Le flux diffus de la voûte céleste Φ_v et du sol Φ_s , flux également composé de radiations de courte longueur d'onde comme le flux direct. Nous avons pris $\Phi_v = 90 \text{ W}$ et $\Phi_s = 10 \text{ W}$, ordres de grandeurs corrects pour le jour choisi.

Enfin, un flux diffus infrarouge d'intensité : $\Phi_o = \epsilon_o \sigma T_o^4$ correspondant au rayonnement d'un corps à la température T_o .

— *Les coefficients d'absorption retenus sont :* pour les vitrages utilisés :

— $a = 0,05$ pour le flux direct, le coefficient de réflexion étant calculé pour $n = 1,52$ indice courant pour les vitrages usuels,

— et $a_o = 0,96$ pour le flux infrarouge.

— *Les pertes envisagées sont de deux types :*

Ou bien elles sont prises en compte automatiquement par le mode calcul, par exemple les pertes par rayonnement sur la vitre extérieure, ou bien, il faut les expliciter, par exemple les pertes par l'arrière du capteur. Il est clair en effet que l'écriture de l'équilibre thermique sur la vitre extérieure suppose que celle-ci rayonne la moitié du flux capté vers l'extérieur, alors qu'il faut ajouter un terme particulier pour les pertes arrières.

Les pertes par convection sur l'avant du capteur ont été notées :

$$\Phi_c = \epsilon S (T_1 - T_a).$$

Avec $\epsilon = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ correspondant au coefficient de flux convectif pour un vent de 3 m/S .

Entre chaque étage, la température retenue est la moyenne des températures des surfaces qui limitent le volume envisagé.

Enfin, nous avons pris un capteur de surface $S = 1 \text{ m}^2$, les coefficients de déperdition arrière et latéraux étant évidemment fonction de la surface d'échange.

2) Résultats.

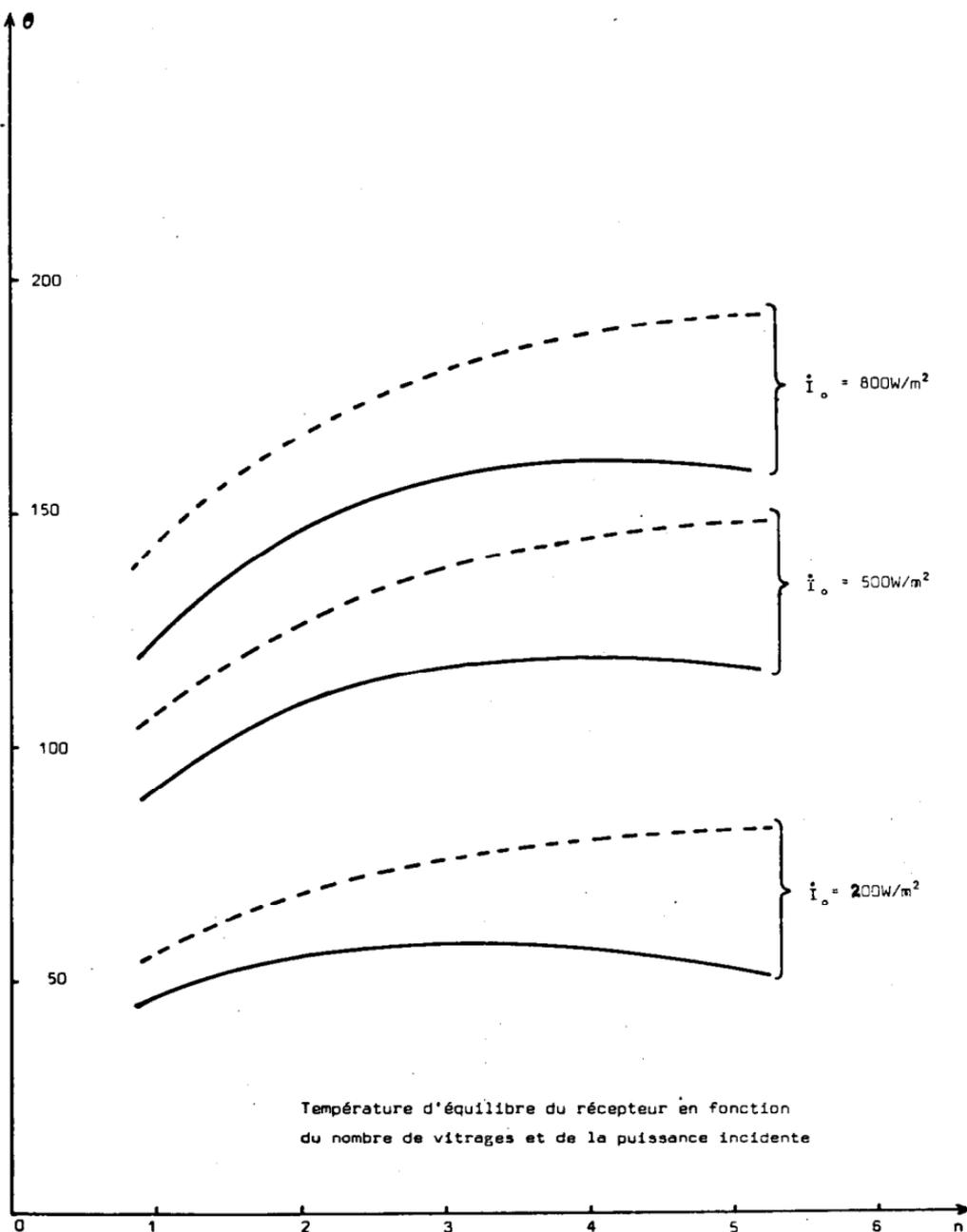
Les courbes tracées nous donnent la réponse du récepteur pour différents flux incidents directs \dot{I}_o , en fonction du nombre n de vitrages. Les courbes en pointillés donnent les températures atteintes par le récepteur, calculées d'après le modèle simplifié du premier paragraphe, auquel nous avons ajouté les différents flux fixes pris en compte dans le calcul complet. Les courbes en traits pleins donnent les températures calculées à partir du modèle que nous venons de décrire.

