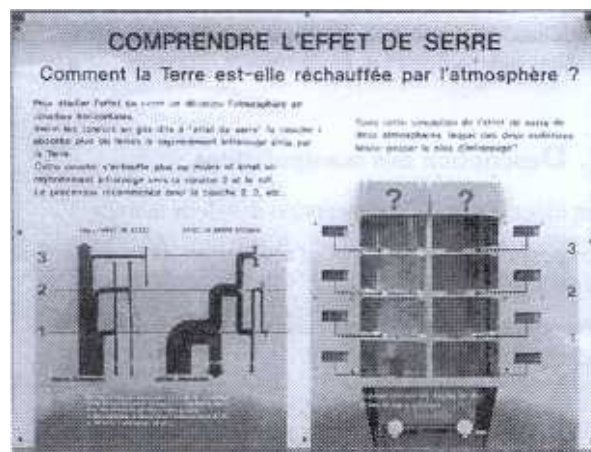


Effet de serre de l'atmosphère



Collection de l'Atelier d'exploration

Conception

A. Billet

Conseillers scientifiques

L. Dufresne, J. Y. Grandpeix, A. Lahellec,

Équipe Ramses, LMD, CNRS

Développement

V. Faure, J. Pasqualini

. Contenu scientifique

Le rayonnement infrarouge

De la serre à l'atmosphère

Propriétés radiatives d'un corps : le corps noir et les corps naturels

Absorption du rayonnement infrarouge par les gaz

Influence des gaz à effet de serre

Absorption du rayonnement infrarouge par les matériaux

Modélisation graphique des échanges de chaleur entre les plaques déterminant l'effet de serre

2. Description des manipulations

Les idées forces de la conception des deux manip

Comprendre l'effet de serre : l'absorption du rayonnement infrarouge

Comprendre l'effet de serre : comment la terre est-elle réchauffée par l'atmosphère ?

3. Exploitation pédagogique

Historique de la recherche expérimentale sur l'infrarouge

Historique de l'effet de serre

Quelques observations sur l'effet du rayonnement infrarouge du sol

Histoire du projet

Introduction

La température de la surface de la terre résulte d'un équilibre entre les apports de chaleur (principalement le rayonnement solaire incident) et les pertes (presque exclusivement le rayonnement infrarouge émis vers l'espace). Cet équilibre est en perpétuel ajustement, tout bilan positif amenant une élévation de température, entraînant elle-même une augmentation de la puissance rayonnée, jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre soit atteint. Dans ce mécanisme de perturbation et d'ajustement, l'atmosphère joue un rôle très important d'écran protecteur, semblable au rôle joué par la vitre d'une serre, grâce à la présence de gaz absorbant le rayonnement infrarouge. On estime en effet que si l'atmosphère était constitué d'air pur (c'est-à-dire composé d'oxygène, d'azote et d'argon, gaz transparents au rayonnement infrarouge), la température moyenne de la surface serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. C'est la présence des gaz absorbants qui porte cette température à $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cette élévation de température, due au rôle d'écran de l'atmosphère, est baptisé effet de serre. Les gaz participant à l'absorption du rayonnement infrarouge sont communément appelés gaz à effet de serre. Ils présentent tous des concentrations atmosphériques essentiellement variables. Le principal est la vapeur d'eau, dont la concentration résulte de l'ensemble des mécanismes météorologiques. Ensuite viennent le dioxyde de carbone (dont la concentration est passée de 315 ppmv en 1958 à 355 ppmv en 1990), le méthane, l'ozone, les chlorofluocarbones et l'oxyde nitreux. Une bonne part de ces gaz est anthropogénique, c'est-à-dire produite par l'activité humaine et donc variable avec celle-ci.

L'activité industrielle, le chauffage et les moyens de transport sont principalement à l'origine des émissions de CO_2 . Le reste provient de la déforestation par le feu et de certaines pratiques agricoles.

La source anthropogénique d'oxyde nitreux (N_2O) réside vraisemblablement dans l'usage des engrais et dans la dénitrification des sols entraînée par le déboisement.

La source de méthane (CH_4) est probablement due aux fermentations en milieu privé d'oxygène (rizières, marécages, pâturages, décharges).

Les composés chlorofluorocarbonés (CFC) sont injectés massivement dans l'atmosphère par les bombes aérosols et surtout par l'industrie du froid et des mousses en plastique.

Comment le climat réagira-t-il à cette modification de la composition chimique de l'atmosphère ? Un réchauffement paraît inéluctable, mais quels seront son importance et sa répartition géographiques, son impact sur les bilans hydriques régionaux ? Autant de questions auxquelles il est très difficile de répondre car les rouages du système climatique sont très complexes comme le montrent les variations « naturelles » des gaz à effet de serre.

L'étude des carottes prélevées dans les calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groënland montre que les variations climatiques au cours des périodes géologiques, et particulièrement au cours du dernier cycle climatique (depuis 160 000 ans), se sont accompagnées de modifications importantes de la composition chimique de l'atmosphère. Lors des dernières transitions glaciaires-interglaciaires les teneurs en gaz carbonique et en méthane de l'atmosphère sont passées respectivement de 180-200 parties par million en volume (ou ppmv) à 270-280 ppmv et de 0,36 à 0,65 ppmv. Ces variations concomitantes de la teneur en CO_2 et de la température globale de l'atmosphère - réchauffement de plusieurs degrés - sont encore inexplicables.

Les derniers travaux scientifiques sur le « changement climatique » n'apportant pas encore de réponses définitives, nous centrerons notre action culturelle sur les phénomènes fondamentaux qui doivent être appréhendés scientifiquement par le public. Il s'agit de susciter des représentations très simples et exactes de ces interprétations fantaisistes de tous les discours globalisant l'effet de serre.

La manipulation « Effet de serre » met en scène deux phénomènes :

- l'absorption par l'atmosphère du rayonnement infrarouge. Cette propriété est montrée par l'analogie matériau et atmosphère, en situant le point de vue hors de l'atmosphère. À quoi correspond la température mesurée par un satellite ?
- le réchauffement qui en résulte. Pourquoi la température diminue-t-elle avec l'altitude ? Quelle est l'influence de l'effet de serre sur la température ?

En résumé, nous avons deux manipulations :

- « Comprendre l'effet de serre : l'absorption du rayonnement infrarouge ».
- « Comprendre l'effet de serre : comment la terre est-elle réchauffée par l'atmosphère ? »

1 Contenu scientifique

68

Particulièrement difficile à appréhender, le contenu scientifique du rayonnement infrarouge pose le problème de la représentation de l'effet de serre dans le cadre d'une exposition. Un rappel de l'histoire des premiers travaux en la matière met en évidence la difficulté de conceptualiser ce rayonnement, notamment son intégration dans le continuum du rayonnement. On pensait qu'il existait un rayonnement calorifique ou thermique spécifique (appelé aussi rayonnement invisible ou obscur) dont la propriété était de chauffer les objets. On distinguait d'ailleurs trois types indépendants de rayonnement en fonction de leur effet : le rayonnement actinique (ultraviolet) capable d'activer ou déclencher des réactions chimiques, le rayonnement lumineux (visible) et le rayonnement thermique. Notons que les études de l'absorption du rayonnement infrarouge par les gaz (le CO₂) ont été entreprises 50 ans après la découverte de ce rayonnement (dans les années 1860).

En ce qui concerne l'effet de serre atmosphérique, il n'est pas facile d'accepter l'idée que l'atmosphère, perçue comme étant quelque chose de froid, réchauffe la terre ou plutôt diminue les pertes thermiques. Pour comprendre ce phénomène, il faut soit s'interroger sur la diminution de la température en fonction de l'altitude, soit se situer à l'extérieur de l'atmosphère et analyser la transmission spectrale du rayonnement infrarouge. Il n'est pas surprenant que les premiers chercheurs sur l'effet de serre aient été des passionnés de montagne comme le suisse H. B. de Saussure (1740-1799) puis l'Irlandais Tyndall (1820-1893). H. B. de Saussure a été à l'origine de l'analogie entre le vitrage d'une serre et l'enveloppe atmosphérique du globe¹. Afin de montrer l'effet de l'énergie solaire sur l'air en fonction de l'altitude, il avait construit un dispositif expérimental constitué de cinq caisses emboîtées les unes dans les autres et équipées de thermomètres. En 1860, Tyndall a montré que l'effet de serre était dû essentiellement à la vapeur d'eau, et que toute variation de la vapeur d'eau - comme du CO₂, découvert au XVIII^e siècle par Black - devait se traduire par un changement climatique.

