

# TRANSMISSION DE LA CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE

par

F. KREITH

Professeur de Mécanique  
Université du Colorado

*TRADUCTION ET ADAPTATION*

par

KODJA BADR-EL-DINE

Professeur à la Faculté d'Ingénieurs d'Alep (Syrie)  
Ingénieur de l'École Nationale Supérieure du  
Génie Maritime (Paris) Docteur es Sciences

---

---

*PRESENTATION DU P<sup>r</sup>. R. VICHNIEVKY*

---

---

MASSON ET C<sup>ie</sup> ÉDITEURS  
120 BOULEVARD SAINT GERMAIN PARIS VI<sup>e</sup>  

---

---

1967

*ETH-Bibliothek  
Rämistrasse 101  
8092-Zürich*

Matériau	longueur d'onde et température moyenne				
	9,3 $\mu$ 38° C	5,4 $\mu$ 260° C	3,6 $\mu$ 538° C	1,8 $\mu$ 1371° C	0,6 $\mu$ solaire
plaque d'acier rugueuse . . . .	0,94	0,97	0,98		
oxyde . . . . .	0,96	....	0,85		0,74
fondu . . . . .	....	....	....	0,3-0,4	
Magnésium . . . . .	0,07	0,13	0,18	0,24	0,30
Filament de molybdène . . . . .	....	....	~0,09	~0,15	~0,2*
Argent					
Poli . . . . .	0,01	0,02	0,03	....	0,11
Acier inoxydable . . . . .					
18-8 poli . . . . .	0,15	0,18	0,22		
18-8 altéré . . . . .	0,85	0,85	0,85		
Tube en acier					
Oxydé . . . . .	....	0,80			
Filament de tungstène . . . . .	0,03	....	....	~0,18	0,35†
Zinc					
Poli . . . . .	0,02	0,03	0,04	0,06	0,46
tôle galvanisée . . . . .	≈0,25				
Matériaux de construction et d'isolement					
papier d'amiante . . . . .	0,93	0,93			
Asphalte . . . . .	0,93	....	0,9	....	0,93
Brique					
rouge . . . . .	0,93	....	....	....	0,7
argile réfractaire . . . . .	0,9	....	~0,7	~0,75	
silice . . . . .	0,9	....	~0,75	0,84	
magnésie réfractaire . . . . .	0,9	....	....	0,4	
Émail blanc . . . . .	0,9				
Marbre blanc . . . . .	0,95	....	0,93	....	0,47
Papier blanc . . . . .	0,95	....	0,82	0,25	0,28
Plâtre . . . . .	0,91				
Planche de toiture . . . . .	0,93				
Acier émaillé blanc . . . . .	....	....	....	0,65	0,47
Ciment amianté, rouge . . . . .	....	....	....	0,67	0,66
Peintures					
Laque d'aluminium . . . . .	0,65	0,65			
Peinture crème . . . . .	0,95	0,88	0,70	0,42	0,35
Laque blanche . . . . .	0,96	0,98			
Peinture noir de fumée . . . . .	0,96	0,97	....	0,97	0,97
Peinture rouge . . . . .	0,96	....	....	....	0,74
Peinture jaune . . . . .	0,95	....	0,5	....	0,30
Peintures à l'huile (toutes les couleurs) . . . . .	~0,94	~0,9			
ZnO (blanc de zinc) . . . . .	0,95	....	0,91	....	0,18
Divers					
Glace . . . . .	~0,97‡				
Eau . . . . .	~0,96				
Carbone					
Carbure T, 0,9 % de cendres filament . . . . .	0,82 0,72	0,80 ....	0,79 ....	0,53	
Bois . . . . .	~0,93				
Verre . . . . .	0,90	....	....	....	(faible)

SOLUTION. — (a) Le rayonnement qui frappe le corps est caractérisé par la température des parois du four, et le facteur d'absorption du corps pour ce rayonnement est 0,5. Ainsi 50 pour cent du rayonnement incident du corps noir est absorbé, soit

$$G = 0,5 \times 4,88 \times 10^{-3} \times 1366^4 = 8,5 \times 10^4 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2.$$

Rép.

(b) L'émission se produit à une température de 38° C le facteur moyen d'émission du corps est donc égal à 0,8 fois le facteur d'absorption à 38° C. Le pouvoir émissif total est égal à

$$E = 0,8 \times 4,88 \times 10^{-8} \times 311^4 = 364 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2.$$

Rép.

