

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 105 (1979)  
**Heft:** 26: SIA, no 6, 1979

**Artikel:** Propriétés optiques de parois-tubes pour chaudières solaires  
**Autor:** Corday, G. / Beretta-Piccoli, F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73874>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Propriétés optiques de parois-tubes pour chaudières solaires

par G. Corday et F. Beretta-Piccoli, Lausanne<sup>1</sup>

La distribution spatiale de la réflexion du rayonnement solaire sur des surfaces du type utilisé dans des chaudières solaires est mesurée. Sur cette base un modèle mathématique semi-empirique est mis au point. Le modèle choisi, tout en offrant une précision suffisante, ne nécessite qu'un nombre réduit de mesures et est adapté au calcul par ordinateur.

## 1. Enoncé du problème

Dans une centrale solaire à tour, les miroirs du champ d'héliostats réfléchissent le rayonnement solaire vers l'ouverture de la chaudière qui est très souvent du type à cavité (voir fig. 1). Ce rayonnement concentré possède une intensité très élevée, de l'ordre de 1000 kW/m<sup>2</sup>, incident sur les parois intérieures de la cavité ; l'eau ou un autre fluide circulant dans ces parois est chauffée, vaporisée et surchauffée pour être ensuite dirigée vers une turbine à vapeur. Le fluide caloporteur joue donc aussi le rôle de refroidisseur pour les matériaux des parois ; il est dès lors nécessaire que le coefficient de transfert de chaleur paroi-fluide soit suffisamment élevé pour éviter une surtempérature excessive de la paroi. Si les parois utilisées pour le préchauffage et la vaporisation ne posent à cet égard pas de problème, il en va tout autrement pour la partie surchauffe où le coefficient de transfert est plus modeste. Cette partie ne peut pas être directement exposée au rayonnement concentré, mais doit être soumise au rayonnement indirect réfléchi par d'autres surfaces mieux refroidies (voir fig. 2).

Il est par conséquent important de connaître les propriétés optiques de réflexion des surfaces techniques réelles,

par exemple du type « shell-and-tube », dans un état de vieillissement et d'oxydation typique.

Il existe bien de la littérature traitant de ce sujet [1 et 2]<sup>2</sup>, mais elle concerne des surfaces idéalisées demandant des connaissances microscopiques de la surface (forme, dimensions et répartition des aspérités) d'où une utilisation malaisée pour une application technique.

Ce manque de modèle de calcul pratique a justifié l'étude entreprise dans le cadre d'un projet de diplôme de l'EPFL, à savoir :

- une investigation expérimentale pour déterminer les coefficients de réflexion des surfaces techniques réelles,
- suivie d'un traitement mathématique semi-empirique destiné à décrire les propriétés de réflexion par un modèle nécessitant peu d'informations expérimentales.

Avec ce modèle mathématique il sera ensuite possible de calculer, sur ordinateur, le champ de rayonnement à l'intérieur de la cavité.

<sup>1</sup> Projet de diplôme de l'EPFL effectué sous la direction du professeur P. Suter, Dr sc., Institut de thermique appliquée de l'EPFL.

<sup>2</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

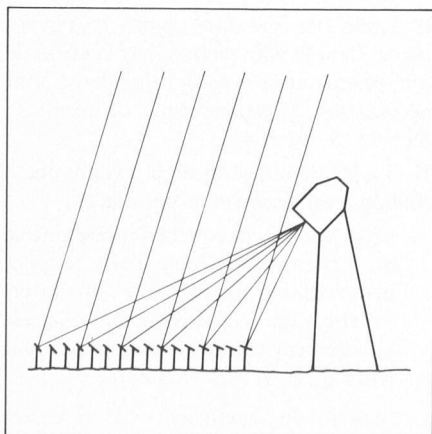


Fig. 1. — Installation tour-héliostats.