Pour appréhender le phénomène des échanges de chaleur, il faut avoir compris que tout corps émet un rayonnement et que les pertes vers l'extérieur (vers l'univers dans le cas de la terre) sont régies par l'absorption du rayonnement IR des corps le recouvrant. D'où l'analogie entre la couverture et l'atmosphère au cours du XIX^e siècle.

1. Grinevald J., « De Carnot à Gaya, histoire de l'effet de serre », *La Recherche*, n° 243, vol. 23, mai 1992.

Nous devons affronter maintes idées préconçues. Selon une croyance assez répandue, les objets terrestres n'absorbent des radiations que pendant la journée et n'en émettent qu'au cours de la nuit. Cela implique que ces objets seraient capables de repérer le coucher du soleil. En réalité les rayonnements infrarouges sont émis de nuit comme de jour et ils sont plus importants le jour que la nuit, parce que les températures diurnes sont habituellement plus élevées. Dans la suite, nous donnons les principaux éléments de réponses aux questions suivantes : « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » et « Quels sont les outils conceptuels qui permettent de le comprendre ? »

Le rayonnement infrarouge

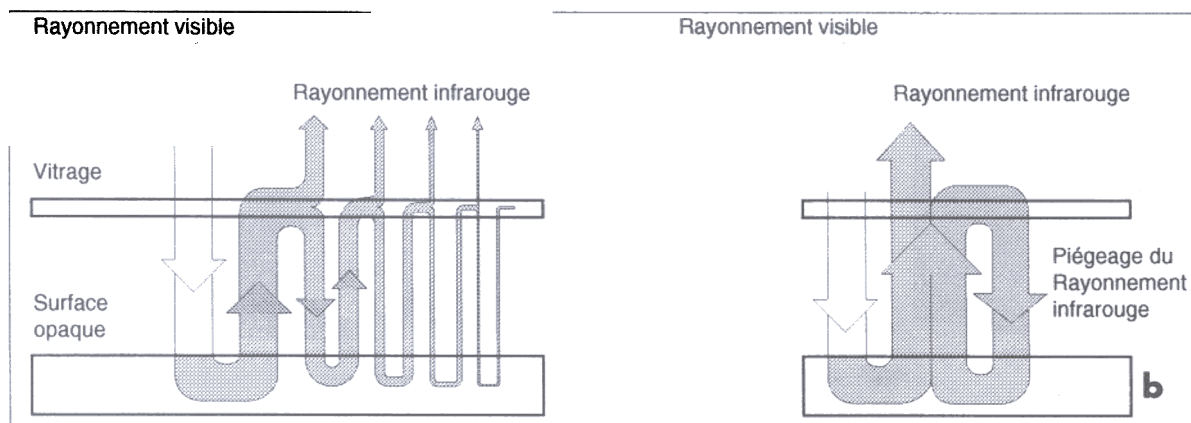
C'est un rayonnement électromagnétique (dont les longueurs d'onde s'étendent de 0,75 µm à 1000 µm) qui est invisible à l'œil humain, mais perceptible par la peau, du fait de l'échauffement provoqué. La plage de 0,75 µm à 2,5 µm est le domaine de l'infrarouge proche, celle de 2,5 µm à 25 µm de l'infrarouge moyen et au-delà de 25 µm de l'infrarouge lointain. Le rayonnement visible correspond à la bande spectrale 0,4 µm à 0,75 µm.

Le rayonnement infrarouge a été découvert en 1800 par Herschell qui, en explorant le spectre solaire décomposé par un prisme au moyen d'un thermomètre, a constaté que dans la région invisible prolongeant le spectre au-delà du rouge, le thermomètre sensible indiquait une élévation de température. Improprement appelé rayonnement thermique, l'infrarouge, comme tous les autres rayonnements (ultraviolet, visible), peut être absorbé par des écrans ou des corps interposés et se transformer en chaleur par dégradation énergétique. Lorsqu'il traverse un écran transparent à sa bande spectrale, il ne l'échauffe pas. Cette transparence est indépendante de la couleur du matériau : un écran de couleur noire peut être transparent aux infrarouges.

De la serre à l'atmosphère

Afin d'expliquer le phénomène « effet de serre », analysons les échanges thermiques dans une serre. Ses parois transparentes ou translucides, en verre ou en feuilles de plastique, laissent passer le rayonnement visible qui transporte une grande partie de l'énergie solaire, mais absorbent les radiations

Figure 1



Principe simplifié de l'effet de serre (on néglige les réflexions du rayonnement par le vitrage et la surface fond de serre).

infrarouges qui constituent l'essentiel de l'énergie réémise par le sol chauffé. La chaleur est ainsi partiellement emprisonnée dans la serre (fig. 1)

L'effet de serre atmosphérique repose sur le même principe : les gaz composant l'atmosphère (de même que le verre) laissent passer le rayonnement solaire dans le visible et le proche infrarouge. Certains composés gazeux comme la vapeur d'eau (H_2O) - surtout présent dans les basses couches atmosphériques - et le gaz carbonique (CO_2), du fait de leur structure moléculaire triatomique, absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la planète. La chaleur solaire, partiellement piégée, maintient la surface de la terre à une température moyenne de $15\text{ }^\circ\text{C}$ (voir manip « Bilan thermique du système surface de la terre-atmosphère »).

Sans l'effet de serre, la terre serait une planète gelée ($-18\text{ }^\circ\text{C}$). Les nuits à la campagne, par temps clair et sec, ou bien dans le désert, on observe que la surface du sol est froide, la température descend en dessous du point de rosée et il y a beaucoup de rosée ou de givre le matin (fig. 2). C'est la conséquence d'un faible effet de serre par temps clair et sec.

Nous définirons dans un premier temps l'émission du rayonnement infrarouge par la surface d'un corps, puis nous aborderons les phénomènes de son absorption par les gaz et par les matériaux.

Propriétés radiatives d'un corps

Le corps noir

Le champ du rayonnement thermique émis par corps réel se décompose en rayonnements élémentaires caractérisés par des longueurs d'onde λ . La densité d'énergie de ces rayonnements ou luminance monochromatique varie notamment en fonction de la longueur d'onde, de la température absolue, et de

nombreux facteurs caractérisant l'émissivité. Pour étudier les propriétés radiatives d'un corps réel, on a introduit la notion de corps noir. Le corps noir est un objet idéal, référentiel, capable d'absorber complètement l'énergie qu'il reçoit et constituant un émetteur parfait de rayonnement électromagnétique. L'énergie émise ne dépend que de la température T du corps. En laboratoire, le corps noir est réalisé par une cavité isotherme, qui piège le rayonnement des parois. Une petite ouverture permet d'accéder à l'intérieur.

La loi de Stefan-Boltzmann donne l'énergie totale émise par le corps noir à une température T et dans un hémisphère :

$$M = \sigma T^4 \text{ W/m}^2$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

T : température absolue $\text{K} = 273,16 +$ valeur de la température exprimé en $^\circ\text{C}$,
($0\text{ }^\circ\text{C} = 273,16\text{ K}$).

À la température de $0\text{ }^\circ\text{C}$ ou $273,16\text{ K}$, l'énergie émise par le corps noir est de 315 W/m^2 ; à $30\text{ }^\circ\text{C}$, elle devient égale à 478 W/m^2 . La densité d'énergie émise par un corps noir autour d'une longueur d'onde et d'une direction donnée, la luminance monochromatique directionnelle L , exprimée en $\text{W/m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$, est donnée par la loi de Planck :

$$W = (1/\pi) C_1 \lambda^{-5} (\exp(C_2 \lambda^{-1} T^{-1}) - 1)^{-1}$$

T : température absolue en Kelvin K

C_1 : constante = $3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$

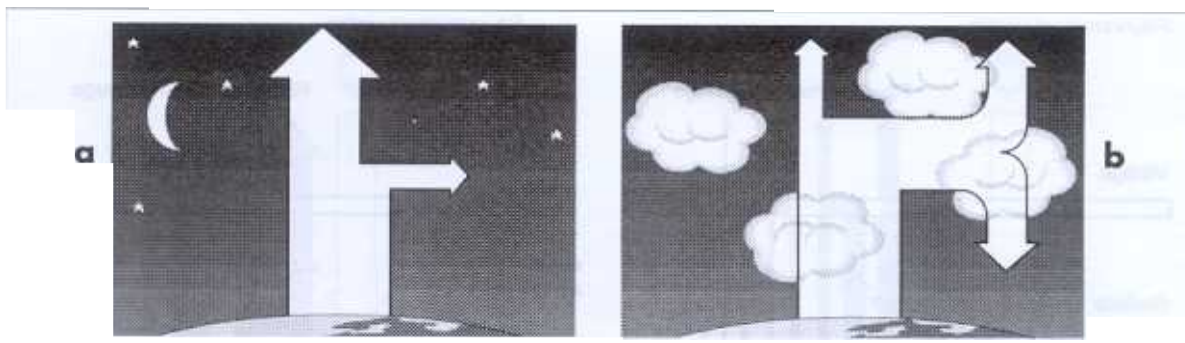
C_2 : constante = $1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

λ : longueur d'onde en μm

sr^{-1} mesure de l'angle solide en stéradian.