La quantité de chaleur nette transmise par rayonnement est égale à la différence entre la quantité d'énergie absorbée et celle émise par le corps. Dans ce problème l'émission est négligeable comparée à l'absorption, la température du corps étant très faible. Cependant, comme le corps s'échauffe, le rayonnement émis devient de plus en plus grand. Sa température s'approchant de celle des parois du four, l'énergie émise sera en définitive la même que l'énergie absorbée. A la température d'équilibre, le facteur total d'absorption devient donc égal au facteur total d'émission.

Dans le tableau 5-1 sont consignées les valeurs moyennes du facteur d'émission de diverses substances à des températures déterminées.<sup>1</sup> Il est à

Tableau 5-1. — FACTEUR TOTAL D'ÉMISSION DE DIVERSES SURFACES

Matériau	longueur d'onde et température moyenne				
	9,3 μ 38° C	5,4 μ 260° C	3,6 μ 538° C	1,8 μ 1371° C	0,6 μ solaire
Métaux.					
Aluminium					
Poli .....	0,04	0,05	0,08	0,19	~0,3
Oxydé .....	0,11	0,12	0,18		
24-ST usé par les intempéries	0,4	0,32	0,27		
Toiture en aluminium .....	0,22				
Anodisé (à 538° C) .....	0,94	0,42	0,60	0,34	
Laiton					
Poli .....	0,10	0,10			
Oxydé .....	0,61				
Chrome					
Poli .....	0,08	0,17	0,26	0,40	0,49
Cuivre					
Poli .....	0,04	0,05	0,18	0,17	
Oxydé .....	0,87	0,83	0,77		
Fer					
Poli .....	0,06	0,08	0,13	0,25	0,45
Fonte oxydée .....	0,63	0,66	0,76		
Galvanisé, neuf .....	0,23	....	....	0,42	0,66
galvanisé, sale .....	0,28	....	....	0,90	0,89

\* à 2760° C

† à 3300° C

‡ à 0° C

Source: Réf. 11, 15-18

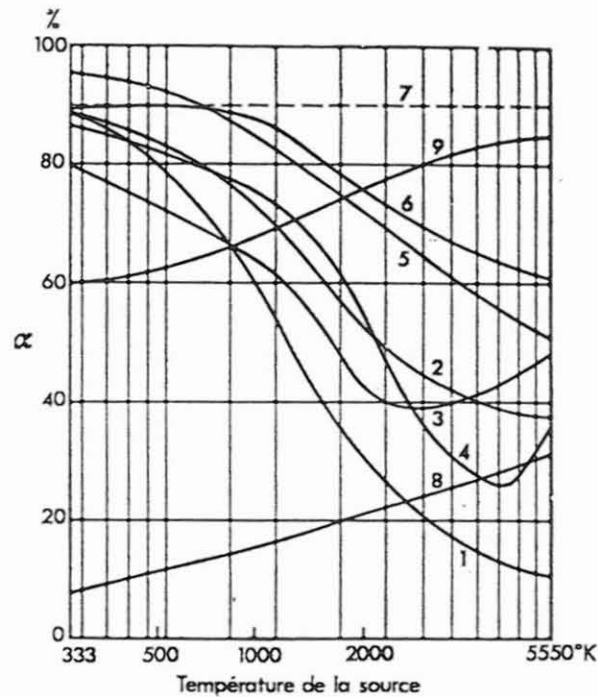
<sup>1</sup> Un aperçu de la littérature révèle un grand désaccord dans les résultats indiqués. Les valeurs consignées dans le tableau 5-1 ont été choisies parmi plusieurs références et l'on peut s'attendre à des écarts avec ces valeurs car un bon nombre de paramètres influencent les facteurs d'absorption et d'émission d'une surface. Une technique expérimentale, décrite dans la Réf. 29, pour la mesure précise du facteur d'émission spectral a été développée récemment.

tous les conducteurs électriques, augmente avec la température de la source, alors que pour les isolants il présente la tendance opposée.