L'effet des pertes apparaît double. La température atteinte par le récepteur est évidemment plus faible lorsqu'on en tient compte. En effet, toutes les courbes en pointillés sont au-dessus des courbes en traits pleins. D'autre part, le modèle simplifié donnait l'effet de serre maximum pour $n = 7$ vitrages. Nous voyons ici que ce maximum est atteint pour $n = 4$ vitrages pour les fortes intensités du flux incident et $n = 3$ vitrages pour les faibles intensités.

Pour déterminer cette étude, nous voudrions faire la remarque suivante : notre modèle suppose le capteur fixe en incidence quasi normale. Ceci ne peut se produire que pendant de courts laps de temps (2 à 3 h environ). Sur une journée, l'incidence varie de -90° à $+90^\circ$ pour le rayonnement direct. Il va de soi que le récepteur ne reçoit pas la totalité du flux émis dans sa direction et pourtant transmis par les vitres. En effet, les bords du capteur font écran pour les grandes incidences matin et soir. Il est clair que cet effet augmente avec le nombre de vitres. Ce phénomène joue sur le flux direct et nous n'en avons pas tenu compte dans nos calculs.

Il nous faut donc décaler le maximum de l'effet de serre vers les petites valeurs de n . Il faut bien voir que cet effet reste petit car il joue précisément ainsi que nous l'avons dit, le matin et le soir, donc lorsque l'incidence est grande et où le flux capté est faible puisque la réflexion sur les vitrages devient alors très importante.

En résumé, nous dirons que l'effet de serre est maximum pour $n = 3$ vitrages. C'est là notre conclusion au problème physique. Nous n'avons pas tenu compte d'autres contraintes, en particulier économiques que le constructeur ne peut négliger. Il est, par exemple, facile de montrer que le gain apporté par le



3^e vitrage ne compense pas le coût de son installation et c'est pour cette raison que les capteurs ne comportent jamais plus de 2 vitres. La question reste posée au choix entre capteurs à un ou à deux vitrages.

BIBLIOGRAPHIE

- *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 586, juillet-août-septembre 1976.
 - *Cahiers de l'A.F.E.D.E.S.* (Association pour l'Etude et le Développement de l'Energie solaire), 28, rue de la Source, Paris.
 - P. BERTONDO. — *Etude théorique complémentaire des capteurs solaires plans à eau*. Note E.d.F. HC 312 W833, Paris, 1975.
 - R.-W. BLISS. — *The Derivations of several « Plate Efficiency Factors » useful in the design of flat - plate solar-heat collectors in « Solar Energy »*, 3, 55, n° 4, 1959.
-