La figure 3 représente, pour différentes températures, les variations de densité de l'énergie émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde. On constate qu'aux courtes longueurs d'onde, la luminance monochromatique est très fortement dépendante de la température. Dans le jaune par exemple ($\lambda = 0,6\text{ }\mu\text{m}$), elle reste infime au-dessous de 900 K et croît de 10 ordres de grandeur entre 900 K et $3\text{ }000\text{ K}$.

Figure 2



Refroidissement du sol par rayonnement infrarouge.

a. L'essentiel du rayonnement infrarouge émis par le sol est transmis par l'atmosphère. Par temps sec et ciel dégagé, les nuits sont froides ; l'été, le sol se refroidit, la rosée (condensation de la vapeur d'eau) est abondante. L'hiver, le givre est abondant. Dans le désert, les nuits sont toujours froides alors que le jour, la température peut dépasser 50 °C.

b. Une grande partie du rayonnement infrarouge émis par le sol est absorbée par l'atmosphère, par ciel nuageux, les nuits sont douces, le sol se refroidit peu et il n'y a guère de rosée. L'hiver, il ne gèle pas, on observe de faibles écarts de température entre le jour et la nuit.

La loi de Wien donne la longueur d'onde correspondant au maximum de la densité d'énergie :

$$\lambda_{\max} T = 2898$$

avec λ_{\max} en μm

T : température absolue K.

Si T = 0 °C, $\lambda_{\max} = 10,6 \mu\text{m}$; T = 5 762 K - température du soleil $\lambda_{\max} = 0,50 \mu\text{m}$.

La plage spectrale s'étendant de $\lambda_{\max} / 2$ à $8 \lambda_{\max}$ correspond à 98 % de l'énergie.

peau humaine	0,98
bois	0,90
eau	0,96

Les corps naturels

Un corps réel émet moins d'énergie qu'un corps noir à longueur d'onde et à température égales. On a introduit des coefficients correcteurs qui permettent de calculer l'émission d'un corps réel à partir des propriétés radiatives du corps noir. Parmi ces coefficients nous distinguons l'émissivité totale ϵ qui permet de calculer l'énergie émise avec la relation :

$$M = \epsilon \sigma T^4 ;$$

si l'émissivité est de 0,2 et la température du corps de 0 °C l'énergie émise est de 63 W/m², la surface perd peu d'énergie thermique, elle est « plus isolante » qu'une surface noire, d'où l'introduction de film plastique aluminisé dans l'isolation des murs.

Voici les valeurs de l'émissivité de certains matériaux à température ambiante :

aluminium poli	0,05
aluminium anodisé	0,55
cuivre oxydé	0,80
cuivre poli	0,05
verre poli	0,94
vernis noir mat	0,97
vernis blanc	0,92
peinture à l'huile	0,94

Le corps réel a un comportement complexe. Il absorbe, réfléchit, transmet le rayonnement incident de telle sorte que :

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 ;$$

$\alpha(\lambda)$ = facteur d'absorption monochromatique ou absorptivité spectrale ;

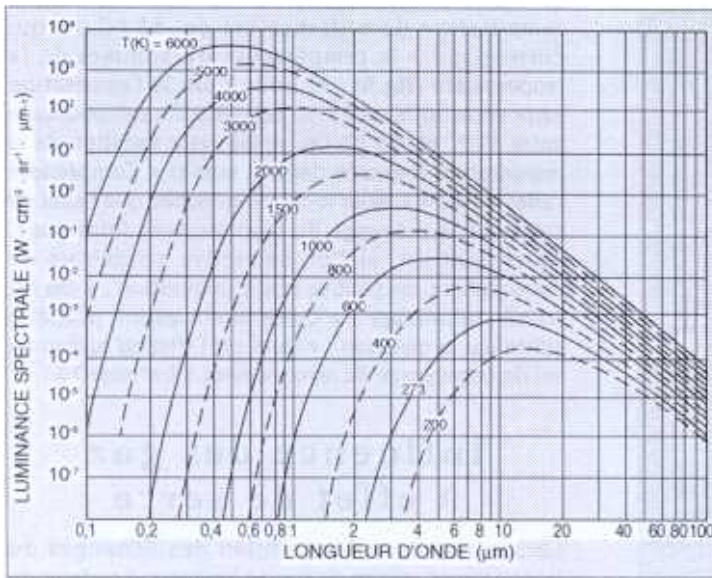
$\rho(\lambda)$ = facteur de transmission monochromatique, ou transmissivité spectrale ;

$\tau(\lambda)$ = facteur de réflexion monochromatique ou réflectivité spectrale.

Le paramètre (λ) signifie que ces facteurs dépendent, entre autres, de la longueur d'onde. Par exemple, un corps peut absorber 100 % du rayonnement solaire visible et 0 % de l'infrarouge (corps sélectif utilisé pour les capteurs solaires thermiques). Le facteur d'absorption du rayonnement solaire α_s prend la valeur 0,4 pour l'acier inoxydable ; 0,85-0,98 pour la peinture noire ; 0,42 pour de l'aluminium oxydé alors que le facteur d'émission dans le spectre du rayonnement infrarouge varie de 0,05 (acier inoxydable) à 0,76 (aluminium oxydé) en passant à 0,94 (peinture noire).

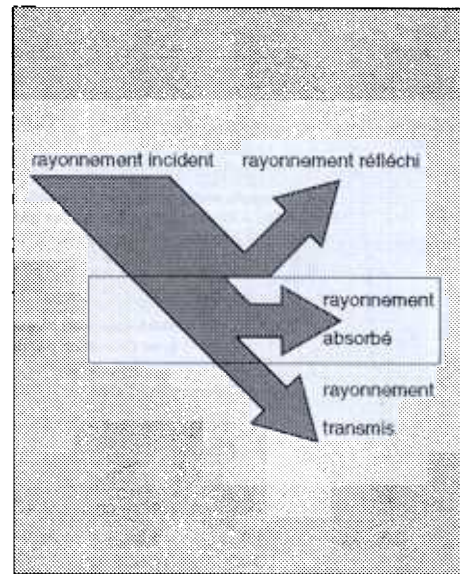
À l'équilibre thermique, l'objet doit émettre autant d'énergie qu'il en reçoit, d'où la relation (Loi de Kirchoff) : $\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$ avec $\epsilon(\lambda)$, facteur d'émission monochromatique ou émissivité spectrale. Dans l'exemple du capteur solaire, à la faible valeur du facteur d'émission dans le spectre infrarouge correspond, d'après la loi de Kirchoff, une faible valeur du facteur d'absorption. Ainsi, l'absorbeur n'est pas refroidit par rayonnement et cède par conduction sa chaleur au fluide à réchauffer.

Figure 3



Distribution spectrale du rayonnement du corps noir à différentes températures.

Figure 4



Le rayonnement au travers d'un corps non opaque.

Absorption du rayonnement infrarouge par les gaz

L'atmosphère est un « corps réel » qui possède un facteur d'absorption-émission $\epsilon(\lambda)$, un facteur de réflexion $\rho(\lambda)$ et un facteur de transmission $\tau(\lambda)$ qui dépendent tous, entre autres, de la longueur d'onde des rayonnements incidents.

Le soleil dont la température de surface est d'environ 6 000 K émet un rayonnement dont les longueurs d'onde s'étendent entre 0,2 μm et 5 μm environ (fig. 5). En traversant l'atmosphère une partie du rayonnement est absorbée par les gaz atmosphériques et transformée en chaleur (l'ozone absorbe une partie du rayonnement ultraviolet compris entre 0,2 μm et 0,4 μm , la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone absorbent une partie du rayonnement infrarouge). Une autre est transformée en un rayonnement diffus dans toutes les directions sous l'action des molécules de gaz et des aérosols. Ce rayonnement diffus, lorsqu'il n'est pas transmis directement hors de l'atmosphère, est ensuite réfléchi ou absorbé par les gaz et les aérosols.