Conformément à la loi de Kirchhoff, le facteur total d'absorption d'une surface est égal à son facteur total d'émission à l'équilibre thermique. Pour les corps gris  $\alpha_\lambda$  et  $\varepsilon_\lambda$  sont constants sur le spectre d'onde entier; en conséquence  $\alpha = \varepsilon$  indépendamment de la température de l'émetteur et du récepteur. Il est important de noter, toutefois, que lorsque  $\varepsilon$  varie avec la longueur

FIG. 5-13. — Effet de la température de l'émetteur sur le facteur moyen d'absorption pour divers matériaux (D'après W. SIEBER, Réf. 3)

- (1) Argile réfractaire blanche
- (2) Amiante
- (3) Liège
- (4) Bois
- (5) Porcelaine
- (6) Béton
- (7) Bardeaux de couverture
- (8) Aluminium
- (9) Graphite



d'onde, cette relation subsiste seulement pour une température donnée ou pour une longueur d'onde donnée. Dans la pratique, un corps émet d'habitude la totalité de son rayonnement à des longueurs d'onde qui sont différentes de celles qu'il reçoit par rayonnement. Par conséquent les valeurs moyennes de  $\varepsilon$  et de  $\alpha$  ne sont pas nécessairement les mêmes, et, pour évaluer correctement  $\varepsilon$  et  $\alpha$  dans le cas d'un corps réel, on doit choisir  $\alpha$  correspondant à la longueur d'onde où à la température à laquelle le rayonnement, frappant le corps, est émis et  $\varepsilon$  correspondant à la température réelle du corps.

**Exemple 5-2.** — Un petit corps à 38° C est placé dans un grand four calorifère dont les parois sont maintenues uniformément à 1093° C. Le facteur moyen d'absorption du corps à 38° C varie avec la température de l'émetteur comme l'indique le tableau ci-dessous.

Température (°C)	38° C	538° C	1093° C
Facteur d'absorption $\alpha$	0,8	0,6	0,5

Déterminer par unité de surface la quantité d'énergie rayonnante (a) absorbée par le corps (b) émise par le corps.

métalliques polies et  $\varepsilon/\varepsilon_n = 0,96$  pour les surfaces non métalliques;  $\varepsilon$  et  $\varepsilon_n$  étant respectivement le facteur moyen d'émission à travers un angle solide hémisphérique de  $2\pi$  radians et le facteur total d'émission dans la direction de la normale à la surface.

Il est nécessaire, pour les calculs de transfert de chaleur, de considérer une valeur moyenne du facteur d'émission ou d'absorption pour la bande de longueur d'onde où la totalité du rayonnement est émise ou absorbée. La bande de longueur d'onde qui présente un intérêt dépend, comme on l'a indiqué dans le Paragraphe 5-1, de la température du corps à partir duquel le rayonnement prend naissance. Si on connaît la distribution du facteur d'émission monochromatique, on peut obtenir le pouvoir émissif total du corps en traçant la courbe  $E_\lambda b_{\lambda b}$  en fonction de  $\lambda$ , sur la gamme de longueur d'onde où se produit une émission notable à une température donnée, et, en mesurant l'aire en dessous de la courbe. Le facteur moyen d'émission pour chaque température s'obtient en divisant cette aire par l'aire située en dessous de la courbe spectroradiométrique d'un corps noir à la même température. Le facteur moyen d'émission étendu à l'ensemble du domaine du rayonnement à une température donnée est alors déterminé par

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda}.$$

Le facteur moyen d'absorption  $\alpha$  pour une surface recevant le rayonnement s'obtient de la même manière en évaluant la fraction

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda}.$$

On peut simplifier le calcul numérique de cette intégrale, le dénominateur étant égal à  $\sigma T^4$ . En remplaçant la variable d'intégration  $\lambda$  par  $\lambda T$ , on obtient:

$$\alpha = \int_0^\infty \alpha_\lambda \frac{E_{b\lambda}}{\sigma T^5} d(\lambda T)$$

La quantité  $(E_{b\lambda}/\sigma T^5)$  est donnée en fonction de  $\lambda T$  dans le tableau A-4 de l'appendice. Comme Dunkle (2) l'a indiqué, si on connaît la courbe  $\alpha_\lambda$  en fonction de  $\lambda$ , il est possible de déterminer la valeur numérique de  $\alpha$  en calculant les produits  $\alpha_\lambda (E_{b\lambda}/\sigma T^5) \Delta(\lambda T)$  pour des accroissements appropriés de  $\lambda T$ , puis en faisant leur somme.