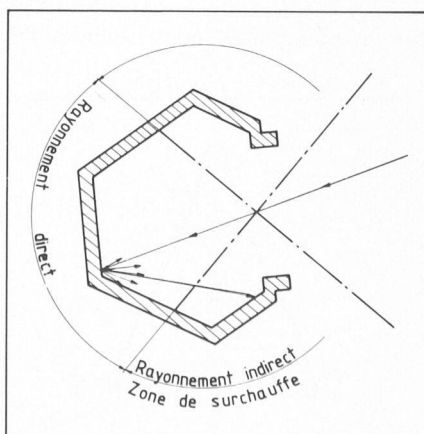


Fig. 2. — Chaudière type « cavité ».

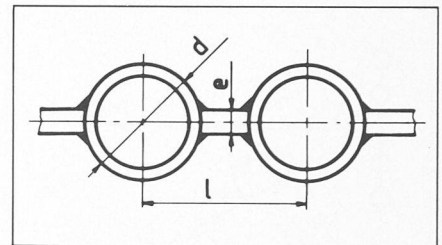


Fig. 3. — Paroi-tube.

## 2. Investigation expérimentale

Les essais ont été effectués dans une chambre noire avec :

- un projecteur équipé d'une lampe à incandescence (env. 3000° K) fournissant un spot de Ø 10 cm sur les surfaces testées,
- pour la mesure, un radiomètre dont la bande passante est comprise entre 430 et 980 nm (Tektronix J6512).

En raison de la bande passante de l'appareil de mesure les résultats n'ont pas été influencés par le rayonnement infrarouge des échantillons et du voisinage.

Parois-tests : (dimensions en mm)

Plaque N°	d	l	e
1		plane	
2	30	42	6
3	17	23	4
4	16	22	3.5
5	10	14.5	2.5

Toutes ces plaques avaient été vieilles et présentaient un état de rouille plus ou moins prononcé :

- la plaque 1 présente une rouille profonde mate (rouille rouge rugueuse) ;
- les plaques 2, 4 et 5 sont plutôt recouvertes d'oxydes bleus plus ou moins brillants ;
- la plaque 3 est d'aspect rouillé brillant (rouille rouge fine).

### Essais et mesures

Chacune des plaques a été mesurée pour un angle incident variant :

- dans le plan formé par la normale à la plaque et la direction donnée par les axes des tubes ( $\gamma = 90^\circ$ ) ;
- dans le plan formé par la normale à la plaque et la direction perpendiculaire aux tubes ( $\gamma = 0^\circ$ ) ;
- dans un plan situé entre ces deux extrêmes ( $\gamma$  variant entre 0 et  $90^\circ$ ).

La référence pour l'angle incident  $\beta$  est la normale à la plaque.

L'intensité réfléchie a été mesurée sur tout l'hémisphère de réflexion (variables  $\phi$  et  $\psi$ ) pour chacun des angles incidents et il a été déterminé, pour tous les essais, la direction de réflexion principale.

Après calcul, par intégration numérique, de la puissance réfléchie il a été procédé, pour chaque angle d'incidence et chaque

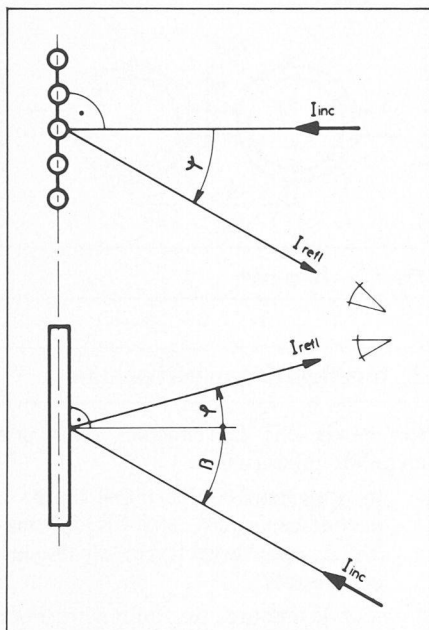


Fig. 4. — Définition des angles.

plaque, à la détermination du coefficient de réflexion moyen par :

$$\bar{r} = \frac{\text{puissance réfléchie}}{\text{puissance incidente}}$$

Une série d'essais à des températures variables entre 20 et 700° C a permis de vérifier si la température du matériau avait une influence notable sur la valeur du coefficient de réflexion et sur la répartition spatiale du rayonnement réfléchi.