L'effet de serre est limité par l'existence de «fenêtres» dans le spectre d'absorption infrarouge de certains gaz atmosphériques. Le rayonnement se situant dans cette fenêtre est envoyé vers l'espace sans être absorbé et contribue négativement au bilan énergétique. Ces fenêtres jouent un rôle fondamental dans la température au sol.

Le phénomène d'absorption provient d'un changement d'énergie interne des molécules, entre autres l'énergie électronique, de rotation et de

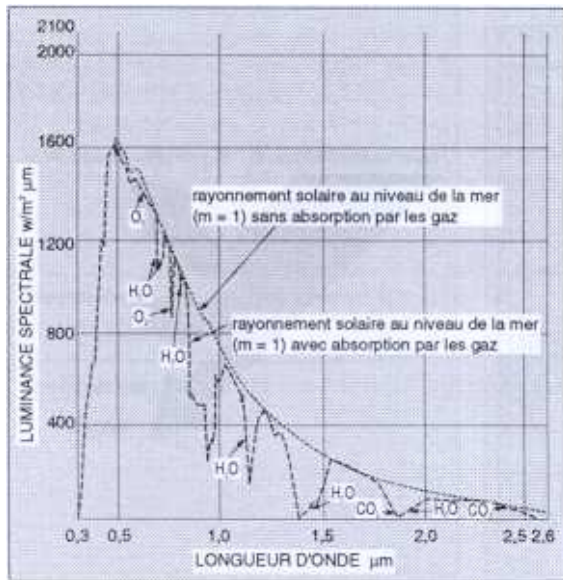
vibration. La variation de l'énergie électronique de chaque atome constitutif est responsable de l'absorption dans l'ultraviolet et le visible. La variation de l'énergie de vibration est due au battement de deux atomes, l'un par rapport à l'autre. Ce phénomène génère les modes d'absorption aux grandes longueurs d'onde (fig. 6), par exemple, pour la vapeur d'eau vers 1,3 μm , 1,75 μm , 2,75 μm et 6 μm et pour le gaz carbonique vers 2,7 μm , 4,25 μm et 14,5 μm ; l'ozone vers 9,5 μm . La vibration de déformation de balancement, de rotation ou de torsion est responsable de la structure fine des bandes spectrales. Les variations de pression, de concentration et de température modifient la largeur et l'intensité des raies spectrales par excitation de nouveaux niveaux d'énergie et par effet Doppler.

Ainsi, par la stratification de l'atmosphère, la propagation verticale du rayonnement diffère nettement de la propagation horizontale. Dans les deux cas, la longueur du trajet du rayonnement est un facteur important de l'absorption. Pour la bande spectrale de 12,5 μm à 8,7 μm , le facteur de transmission horizontale passe de 0,95 pour une distance de 1 km à 0,6 pour 10 km. En ce qui concerne l'absorption verticale par l'atmosphère, elle se fait essentiellement dans la troposphère (fig. 7).

Lorsque un satellite mesure des luminances spectrales, celles-ci sont couramment converties en températures de brillance, définies comme les températures du corps noir émettant ces mêmes luminances. À quoi correspondent ces températures de brillance ?

Sur la figure 8, on observe que pour la bande spectrale située aux environs de 11 μm (sans absorption par les gaz), la température de brillance

Figure 5

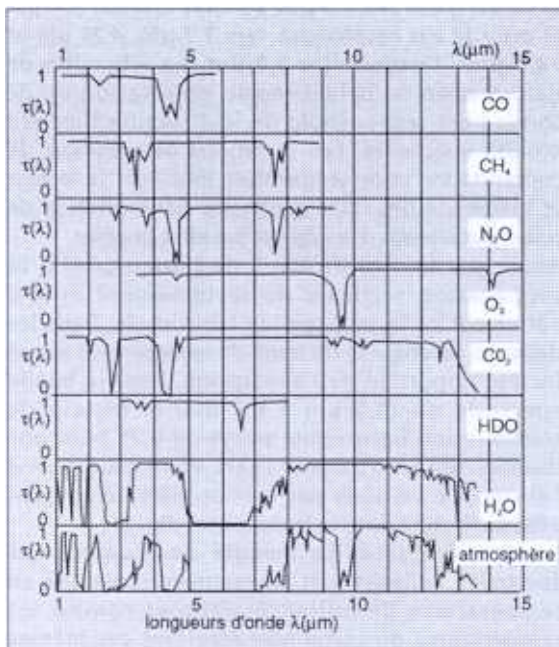


Spectre du rayonnement solaire et son absorption par les gaz atmosphériques.

8 % de l'énergie émise sont répartis dans le domaine des ultraviolets, 41 % dans le domaine visible (de 0,4 µm à 0,7 µm) et 57 % dans le domaine des infrarouges.

Source : d'après Duffie J. A. et Beckman W. A., *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, New York, 1980.

Figure 6



Facteur de transmission de l'atmosphère et contribution des principaux gaz absorbants en traversée verticale.

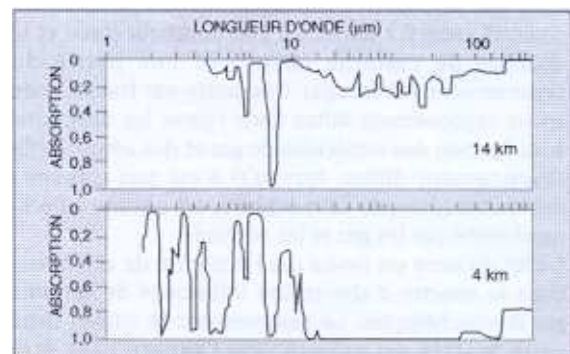
Source : d'après Caniou J., *Observation et mesurage par thermographie*, AFNOR, 1991.

est de 47 °C, ce qui correspond à la température du sol ; à 15 µm (absorption à 100 % par les gaz), la température de brillance est de -53 °C, ce qui correspond à la température du sommet de la troposphère (fig.8) ; et pour 9 µm la température varie entre 30 °C et 22 °C, température intermédiaire entre 47 °C et -53 °C. On utilise cette variation de la température mesurée dans la manip « Comprendre l'effet de serre », pour montrer au public que l'effet de serre est le piégeage du rayonnement infrarouge. Autrement dit, si l'on se trouve en dehors de l'atmosphère, on peut se poser la question : « Où est passé l'infrarouge ? » Cette interrogation doit être suivie par la question : « Quel est l'effet au niveau du sol de ce piégeage du rayonnement infrarouge ? »

Influence des gaz à effet de serre

Lorsqu'on considère le bilan des échanges du rayonnement solaire de courte longueur d'onde et du rayonnement infrarouge à travers l'atmosphère (voir manip « Bilan thermique du système surface de la terre-atmosphère »), on remarque que le rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre (390 W/m² pour une température de surface 15 °C) est presque le double de celui qui s'échappe effectivement de l'atmosphère (240 W/m², énergie émise par une surface à la température de -18 °C). Les nuages et les gaz absorbants retiennent ainsi plus de 40 % du rayonnement émis par le sol. En l'absence de nuages et de gaz à effet de serre et, en supposant que la planète conserve le même albédo, la température superficielle serait de -18 °C en moyenne au lieu des 15 °C actuels (fig. 9). La différence de 33 °C caractérise l'effet de serre. On dira aussi qu'il est égal à 150 W/m² (différence entre l'émission de 390 W/m² et les déperditions vers l'espace de 240 W/m²).

