

PHYSIQUE ATMOSPHERIQUE. — *Sur quelques aspects des échanges thermiques entre une surface terrestre, l'atmosphère et l'espace par ciel clair nocturne.*

Note (\*) de MM. FÉLIX TROMBE, HENRI GONDET et FRANÇOIS CABANNES, transmise par M. Gaston Dupouy.

On sait que le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère vers la surface terrestre présente, par ciel clair nocturne, un spectre discontinu avec de nombreuses zones à faible émission énergétique. Ces zones de faible émission correspondent à des « fenêtres » de transparence de l'atmosphère, expression qui traduit la conception maintenant classique [(<sup>1</sup>), (<sup>2</sup>)], que le rayonnement d'un corps terrestre (corps noir) n'est pas entièrement arrêté par l'atmosphère, dans certains intervalles de longueurs d'onde.

Très schématiquement l'émission atmosphérique vers la Terre peut se représenter comme l'indique la figure 1 (traits pointillés).

En A (5 à 8  $\mu$ ), bande principale d'émission de la vapeur d'eau.

En B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub> (8 à 13,5  $\mu$ ), autour de la bande de l'ozone O<sub>3</sub>, principale « fenêtre » de l'atmosphère.

En C (13,5 à 16  $\mu$ ), bande principale d'émission du gaz carbonique avec bandes de l'eau, et en D (16 à 24  $\mu$ ), deuxième « fenêtre » de l'atmosphère, très sensible à la hauteur d'eau précipitable  $\omega$ .

D'après les mesures de A. Adel (<sup>3</sup>) à Flagstaff (Arizona) le rapport R<sub>1</sub>/R<sub>2</sub> des énergies dissipées dans les domaines de longueurs d'onde respectivement supérieurs et inférieurs à 14  $\mu$ , par un corps noir maintenu à la température ambiante, varie avec  $\omega$  de la manière suivante :

$\omega$ (mm H <sub>2</sub> O)....	2	4	6	8	10	12	13,5
R <sub>1</sub> (>14 $\mu$ ).....	0,30	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14
R <sub>2</sub> (<14 $\mu$ ).....							

W. B. Murcray (<sup>4</sup>) par des mesures directes de l'émission atmosphérique vers la Terre à -40°C (Alaska) conclut aussi à une transparence très notable de l'atmosphère au-delà de 16  $\mu$ .

D'après ce qui précède, un corps noir terrestre très froid dont l'émission énergétique tendrait à abandonner le domaine de la « fenêtre » principale (8-13,5  $\mu$ ) pourrait encore dissiper de l'énergie par la deuxième fenêtre (16-24  $\mu$ ); l'émission atmosphérique serait alors due principalement au gaz carbonique (13,5-16  $\mu$ ).

Examinons maintenant comment peut évoluer la température d'une surface rayonnante isolée thermiquement du sol, et séparée de l'atmosphère par un ou des écrans E, E', etc., de natures diverses (films solides ou couches de gaz stables).

L'énergie reçue de l'atmosphère, discontinue, est localisée en A et C et partiellement en D (fig. 1). Par ailleurs, tout se passe comme si elle

provenait d'une infinité de sources à des températures très différentes, variant de la température ambiante à celles, beaucoup plus basses, du niveau de la tropopause. Dans le domaine des fenêtres, principalement 8 à 13,5  $\mu$ , l'énergie reçue est la somme d'une émission atmosphérique très faible et de l'émission de l'espace.

En l'absence de données précises on considère habituellement que l'espace n'émet pas plus d'énergie qu'un corps noir maintenu entre 100 et 150°K (quelques watts par mètre carré) <sup>(5)</sup>.

Dans les échanges thermiques terre-atmosphère-espace, nous considérerons plusieurs cas :

1. LES ÉCRANS EE' A TRAVERS LESQUELS SE FONT LES ÉCHANGES SONT TOTALEMENT TRANSPARENTS. — *a. Cas du radiateur terrestre, corps noir.* — Le radiateur absorbe toute l'énergie  $W$  provenant de l'atmosphère et émet une énergie  $W' = \sigma T^4$ . A l'état initial il est à la température de l'air ambiant et a tendance à se refroidir, car la différence  $W' - W = r$  est fortement positive. A l'équilibre  $r = 0$ , le corps noir atteint une température  $T_1$  telle que  $W = W' = \sigma T_1^4$ .