Sieber (3) évalua le facteur total d'absorption pour plusieurs matériaux à  $21^\circ \text{C}$ , et ses résultats sont représentés graphiquement sur la Figure 5-13. On remarque que le facteur total d'absorption de l'aluminium, représentatif de

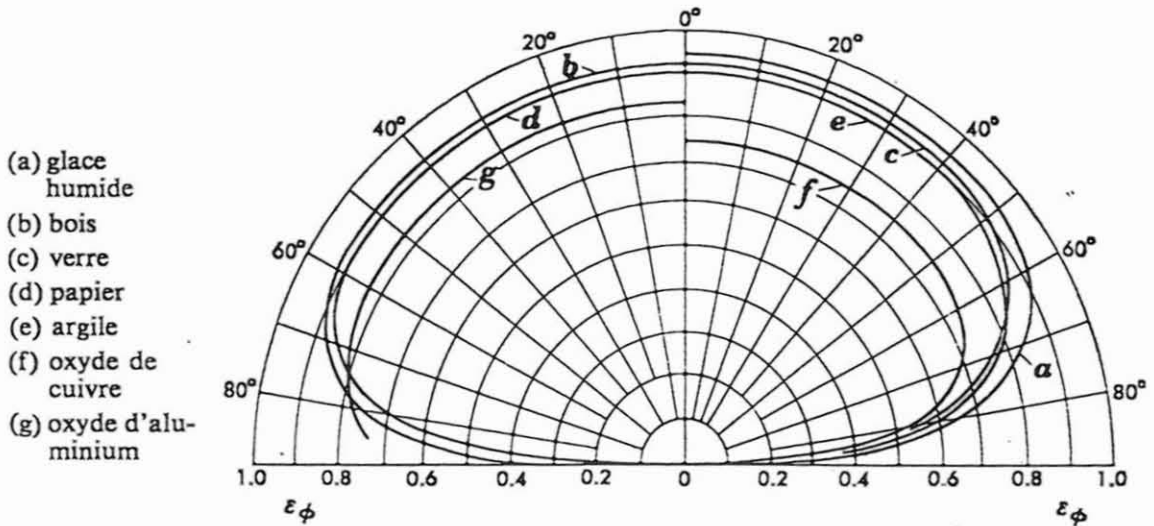


FIG. 5-11. — Variation directionnelle du facteur d'émission pour divers matériaux isolants (Par autorisation de E. SCHMIDT et E. ECKERT "Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung" *Forsch Gebiete Ingenieurwesen* Vol. 6 1935)

rayonnement suit la loi en cosinus de Lambert et dépend seulement de la surface projetée, les courbes du facteur d'émission seraient des demi-cercles. Les mesures de Schmidt et de Eckert (4) montrent que, pour des isolants comme le bois, le papier et les pellicules d'oxydes, le facteur d'émission décroît pour les grandes valeurs de l'angle d'émission  $\phi$ , alors que l'on observe la tendance opposée pour les métaux polis. Par exemple, le facteur total d'émission du chrome poli, que l'on utilise largement comme écran contre le rayonnement, a une valeur aussi faible que 0,06 dans la direction de la normale, mais augmente jusqu'à 0,14 lorsqu'il est vu d'un angle  $\phi$  de 80 degrés. Les données expérimentales sur la variation directionnelle du facteur total d'émission sont rares. Aussi, tant qu'on ne possède pas des informations complémentaires on peut admettre, avec une approximation suffisante pour les calculs pratiques, une valeur moyenne de  $\varepsilon/\varepsilon_n = 1,2$  pour les surfaces

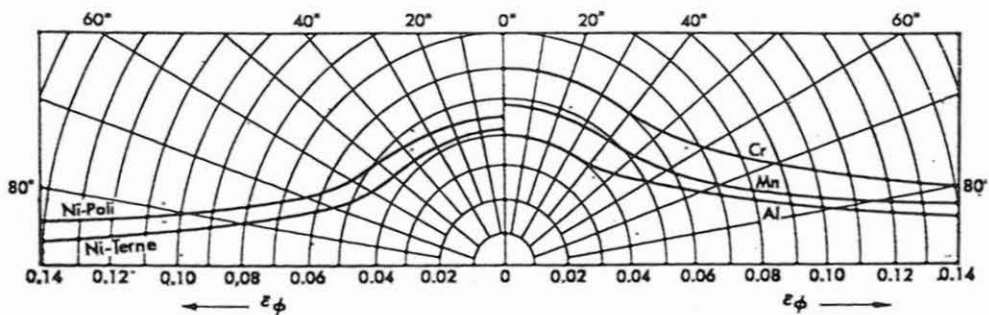


FIG. 5-12. — Variation directionnelle du facteur d'émission pour plusieurs métaux (Par autorisation de E. SCHMIDT et E. ECKERT, "Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung" *Forsch Gebiete Ingenieurwesen* Vol. 6, 1935)