Figure 7

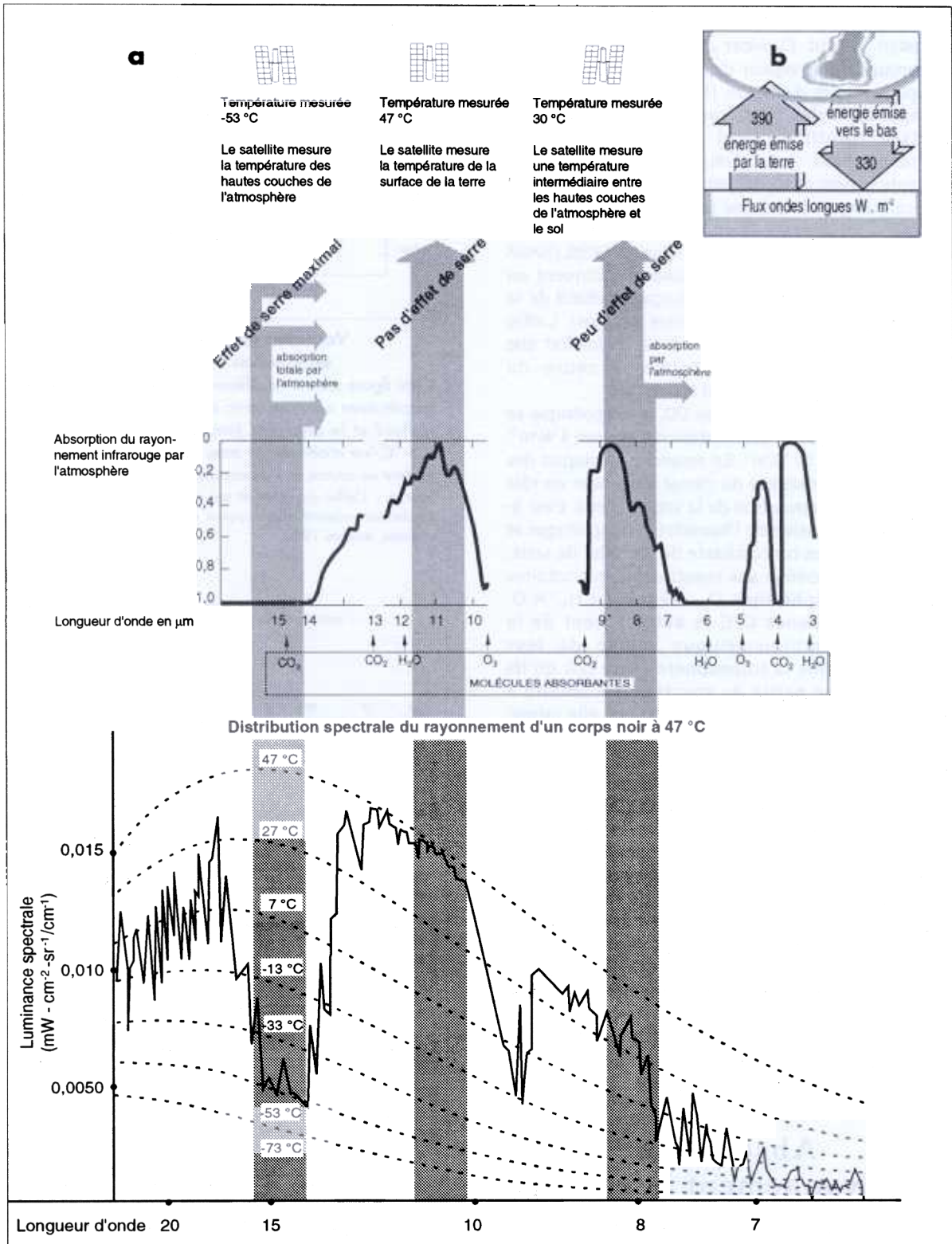


Le spectre d'absorption atmosphérique selon l'altitude.

Au-delà de 25 km, il n'y a pratiquement plus d'absorption.

Source : d'après Hamamatsu, *Characteristics and use of infrared detectors*, Technical information, SD-12, février 1989, p. 5.

Figure 8



Spectre de la terre observé par instrument Iris ou le satellite Nimbus 4 au-dessus d'une région du Sahara à midi.

a. L'effet de serre vu en dehors de l'atmosphère. b. L'effet de serre vu au niveau du sol.

Source : d'après Kandel R. et Fouquat Y., « Le bilan thermique de la Terre », *La Recherche*, n° 241, vol. 22, mars 1992.

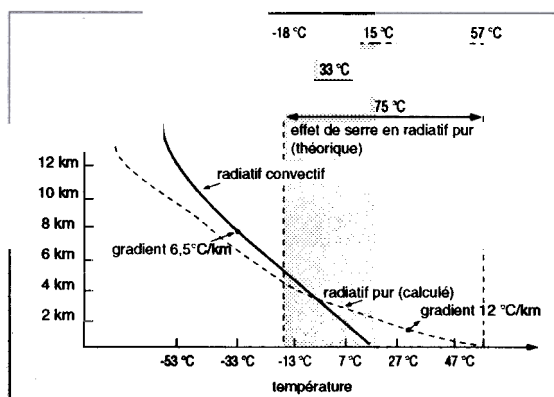
On peut caractériser quantitativement les flux infrarouges absorbés par les différents gaz atmosphériques en les évaluant par des calculs de transfert radiatif. Éliminer instantanément l'opacité infrarouge de la vapeur d'eau conduit à une perte supplémentaire d'environ 100 W/m^2 vers l'espace, compte tenu des températures (température de surface, profil vertical dans l'atmosphère) correspondant au climat actuel. Éliminer instantanément et séparément l'opacité infrarouge du gaz carbonique donne une perte d'environ 50 W/m^2 . Le calcul ne donne pas un résultat fiable pour les nuages, mais les résultats de la mission ERBE (NASA Earth Radiation Budget Experiment) indiquent un chiffre proche de 30 W/m^2 (le forçage radiatif de la nébulosité dans le domaine ondes longues). L'effet de serre total (environ 150 W/m^2) est moins fort que la somme de ces trois termes à cause du recouvrement des domaines d'absorption.

Le doublement des teneurs en CO_2 atmosphérique se traduit par une faible augmentation d'environ 4 W/m^2 , par rapport aux 50 W/m^2 . En revanche, la plupart des calculs de la sensibilité du climat font jouer un rôle important à la rétroaction de la vapeur d'eau, c'est-à-dire à l'augmentation de l'humidité atmosphérique et à l'intensification concomitante de son effet de serre. L'importance donnée aux constituants minoritaires (ozone troposphérique O_3 , méthane CH_4 , N_2O , chlorofluocarbonés CFC et autres) vient de la croissance anthropogénique rapide de leur abondance dans la troposphère et du fait qu'ils absorbent une partie du spectre (la « fenêtre » atmosphérique entre $8 \mu\text{m}$ et $13 \mu\text{m}$) qui, elle-même, n'est pas absorbée par la vapeur d'eau et le gaz carbonique. Par conséquent, chaque molécule ajoutée à l'atmosphère peut être des milliers de fois plus efficace qu'une molécule de CO_2 ajoutée dans l'intensification de l'effet de serre. L'influence des gaz à effet de serre se fait aussi sentir dans la stratosphère : le profil de température y est déterminé par l'équilibre entre l'absorption de rayonnement ultraviolet solaire par l'ozone et l'émission vers l'espace dans l'infrarouge (surtout dans la bande à $15 \mu\text{m}$ du CO_2). L'augmentation du CO_2 conduit à une augmentation du taux de refroidissement radiatif et donc à une baisse des températures stratosphériques, ce qui modifie les taux des multiples réactions photochimiques qui gouvernent en particulier la présence d'ozone dans la stratosphère.

Absorption du rayonnement infrarouge par les matériaux

Lorsqu'un milieu reçoit un rayonnement, l'intensité absorbée est proportionnelle à l'intensité incidente et dépend de l'épaisseur de la matière traversée et du coefficient d'absorption du milieu.

Figure 9

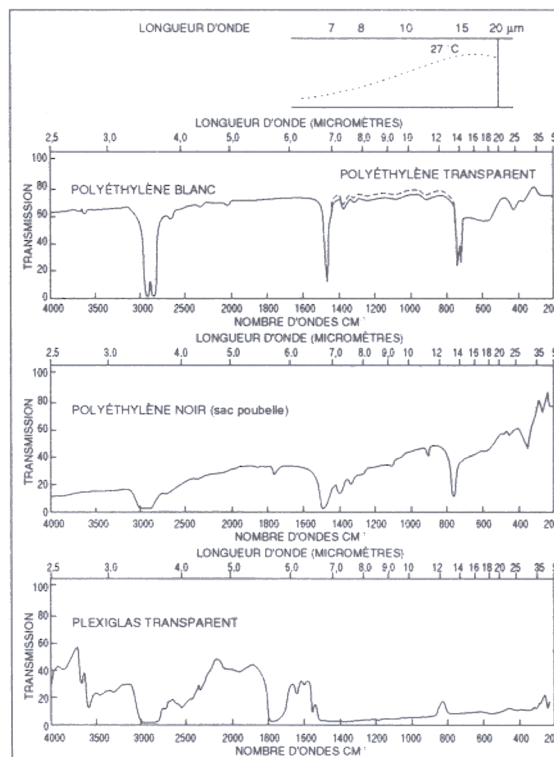


Variation de la température en fonction de l'altitude.