#### Résultats :

Afin d'avoir une vue d'ensemble des valeurs mesurées, ces dernières ont été représentées en grandeurs relatives (référence : intensité maximale pour chacun des cas) sur des diagrammes polaires et cartésiens (fig. 5a et 5b).

Pour interpréter ces résultats il est utile de se rappeler les deux cas extrêmes :

- réflexion spéculaire où toute la lumière réfléchie se trouve concentrée autour d'une seule direction (ex. : miroir) ;
- réflexion diffuse selon la loi de Lambert.

En résumé nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

La loi de réflexion réelle n'est ni spéculaire ni diffuse ; plus le vieillissement est

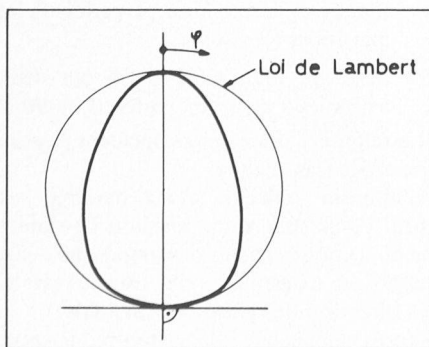


Fig. 5. — a) Représentation polaire.

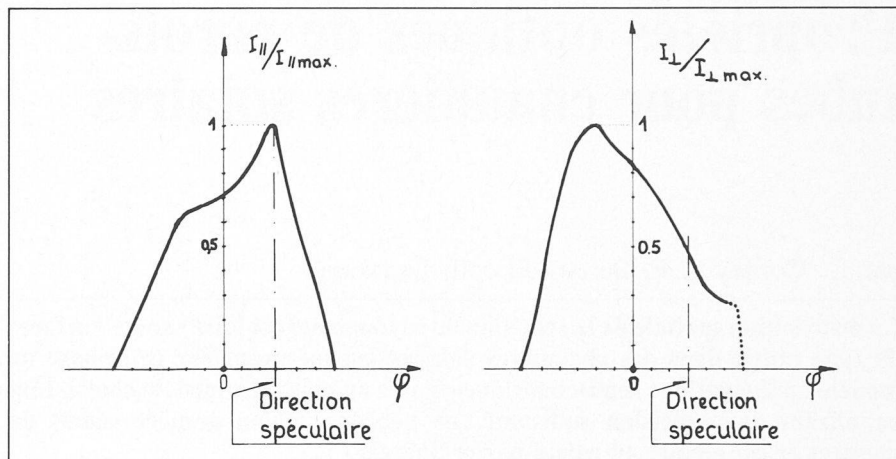


Fig. 6. — Intensité relative réfléchie dans les plans principaux.

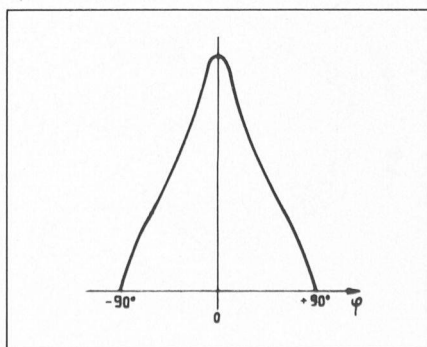
avancé, plus le caractère diffus se renforce sans être atteint complètement ; pour une plaque plane, le maximum d'intensité réfléchie se trouve dans la direction spéculaire (fig. 6a).