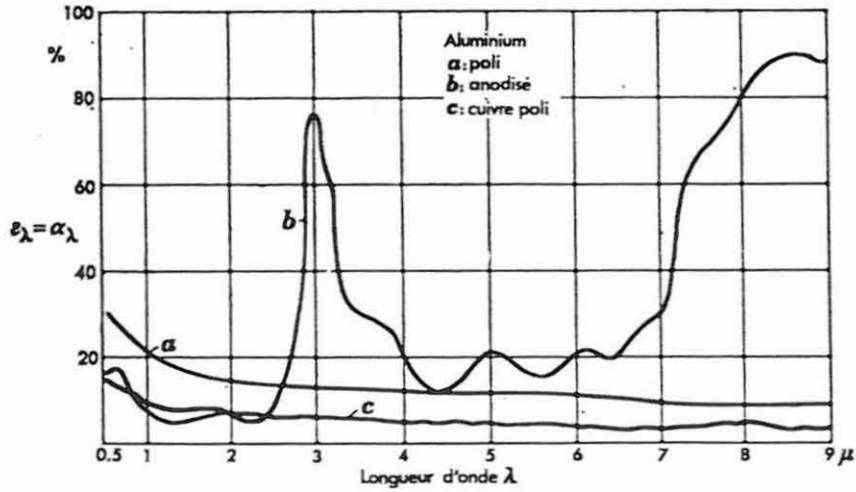


FIG. 5-9. — Variation du facteur d'absorption ou d'émission monochromatique en fonction de la longueur d'onde pour un matériau conducteur (D'après W. SIEBER, Réf. 3)

elle montre que le facteur d'émission décroît lorsque la longueur d'onde augmente. Les corps non conducteurs ont une tendance opposée comme le montrent les courbes du facteur d'émission de l'argile blanche et des tuiles blanches. Le facteur d'émission des isolants croît généralement d'une manière plus ou moins régulière lorsque la longueur d'onde augmente.

En plus de sa variation avec la longueur d'onde, le facteur d'émission de nombreux corps manifeste des propriétés directionnelles qui ne s'accordent pas avec la loi en cosinus de Lambert. C'est ce qu'illustrent les Figures 5-11 et 5-12 où les facteurs d'émission directionnels  $\epsilon_{\phi}$  de plusieurs substances sont reportés en coordonnées polaires. Pour les surfaces dont l'intensité de

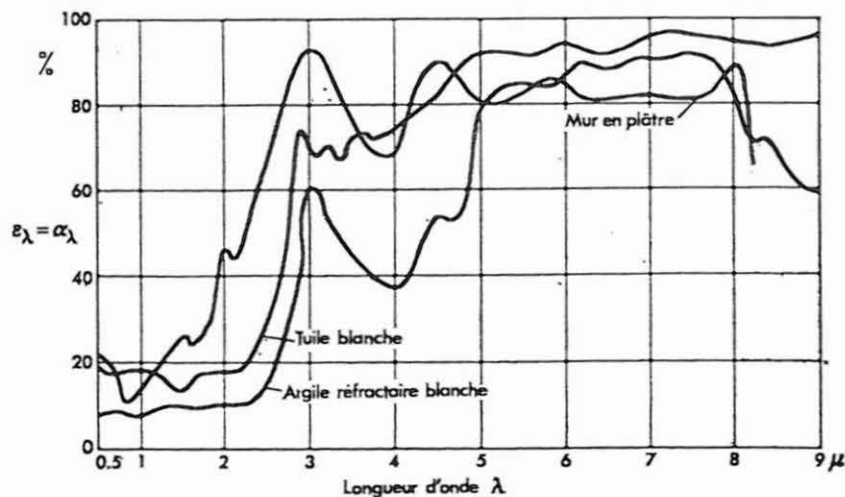


FIG. 5-10. — Variation du facteur d'absorption ou d'émission monochromatique en fonction de la longueur d'onde pour un matériau isolant (D'après W. SIEBER, Réf. 3)



sur une sphère de rayon unité, ou, pour une sphère de rayon  $r$ , à la surface interceptée divisée par  $r^2$ . A partir de la Fig. 5-8 on voit que

$$d\omega_1 = \frac{(r \sin \phi) d\psi(r d\phi)}{r^2} = \sin \phi d\psi d\phi.$$

En remplaçant  $d\omega_1$  par sa valeur dans l'Éq. 5-11, on obtient

$$E = I \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi d\phi$$

qui donne après intégration

$$E = \pi I. \quad (5-12)$$

Ainsi, le pouvoir émissif total d'une surface noire est  $\pi$  fois plus grand que son intensité de rayonnement.