Cette figure montre la différence entre des variations de températures obtenues avec des échanges combinant le radiatif et le convectif (atmosphère réelle variation $6,5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ d'altitude) et avec ceux qui, par calcul, ne mettent en œuvre que du rayonnement ($12 \text{ }^\circ\text{C/km}$).

Source : L'effet de serre et ses conséquences climatiques. Évaluation scientifique, rapport n° 25 de l'Académie des sciences, octobre 1990.

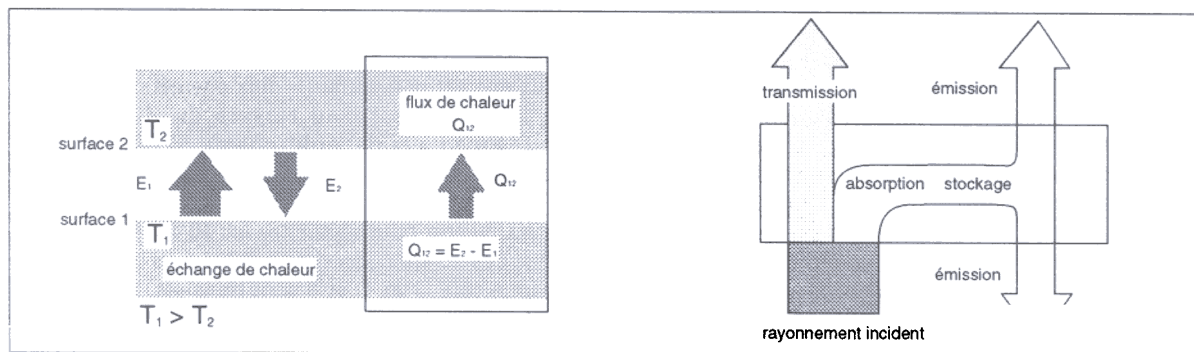
Figure 10



Distribution spectrale du rayonnement d'un corps noir à $27 \text{ }^\circ\text{C}$ et spectre de transmission pour le polyéthylène blanc, le polyéthylène noir et le plexiglas transparent.

Source : d'après le Laboratoire de physique des solides, CNRS, Meudon.

Figure 11



Échange de chaleur par rayonnement entre deux plaques parallèles.

La surface «noire» 1 émet $Q_1 = \sigma T_1^4$, la surface 2 émet $Q_2 = \sigma T_2^4$. Elles échangent entre elles $Q_{12} = s (T_2^4 - T_1^4)$ et flux d'énergie dans une plaque absorbant partiellement l'infrarouge, à l'équilibre $Q_{inc} = Q_{trans} + Q_{emis}$. Si la plaque est à la même température, l'émission est la même de chaque côté.

Le spectre d'absorption varie en fonction des matériaux. La plupart des verres coupent les grandes longueurs d'onde au-delà de $2,7 \mu\text{m}$.

Certaines matières plastiques comme le polyéthylène possèdent des propriétés intéressantes (fig. 10) que nous utilisons dans les manips pour simuler l'effet de serre de l'atmosphère, notamment en mesurant la température de la main. La surface de la peau, dont la température est de l'ordre de 30°C , émet un rayonnement infrarouge dont le spectre s'étend entre $4,7 \mu\text{m}$ et $76 \mu\text{m}$ avec $\lambda_{\text{max}} = 9,5 \mu\text{m}$. Dans cette plage, le polyéthylène blanc (sac d'emballage pour les fruits), le polyéthylène noir (sac poubelle), le plexiglas transparent possèdent successivement un facteur de transmission de l'ordre de 70 %, 35 %, 10 %. Notons que la transmission des infrarouges ne dépend pas de la couleur des matériaux contrairement à la transmission visible. Avec ces matériaux bon marché, nous pouvons construire un dispositif montrant l'effet de serre dans trois conditions : pas d'effet de serre, peu d'effet de serre, effet de serre maximal.

Modélisation graphique des échanges de chaleur entre les plaques déterminant l'effet de serre

L'objectif de cette modélisation est d'amener le public à comprendre la spécificité des échanges de chaleur par rayonnement infrarouge et, notamment, de bien faire la différence avec les expériences quotidiennes réalisées avec le rayonnement visible. Notre approche du rayonnement visible est guidé par le fait que l'on peut distinguer explicitement les fonctions d'émission et d'absorption du rayonnement dans les situations de la vie courante. Par exemple, si

l'on met un écran suffisamment opaque entre une lampe et nos yeux, alors on ne voit plus la lampe. L'écran est une notion couramment admise et utilisée dans la vie quotidienne. Dans le cas du rayonnement visible, un écran « émet » du rayonnement visible, mais celui-ci est tout à fait négligeable lorsque la température de l'objet est inférieure à 800 ou $1\,000^\circ\text{C}$. Le cas d'un rayonnement infrarouge est extrêmement différent : le récepteur est lui-même un émetteur et le rayonnement IR dépend de l'ensemble des interactions des différentes parties du système. Par exemple, si l'on place un écran totalement opaque aux IR devant une source IR, à l'équilibre thermique, cet écran atteindra une température telle qu'il réémettra autant d'énergie qu'il en reçoit.

Pour étudier et comprendre l'effet de serre - les échanges du rayonnement infrarouge entre le sol et l'espace, au travers de l'atmosphère - nous utiliserons des modèles simplifiés dans lesquels les échanges IR s'effectuent entre une surface et « l'ambiance » (air et mur environnant), au travers de plaques. Par analogie, nous continuerons à parler d'effet de serre.

Principe de la modélisation des échanges infrarouges

Pour modéliser les échanges radiatifs, nous nous sommes fondés sur une configuration très simple (fig. 11) : deux plaques parallèles de températures T_1 et T_2 et de dimensions infinies se font face. Lorsque les deux plaques sont «noires» (pas de rayonnement réfléchi), le rayonnement émis par chacune des plaques est totalement absorbé par l'autre et la puissance échangée par unité de surface s'écrit $Q_{12} = \sigma(T_2^4 - T_1^4)$, avec σ = constante de Stefan.

Lorsque les deux plaques ne sont pas parfaitement absorbantes, on introduit un facteur F dépendant de l'émissivité des deux plaques et la puissance échangée se met sous la forme :

$$Q_{12} = F \sigma (T_2^4 - T_1^4) \text{ avec : } 0 < F < 1.$$

Situation de référence, cas 1, **fig. 12** : la première configuration étudiée est celle d'une surface S chauffée par une résistance électrique d'une puissance de 100 W/m². Cette surface est parfaitement isolée sur l'une de ses faces, l'autre échangeant du rayonnement IR avec un volume d'air infini lui faisant face, de température T_{air} (on néglige les échanges par conduction et convection). On assimile le « volume d'air infini » à une plaque noire de température T_{air}. À l'équilibre thermique, le flux d'énergie reçu par la surface S (fourni par la résistance électrique) est égal à celui qui est perdu par rayonnement IR ; en désignant par T₀ la température de S dans cette situation, on obtient : $\sigma(T_0^4 - T_{air}^4) = 100 \text{ W/m}^2$. relation qui permet de calculer T₀ en fonction de T_{air}.

Modélisation d'un effet de serre dit à « 100 % »

Cas 2, **fig. 13** : lorsqu'on met une plaque opaque à 100 % aux infrarouges devant la surface S, on obtient exactement le même type de phénomène, mais plus complexe à décrire. Le rayonnement de 100 W/m² émis par S est absorbé par la plaque 1 qui va se réchauffer et réémettre l'énergie reçue de chaque côté en proportion 50/50. La surface S reçoit une énergie de 150 = 100 (chauffage) + 50 (émis par 1). Cette énergie est supérieure à celle échangée de 100. Donc la température de la surface S va augmenter pour réémettre les 50. Ces 50 sont absorbés par 1 qui va réémettre de chaque côté (25 = 25). S reçoit 175, sa température va continuer à augmenter pour réémettre 25 et ainsi de suite. En fin de compte S a reçu 200 = 100 + 50 + 25 + 12.5 + 6.2 + 3.1 + 1.6 + 0.8 + 0.4 + 0.2 + 0.1... La plaque 1 a reçu 200 et elle émet 100 de chaque côté. Le bilan des échanges entre la plaque S et 1 est donc de 100 W/m² (on dira que le flux énergétique net est de 100 W/m²). Par rapport au cas 1, on constate que la température T₁ (cas 2) est égal à T₀. T₁ peut être évaluée par la relation : $100 = \sigma(T_0^4 - T_1^4)$.

À l'équilibre thermique les températures de S et 1 sont constantes, le flux 100 (flux énergétique entrant = flux énergétique sortant) passe au travers du dispositif et correspond aux déperditions de S, puis de 1.