Pour les parois-tubes :

- dans le cas où l'angle d'incidence varie dans le plan parallèle à l'axe des tubes, leur comportement est très semblable à celui de la paroi plane ; il ne diffère notablement que pour des plans de réflexion s'approchant de la normale aux tubes et l'on peut admettre qu'il est identique dans le plan parallèle aux tubes (fig. 6a).
- dans le cas où l'angle d'incidence varie dans le plan perpendiculaire aux tubes ( $\gamma = 0^\circ$ ), leur comportement diffère de celui de la paroi plane. En particulier la direction principale n'est plus spéculaire, toutefois ce cas peut être traité en décomposant la paroi-tube en éléments de parois planes (fig. 6b et 7).
- l'influence des soudures, bien que perceptible et ayant des effets locaux, peut être négligée.
- le coefficient de réflexion  $\bar{r}$  se situe entre 0,05 et 0,12 ;
- dans le domaine de 0° à 700° C, la température de la surface ne joue aucun rôle perceptible.

### 3. Modèle mathématique

Puisque la littérature ne nous était d'aucun secours, nous nous sommes fixé



b) Représentation cartésienne.

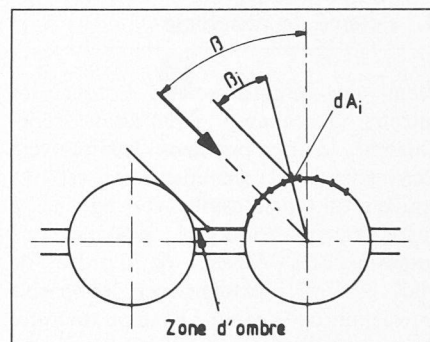


Fig. 7. — Décomposition en éléments de surface.

comme but d'établir un modèle mathématique semi-empirique satisfaisant aux critères suivants :

- essais avec un échantillon sans tubes (paroi plane) présentant le même état de surface et même matériau que la paroi-tubes réelle ;
- essais simples, facilement réalisables et peu nombreux ;
- nombre de paramètres aussi petit que possible, mais néanmoins suffisant pour caractériser avec une bonne approximation les propriétés de réflexion des parois-tubes.

A partir de ces critères nous avons établi un modèle semi-empirique directement utilisable pour le calcul du champ de rayonnement réfléchi dans une chaudière avec une précision suffisante. Il se base sur le concept suivant :

I. Seules les mesures, pour la plaque plane, dans le plan passant par la normale à la plaque et la direction incidente sont nécessaires. Angles incidents de mesures :  $\beta = 0, 15, 30$  et  $45^\circ$ .

II. La loi de réflexion de la plaque plane (indice 0) est déterminée comme suit :

- pour  $\beta = 0^\circ$ , la courbe représentative de l'intensité réfléchie dans le plan principal est approximée par interpolation du deuxième ordre. Elle est entièrement déterminée par les valeurs  $U_0$  et  $\delta_0$  (fig. 8a à 8c).

Le calcul du coefficient de réflexion moyen  $\bar{r}_0$  se fait par intégration numérique des valeurs mesurées.

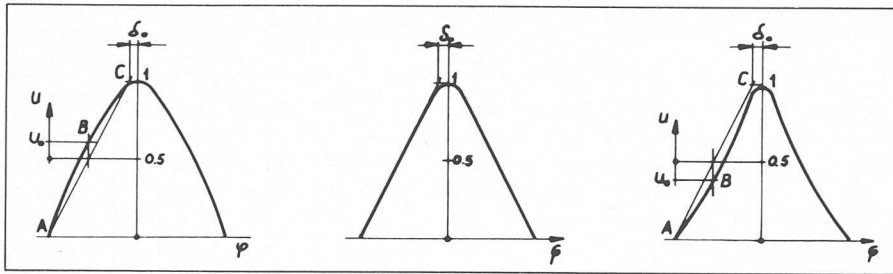


Fig. 8. — Plaque plane : Rayonnement réfléchi pour une incidence perpendiculaire.