### 5-5. — RAYONNEMENT A PARTIR DE SURFACES RÉELLES

Le rayonnement émanant des surfaces réelles diffère en plusieurs aspects du rayonnement d'un corps noir. D'après la loi de Kirchhoff, une surface réelle rayonne toujours moins qu'un corps noir à la même température. Si, à une température donnée, le rapport du pouvoir émissif monochromatique d'une surface réelle à celui d'un corps noir à la même longueur d'onde est constant tout le long du spectre, la surface est appelée grise et son pouvoir émissif  $E_g$  est donné par

$$E_g = \epsilon_g \sigma T^4. \quad \text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \quad (5-13)$$

La forme d'une courbe spectroradiométrique pour une surface grise est identique à celle d'une surface noire à la même température, mais l'ordonnée est réduite de la valeur numérique du facteur total d'émission. Pour les calculs de transmission de chaleur, on suppose généralement que les surfaces sont grises bien que la plupart des surfaces s'écartent des caractéristiques des corps gris. Sieber (3) a mesuré le facteur de réflexion de plusieurs matériaux sur une gamme de longueurs d'onde et il a trouvé que leurs valeurs changent avec la longueur d'onde. A partir de ces mesures on peut calculer les facteurs d'absorption et d'émission par l'Équation 5-3 et la loi de Kirchhoff. Les résultats sont représentés sur les Figures 5-9 et 5-10 qui traduisent la variation du facteur d'absorption monochromatique  $\alpha_\lambda$  en fonction de la longueur d'onde. La courbe de l'aluminium poli est celle d'un matériau bon conducteur,



noter que les surfaces métalliques propres et polies ont habituellement des facteurs d'émission faibles, alors que beaucoup d'autres surfaces utilisées dans l'industrie ont des facteurs d'émission qui dépassent 0,85 et sont, par conséquent, d'excellents absorbeurs et émetteurs de rayonnement. Il est également évident que la couleur visuelle n'a pas de ressemblance avec la définition du corps noir. Ainsi la glace, qui apparaît blanche à nos yeux, absorbe tout le rayonnement dans le domaine de grande longueur d'onde.

### 5-6. — ÉCHANGE DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT ENTRE LES SURFACES NOIRES

Jusqu'à-là nous avons examiné l'émission et l'absorption du rayonnement pour diverses surfaces sans prendre en considération le flux de chaleur net échangé entre elles. Pour évaluer l'échange net de rayonnement ou le flux de

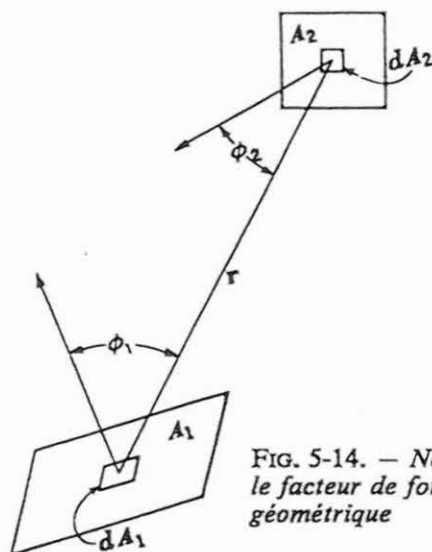


FIG. 5-14. — Notations pour le facteur de forme géométrique

chaleur net entre deux ou plusieurs corps, il est nécessaire de déterminer la fraction de l'émission totale à partir de chacune des surfaces rayonnantes qui atteint les autres et se trouve absorbée. Lorsqu'il s'agit seulement de surfaces noires, tout le rayonnement incident est absorbé et nous n'avons à tenir compte dans ce cas que de la relation géométrique entre les surfaces.

La Figure 5-14 montre les surfaces de deux corps noirs séparées par un milieu qui n'absorbe que très faiblement le rayonnement (par ex. : l'air). Pour déterminer la fraction d'énergie émise par  $A_1$  et tombant sur  $A_2$ , on considère d'abord deux surfaces élémentaires  $dA_1$  et  $dA_2$ . Si la distance qui les sépare