Cas 3, **fig. 14** : à l'équilibre, le flux thermique dans le dispositif est toujours égal à 100. On constate que le nombre de boucles de piégeage augmente fortement, suite au rayonnement émis par la plaque 2. Par exemple, les 100 émis par S sont décomposés par 1 en 50 et 50, les 50 absorbés par 2 sont émis vers 1 et l'atmosphère (valeur : 25). 1 émet à son tour 12,5 vers S. Les 67 reçus par S sont réémis.

Modélisation d'un effet de serre dit à « 20 % »

Cas 2, **fig. 15** : on a mis une plaque partiellement transparente (80 %) aux infrarouges à quelques centimètres de la surface S. Sur un rayonnement

d'une valeur de 100 émis par S, 20 sont absorbés par la plaque (1) qui va se réchauffer et réémettre l'énergie reçue : 10 de chaque côté. À l'équilibre thermique, la température de S et 1 est constante (flux énergétique entrant = flux énergétique sortant), le flux 100 passe au travers du dispositif et correspond aux déperditions de S, puis de 1. La surface S reçoit une énergie de : 110 = 100 (chauffage) + 10 (émis par 1). Donc, la température de la surface S va augmenter pour réémettre les 10 qu'elle reçoit en plus. Ces 10 sont absorbés par 1 qui va réémettre de chaque côté (1 et 1) et 8 sont transmis. S reçoit 111, sa température va continuer à augmenter pour réémettre 1. En fin de compte S a reçu 100 + 10 + 1 + 0,1... = 111,1. La plaque 1 a absorbé 22 et elle émet 11 côté air et 11 côté S.

Cas 3, **fig. 16** : le flux thermique reçu par S est de 123.

Thermographie infrarouge

La mesure de la température de la surface d'un corps opaque dans la bande spectrale du pyromètre nécessite que l'on prête attention aux influences de l'environnement, de l'atmosphère, du hublot de protection du corps sur le flux thermique venant du corps et capté par l'instrument de mesure.

Pour expliquer la mesure de température à partir du rayonnement nous posons les hypothèses simplificatrices :

- l'émissivité du corps est constante sur la bande spectrale de l'appareil de mesure (corps gris) ;
- le corps est vu selon un angle solide par l'instrument de mesure supérieur à celui qui lui est spécifique (ce qui évite d'intégrer l'énergie émise par le support du corps par exemple) ;
- le milieu de propagation (atmosphère, hublot) entre le corps et le pyromètre est homogène, il n'y a pas de diffusion par des corps en suspension et sa température est constante ;
- il existe peu de rayonnement parasite.

Quels sont les flux qui sont mesurés par le thermomètre, et quelle est la température du corps effectivement mesurée ? D'après la figure 17, le corps à la température T₀ émet un rayonnement $\epsilon_c E_c$, avec ϵ_c émissivité du corps.

Le hublot représentant l'atmosphère transmet $\tau(h) E_c$ et il émet $\epsilon(h) E(h)$. L'instrument de mesure reçoit $E = \epsilon(h) E_c + \tau(h) E_c$, et comme $\epsilon(h) + \tau(h) = 1$ d'après la loi de Kirchoff (par hypothèse, la réflexion de l'atmosphère est négligée).

$$E = \tau(h) E_c + (1 - \tau(h)) \cdot E(h).$$

Autrement dit, si T₀ = 30 °C, $\tau(h) = 0,8$;

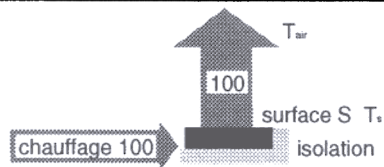
$E = 0,8 E_c + (0,2) E(h)$ et comme $E(h) < E_c$, la température lue par l'instrument est comprise entre T₀ et T_h.

Les extrêmes correspondent à :

$$\text{si } \tau(h) = 0, E = 0 E_c + E(h) = E(h)$$

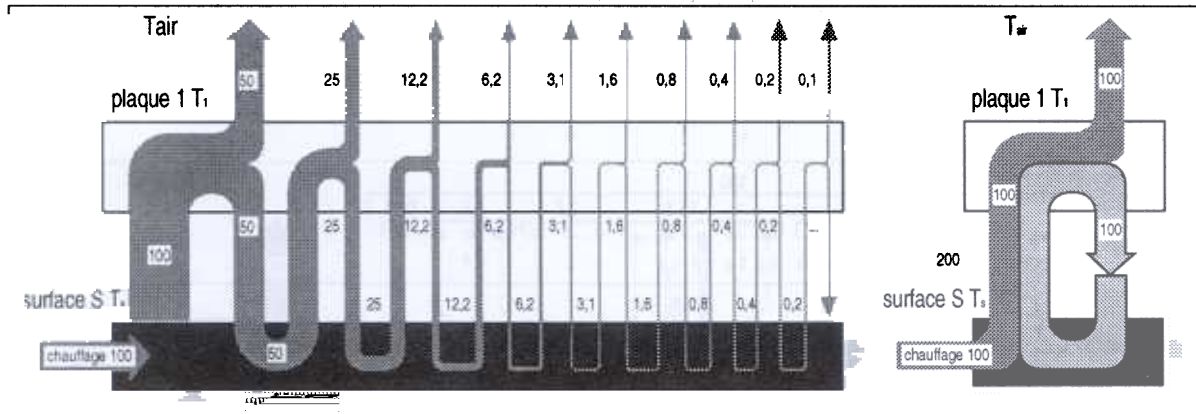
$$\text{si } \tau(h) = 1, E = E_c + 0 = E_c.$$

Figure 12



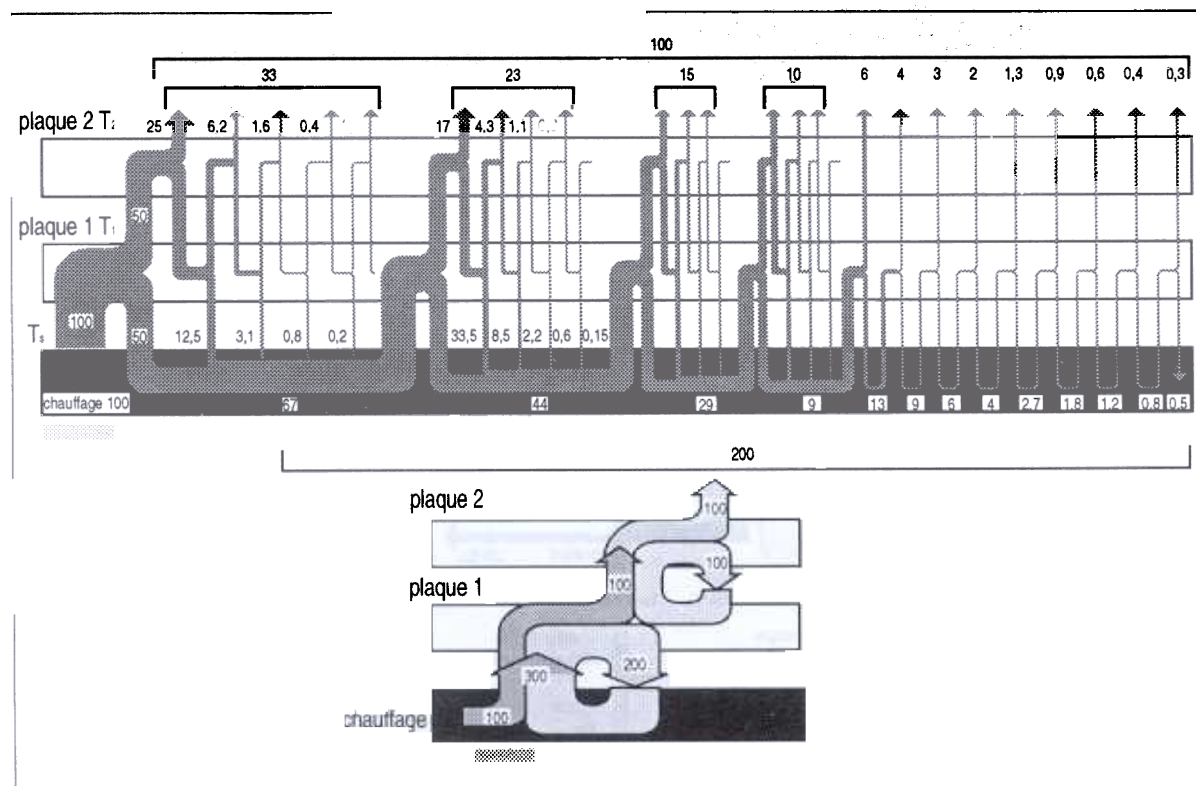
Effet de serre 100 %, cas 1, situation de référence.