Pour un angle incident  $\beta \neq 0^\circ$  quelconque :

- on sait que l'intensité maximale réfléchie se trouve dans la direction spéculaire ;
- et qu'elle a tendance à augmenter avec l'angle d'incidence (fig. 9) ; il en est de même du coefficient de réflexion  $\bar{r}$ . L'évolution de ces deux grandeurs peut être décrite par les relations suivantes :

$$I_{\max}(\beta) = I_{\max}(\beta = 0^\circ) \frac{k_1 + \frac{1}{\cos \beta}}{k_1 + 1}$$

$$\bar{r}(\beta) = \bar{r}_0 \frac{k_1 + \frac{1}{\cos \beta}}{k_1 + 1}$$

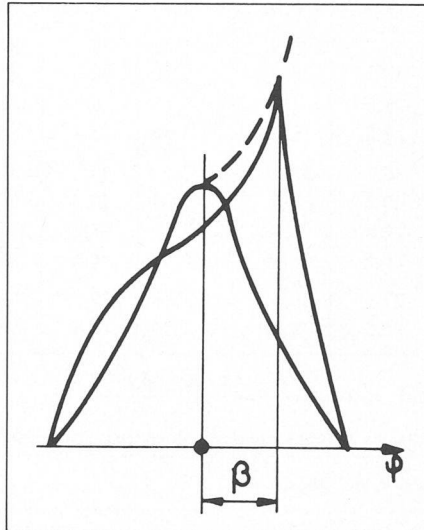
$k_1 = 0, \dots, 2$  selon que les surfaces sont brillantes ou mates ;

- la courbe pour  $\beta = 0^\circ$  est utilisée comme courbe « mère » et par transformation affine sert de base à la représentation de l'intensité réfléchie dans le plan principal pour n'importe quel angle d'incidence. Toutefois cette transformation affine ne traduit pas assez bien la réalité, d'où l'introduction d'une courbe de correction faisant la distinction entre les surfaces brillantes et mates (fig. 10). Les paramètres de calcul de ces courbes de correction sont tirés des essais cités plus haut (chiffre I) ;
- pour les directions de réflexion, qui ne sont pas dans le plan principal (défini par la normale à la plaque et la direction d'incidence), donc pour lesquelles  $\psi$  est non nul, on utilise la même forme de répartition que celle qu'on avait dans le cas de l'incidence normale dans une coupe  $\pi$  (la distribution se représente évidemment par un corps de révolution) sous l'angle  $\Delta\phi'$  en associant  $\Delta\phi$  à  $\Delta\phi'$  par la relation d'affinité, voir fig. 11.

$$\Delta\phi' = \Delta\phi \left(1 \pm \frac{\beta}{90^\circ}\right)$$

### III. Loi de réflexion des parois-tubes : Plan principal perpendiculaire aux tubes (indice<sub>1</sub>) :

- l'intensité réfléchie dans une direction quelconque se détermine par intégration en décomposant la paroi en éléments plans (fig. 7).


Fig. 9. — Evolution des maxima (fonction de  $\beta$ ).

$$I_{\perp}(\phi, \psi) = \int I_i(\beta_i, \phi, \psi) \frac{dA_i}{A}$$

- le coefficient de réflexion a pour expression :

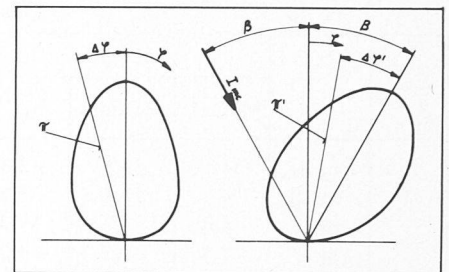
$$\beta = 0^\circ, \text{ on peut admettre } \bar{r}_{\perp} = \bar{r}_0$$

$$\beta \neq 0^\circ \quad \bar{r}_{\perp} = \bar{r}_0 \frac{k_2 + \frac{1}{\cos \beta}}{k_2 + 1}$$

avec  $k_2 = 3$  que les parois soient brillantes ou non.