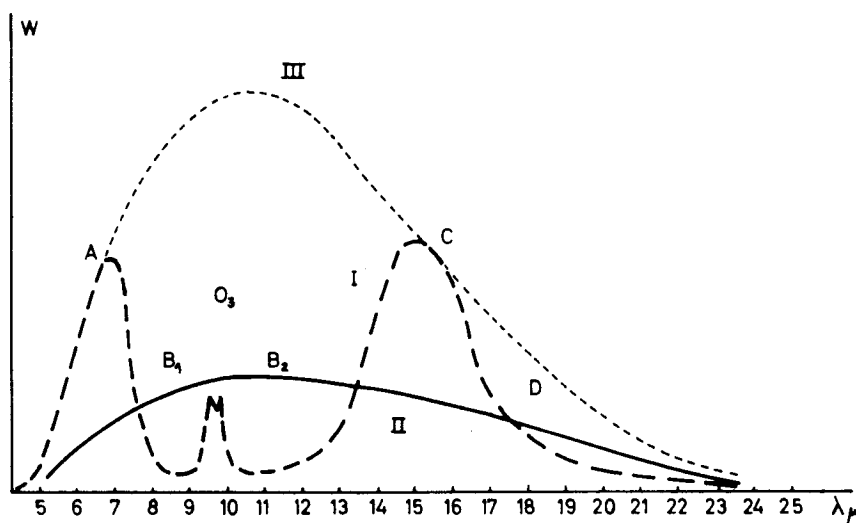


Fig. 1.

Dans les conditions précédentes on peut tracer une courbe représentant  $\sigma T_1^4$  (fig. 1, II, traits pleins), qui délimite par rapport à l'axe des longueurs d'ondes la même surface que la courbe I. (La courbe III qui enveloppe sensiblement la courbe I représenterait l'émission du corps noir à une température « moyenne » de l'atmosphère.)

La température  $T^4$  a été appelée par Boutaric <sup>(6)</sup> température « efficace » de l'atmosphère. G. Ribaud préfère lui donner le nom plus correct de « température de radiation » <sup>(7)</sup>.

*b. Cas d'un radiateur sélectif.* — Dans les conditions les plus favorables on peut envisager, comme l'avait indiqué l'un de nous [<sup>(8)</sup>, <sup>(9)</sup>], que le

corps radiateur *réfléchisse* ou *transmette* les énergies émises sélectivement par l'atmosphère, et se comporte comme un corps noir dans le seul domaine des « fenêtres ». Il semble alors évident que les échanges par rayonnement doivent conduire le corps radiateur (isolé du sol et de l'air ambiant) au voisinage de la température la plus basse du système, c'est-à-dire celle de l'espace.

2. LES ÉCRANS EE' SONT TRANSPARENTS POUR LES FENÊTRES ET PRÉSENTENT DES BANDES D'ABSORPTION DANS LES MÊMES DOMAINES DE LONGUEURS D'ONDE QUE L'ATMOSPHÈRE. — Nous examinerons le cas du radiateur terrestre, corps noir.

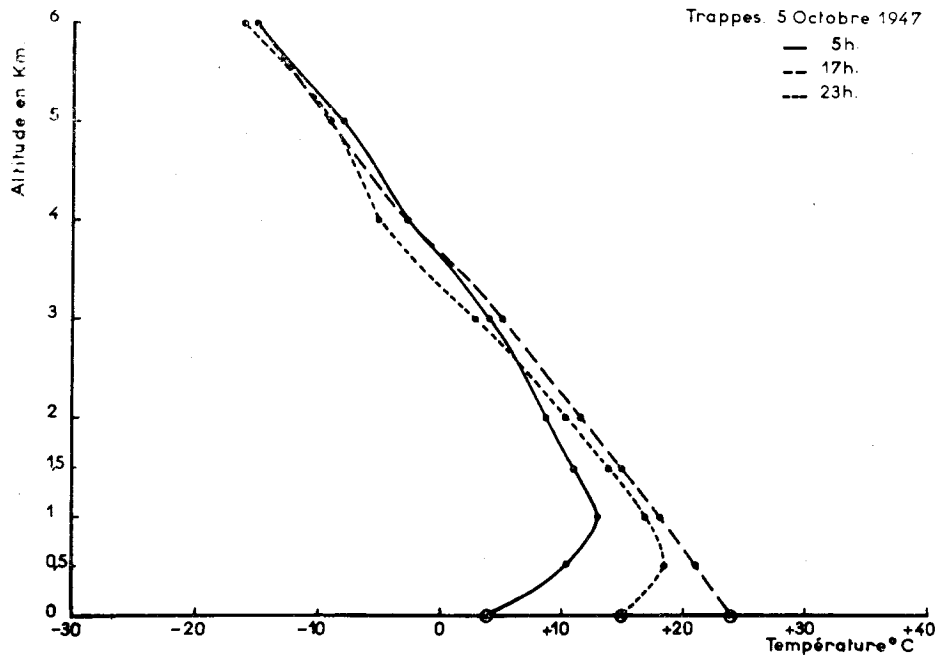


Fig. 2.