Plan principal parallèle aux tubes (indice<sub>11</sub>) :

- dans le plan principal, on admet une répartition identique à celle de la paroi plane ;


Fig. 11. — Plans correspondants  $\Pi \equiv \Pi'$  avec  $\Delta\phi' = \Delta\phi \left(1 \pm \frac{\beta}{90^\circ}\right)$ .

- dans les autres directions, il est fait une combinaison entre les intensités réfléchies par la paroi plane et la paroi-tubes dans le plan perpendiculaire aux tubes pour un angle incident nul puis, par transformation affine entre des plans correspondants comme indiqué sur la figure 11, il est possible d'obtenir l'intensité réfléchie dans toute direction ;

- le coefficient de réflexion peut être déterminé par :

$$\text{si } \beta = 0^\circ \quad \bar{r}_{11} = \bar{r}_0$$

$$\text{si } \beta \neq 0^\circ \quad \bar{r}_{11} = \bar{r}_0 \frac{k_3 + \frac{1}{\cos \beta}}{k_3 + 1}$$

avec  $k_3 = k_1 + 2$  environ.

IV. Si le plan principal n'est ni perpendiculaire ( $\gamma = 0^\circ$ ) ni parallèle ( $\gamma = 90^\circ$ ) à l'axe des tuyaux on constate que l'influence des tubes n'est grande que si l'on est proche du cas où le faisceau incident devient perpendiculaire aux tubes ( $\gamma = 0^\circ$ ) et diminue très rapidement lorsqu'on s'éloigne de cette position. On peut alors calculer, par combinaison :

- l'intensité réfléchie dans toute direction par :

$$I(\gamma) = I_{11}(1 - \cos^n \gamma) + I_{\perp} \cos^n \gamma$$

- et le coefficient de réflexion par :

$$\bar{r}(\gamma) = \bar{r}_{11}(1 - \cos^n \gamma) + \bar{r}_{\perp} \cos^n \gamma$$

avec  $n = 6$  environ dans les deux cas.

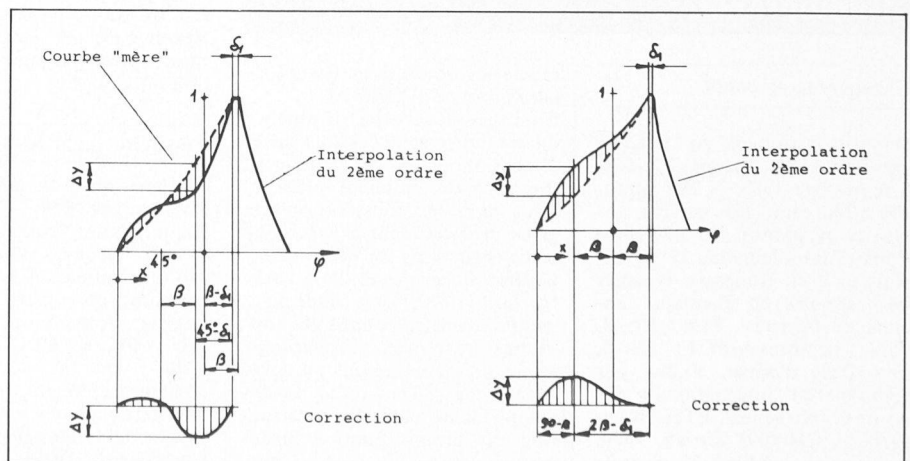


Fig. 10. — a) Surface « brillante ».

b) Surface « mate ».

## Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées

Plaque n°		$\beta = 0^\circ$			$\beta = 15^\circ$			$\beta = 30^\circ$			$\beta = 45^\circ$		
		Mesuré	Calculé	Ecart %	Mesuré	Calculé	Ecart %	Mesuré	Calculé	Ecart %	Mesuré	Calculé	Ecart %
1	$I_{// \text{ max}}$	34	34,8	+2,35	33	32,0	-3,03	31	30,0	-3,33	32	30	-6,25
	$I_{\perp \text{ max}}$	34	31,7	+6,76	30	31,3	+4,33	31,5	30,8	-2,22	33,5	32,2	-3,88
	$\bar{r}_{//}$	8,0	7,7	-3,7	8,1	7,77	-4,07	8,4	8,0	-4,76	8,7	8,5	-2,3
	$\bar{r}_{\perp}$	7,4	7,7	+4,05	7,3	7,77	+6,44	7,7	8,0	+3,9	7,6	8,5	+11,84
2	$I_{// \text{ max}}$	52,5	53,6	+2,1	52	51,2	-1,54	49	49,8	+1,63	48	52,1	+8,54
	$I_{\perp \text{ max}}$	52	47,4	-8,85	52	46,3	-10,96	51,5	45	-12,62	55	47,5	-13,64
	$\bar{r}_{//}$	10,6	10,25	-3,30	10,6	10,34	-2,45	10,7	10,65	-0,47	10,5	11,31	+7,71
	$\bar{r}_{\perp}$	9,9	10,25	+3,54	9,9	10,34	+4,44	10,1	10,65	+5,45	10,1	11,31	+11,98
3	$I_{// \text{ max}}$	38	39,2	+3,16	38	37,5	-1,32	37	37,4	+1,08	39	39,8	+2,05
	$I_{\perp \text{ max}}$	35	35,3	+0,86	35	34,6	-1,14	34	33,5	-1,47	35	35,3	+0,86
	$\bar{r}_{//}$	8,4	8,0	-4,75	8,6	8,07	-6,16	8,7	8,31	-4,48	8,8	8,83	+0,34
	$\bar{r}_{\perp}$	7,6	8,0	+5,26	7,8	8,07	+3,46	8,1	8,31	+2,59	8,4	8,83	+5,12
4	$I_{// \text{ max}}$	32	31,2	-2,5	36	33,3	-7,5	39	36,2	-7,18	45,5	42	-7,69
	$I_{\perp \text{ max}}$	30	28,5	-5,0	29,5	28,9	-2,03	27,5	27,4	-0,36	29	25,5	-12,07
	$\bar{r}_{//}$	6,5	6,4	-1,54	7,9	6,48	-17,97	7,2	6,73	-6,53	7,4	7,28	-1,62
	$\bar{r}_{\perp}$	6,3	6,4	+1,59	6,5	6,46	-0,62	6,6	6,65	-0,76	6,8	7,06	+3,82
5	$I_{\text{max}}$	28	27,6	-1,43	27	26,6	-1,48	27	26,9	-0,37	31	29,8	+3,87
	$\bar{r}$	6,4	6,4	0	6,6	6,51	-1,36	6,9	6,9	0	7,7	7,73	+0,39

 $I$ : [mW/m<sup>2</sup>] $r$ : [%]Pour le calcul:  $r_0 = \frac{\bar{r}_{//}(\beta=0) + \bar{r}_{\perp}(\beta=0)}{2}$ 

Pour les écarts les valeurs mesurées sont prises comme référence.

Fig. 12. — Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculées.

Le modèle ainsi construit a servi à calculer les intensités réfléchies par nos plaques-tests ainsi que les erreurs relatives. On a constaté des erreurs se situant,

en général, aux environs de  $\pm 8\%$ , et dépassant rarement  $10\%$ . Quant à la valeur du coefficient de réflexion moyen, son niveau de précision est aussi du même

ordre de grandeur (fig. 12: valeurs comparatives).