Ces écrans EE' peuvent être constitués de couches de l'atmosphère elle-même au voisinage du sol, ou de couches de gaz carbonique (dont nous verrons les effets dans une Note ultérieure), ou encore de parois solides telles que des films de plastiques déjà décrits [(<sup>8</sup>), (<sup>9</sup>)].

Désignons comme précédemment par  $W$  l'énergie provenant de l'atmosphère et définissant sa température de radiation  $T_1$ , et par  $W' = \sigma T^4$  l'énergie émise par le radiateur terrestre (corps noir).

Soit  $r$  le coefficient de réflexion de l'écran E, et  $a$  son coefficient d'absorption pour le rayonnement  $W$ . L'énergie transmise de l'atmosphère vers le radiateur terrestre est égale à  $W(1 - r - a)$ .

De même, soit  $r'$  et  $a'$  les coefficients de réflexion et d'absorption de l'écran E pour le rayonnement  $W'$  du radiateur. L'énergie transmise à travers l'écran vers l'atmosphère sera égale à  $W'(1 - r' - a')$ .

L'écran absorbera les énergies  $Wa$  et  $W'a'$  tout en rayonnant également vers le corps noir et vers l'atmosphère.

En établissant le bilan radiatif on arrive à l'expression connue

$$\frac{W'}{W} = \frac{1-r-a/2}{1-r'-a'/2} = \frac{T^4}{T_1^4}$$

On peut admettre pour simplifier que  $r = r'$ . Par contre,  $a$  est certainement différent de  $a'$  en raison des formes très différentes des courbes d'émission.

Si  $a'$  est plus grand que  $a$ ,  $T$  est plus grand que  $T_1$ , on a un *effet de serre positif classique*.

Si  $a'$  est plus petit que  $a$ ,  $T$  est inférieur à  $T_1$ ; *l'effet de serre est inversé ou négatif* [(<sup>8</sup>), (<sup>9</sup>)].

Nous donnons sur la figure 2 un exemple à grande échelle de ce phénomène. Il s'agit d'une des inversions journalières de la température de l'air en fonction de l'altitude, observée par M. Roulleau à Trappes en 1947.

D'après l'allure des courbes, il apparaît que la perte énergétique est située au niveau de la surface terrestre, et il semble évident que cette perte ne peut exister qu'à travers l'atmosphère, donc dans les domaines de transparence de celle-ci (fenêtres).

Le refroidissement de la surface terrestre entraîne par échanges radiatifs celui des couches atmosphériques qui la surmontent. La Terre émet dans le domaine des fenêtres et reçoit de moins en moins d'énergie des couches atmosphériques de plus en plus froides. A l'abri de cette *serre atmosphérique* elle peut se refroidir considérablement.

En l'absence de turbulence et de condensation, le phénomène progresse continuellement et ne s'arrête qu'au lever du jour.

(\*) Séance du 4 mai 1964.

(1) PERRIN DE BRICHAMBAUT, *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, Gauthier-Villars, Paris, 1963.

(2) B. HAURWITZ, *Dynamic Meteorology*, Mac Graw Hill, London, 1941.

(3) A. ADEL, *Infrared Physics*, 2, 1962, p. 31-35.

(4) W. B. MURCRAY, *Science*, 141, n° 583, 1963, p. 802-804.

(5) P. KUIPER, *The solar system. Planets and Satellites*, Chicago Press, 1961, p. 414-415 et 438-439.

(6) A. BOUTARIC, *Comptes rendus*, 178, 1924, p. 1303.

(7) G. RIBAUD, *Comptes rendus*, 256, 1963, p. 3395.

(8) F. TROMBE, *Comptes rendus*, 256, 1963, p. 735.

(9) F. TROMBE, *Comptes rendus*, 256, 1963, p. 2013.