## Bibliographie

- [1] T. F. SMITH et R. G. HERING: *Comparison of bidirectional reflectance measurements and model for rough metallic surfaces*. Fifth Symposium on Thermophysical Properties (ASME), 1970 (Df 2245).
- [2] E. M. SPARROW et R. D. CESS: *Radiation heat transfer*. Brooks/Cole Publishing Company, 1970 (Df 167).
- [3] R. C. BIRKEBAK et E. C. ECKERT: *Effects of roughness of metal surfaces on angular distribution of monochromatic radiation*. Journal Heat Transfert, C87, 85-94, 1965.

- [4] K. E. TORRANCE et E. M. SPARROW: *Theory for off-specular reflection from roughened surfaces*. Journal of the Optical Society of America, vol. 87, No. 9, 9-1967.
- [5] H. C. HOTTEL et A. F. SARAFIM: *Radiative Transfer*. McGraw-Hill Book Company, 1967 (Df 131).
- [6] P. BECKMANN: *Die Ausbreitung der ultrakurzen Wellen*. Akademische Verlagsgesellschaft Geest/Partig (M 26515).
- [7] SIEGEL et HOWELL: *Thermal radiation*. McGraw-Hill Book company (O 190).

Ce travail a été réalisé en collaboration avec Sulzer Frères SA, Winterthur. Nous remercions cette entreprise de son aide.

## Adresse des auteurs:

G. Cordey et F. Beretta-Piccoli  
Institut de thermique appliquée  
Halle de mécanique, Ecublens  
1015 Lausanne  
G. Corday  
professeur à l'ETSEV  
1400 Yverdon

## Bibliographie

## Charpentes et ponts

Rapport introductif du 11<sup>e</sup> Congrès de l'AIPC, Vienne, 31 août-5 septembre 1980 — 296 pages, 170 x 240 mm, 129 dessins, tableaux et photos, 25 contributions (7 en allemand, 16 en anglais et 2 en français), résumés des rapports en allemand, anglais et français. Prix: Fr. s. 75.— (membres AIPC Fr. 50.—), plus frais d'envoi. Publié par l'Association internationale des ponts et charpentes, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zurich, 1979. Le rapport contient 25 exposés d'introduction aux 11 thèmes du Congrès. Le choix des thèmes

reflète les objectifs et les préoccupations de l'AIPC: Concepts de sécurité / Influence du comportement des sols sur le dimensionnement des structures / Physique du bâtiment / Esthétique dans les constructions de génie civil / Calcul électronique et constructions de génie civil / Gestion du projet et de la construction de grands aménagements / Construire dans des conditions extrêmes, Technologie appropriée aux régions en développement / Tendances de développement dans la construction des grands ponts / Structures modernes en bois / Constructions spéciales / Leçons du comportement des structures.

Ce rapport servira de référence aux travaux du Congrès et servira de base aux participants désirant présenter une contribution au Congrès.

## Plasticité dans le béton armé

Rapport final du Séminaire de Copenhague 1979. — Volume 29, Rapport des commissions de travail, 360 pages, 170 x 240 mm, 286 illustrations. Toutes les contributions en anglais, résumés en anglais, français et allemand. Prix: Fr. s. 63.— (membres AIPC: Fr. s. 42.—) + frais d'envoi. Publié par l'Association internationale des ponts et charpentes, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zurich (1979). Quarante contributions et l'essentiel des discussions — toutes

en anglais — sont publiées dans le Rapport final du séminaire qui avait trait à l'emploi de la théorie de la plasticité pour le calcul et le dimensionnement de structures en béton armé:

Equations de base, limite d'écoulement / Voiles et poutres en béton armé / Dalles en béton armé / Méthodes numériques / Recommandations basées sur le calcul plastique.

Le colloque a démontré que la plasticité dans le béton armé a atteint un état de maturité suffisant et peut servir de base théorique générale pour déterminer la résistance ultime, statique, des structures en béton armé. Une telle approche globale est nécessaire pour fournir une meilleure base scientifique au dimensionnement en béton armé.