Figure 13



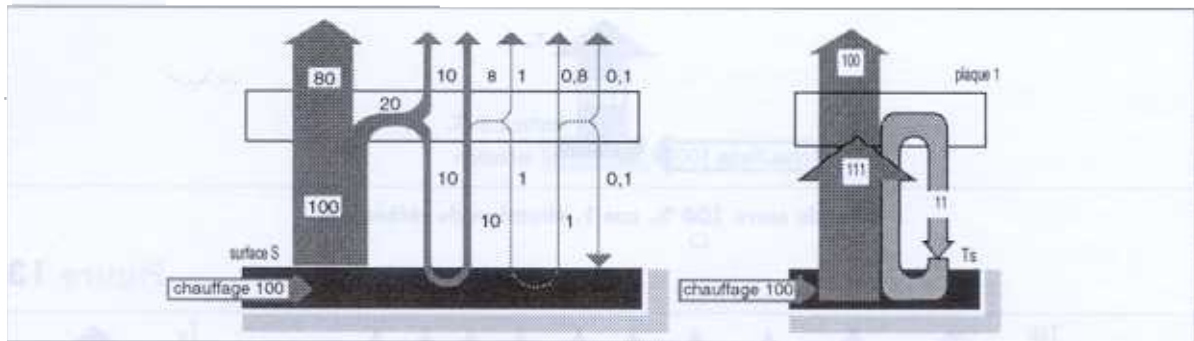
Effet de serre 100 %, cas 2. La surface S est recouverte d'une plaque opaque aux infrarouges. Le schéma illustre le phénomène de piégeage du rayonnement infrarouge émis par S.

Figure 14



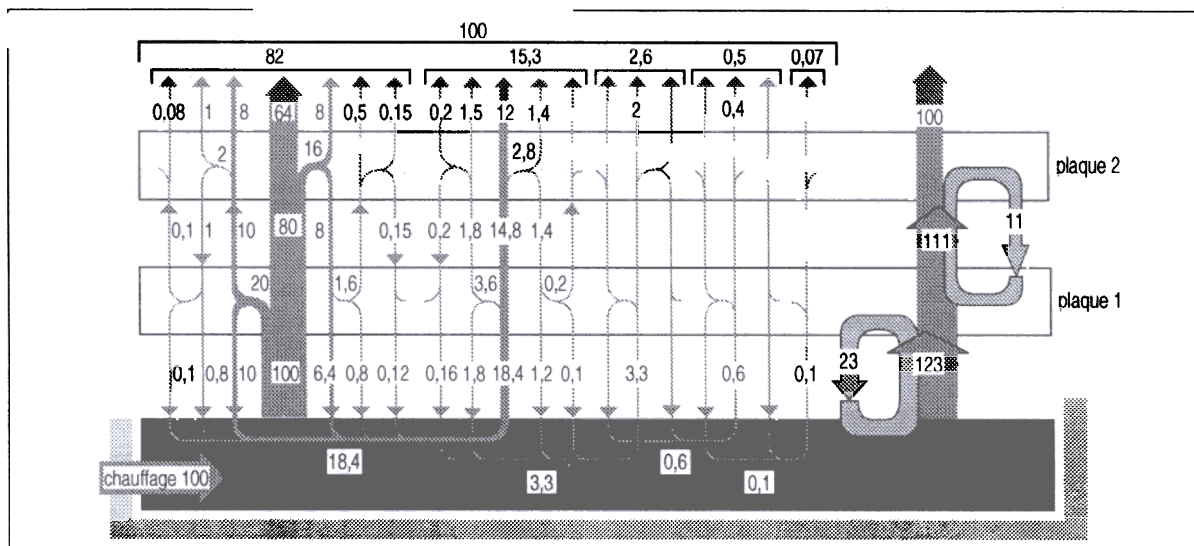
Effet de serre 100 %, cas 3.

Figure 15



Effet de serre 20 %, cas 2.

Figure 16



Effet de serre 20 %, cas 3.

Figure 17

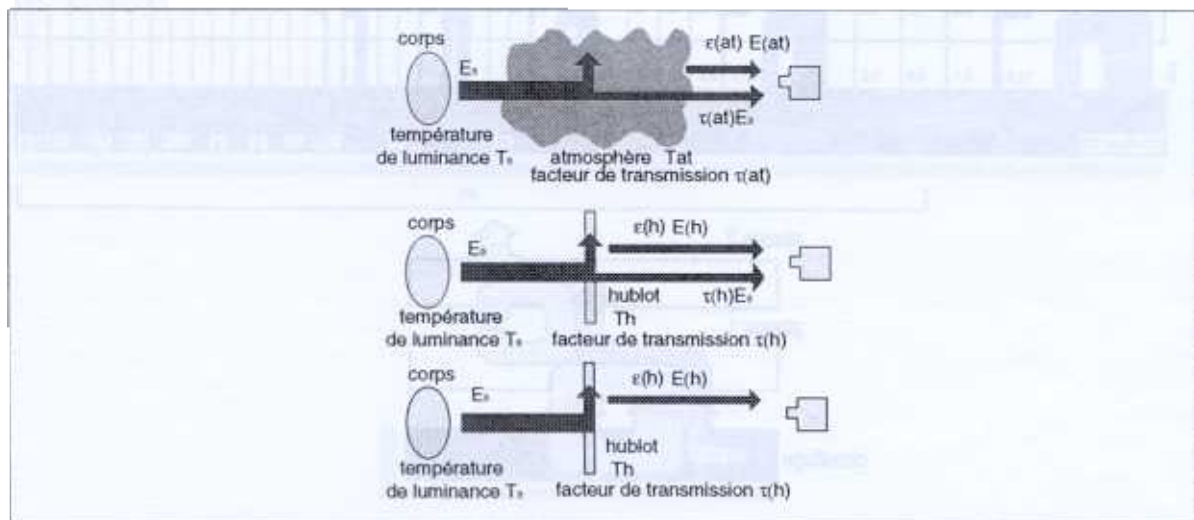


Schéma des flux énergétiques captés par le thermomètre radiométrique.

2. Description des manipulations

Figure 18



Le public devant la manipulation.

La conception de ces deux manipulations a été longue. Il a fallu faire une étude épistémologique de certaines connaissances du rayonnement infrarouge et de l'effet de serre. Cette démarche nous a conduit à élaborer de nombreuses solutions que nous avons testées auprès du personnel, écartant celles qui ne suscitaient pas une compréhension satisfaisante.

Les idées forces de la conception des manipulations

Dans le grand public l'une des erreurs attachées à la conception scientifique de l'effet de serre est de croire que le soleil chauffe l'atmosphère. Nous voulions éviter de présenter un dispositif du type serre où la lumière chauffe une plaque noircie à travers une plaque transparente (verre, ...). Car cette représentation métaphorique des phénomènes thermiques dans l'atmosphère, ne permet pas, à notre avis, de comprendre l'effet de serre atmosphérique. Nous avons préféré utiliser l'analogie matériaux-atmosphère pour montrer l'absorption du rayonnement infrarouge et le réchauffement qui en résulte. Nous avons cherché à situer le visiteur à l'extérieur du système surface de la terre-atmosphère pour l'amener à voir la terre en fonction de l'absorption du rayonnement infrarouge de

l'atmosphère. Un observateur satellitaire dont « l'œil » est sensible au rayonnement compris dans la fenêtre de $8\ \mu\text{m}$ à $13\ \mu\text{m}$ voit la surface de la terre parce que l'absorption est faible. En revanche, s'il est sensible à la bande spectrale de $14\ \mu\text{m}$ à $18\ \mu\text{m}$ où l'absorption est forte, l'observateur ne « voit » plus la surface de la terre mais le sommet de la troposphère. Pour illustrer ce phénomène, il aurait fallu aborder la notion de longueur d'onde, ce qui était à exclure dans une logique grand public.

Pour simplifier, nous préférons diviser l'effet de serre en trois catégories pour le caractériser globalement : pas d'effet de serre, peu d'effet de serre, effet de serre maximal. En masquant volontairement une partie des informations pour susciter chez le visiteur une réponse erronée conforme à l'opinion générale, nous souhaitons provoquer sa surprise pour l'impliquer davantage, en présentant des résultats expérimentaux en opposition avec les idées reçues.

Comprendre l'effet de serre : l'absorption du rayonnement infrarouge

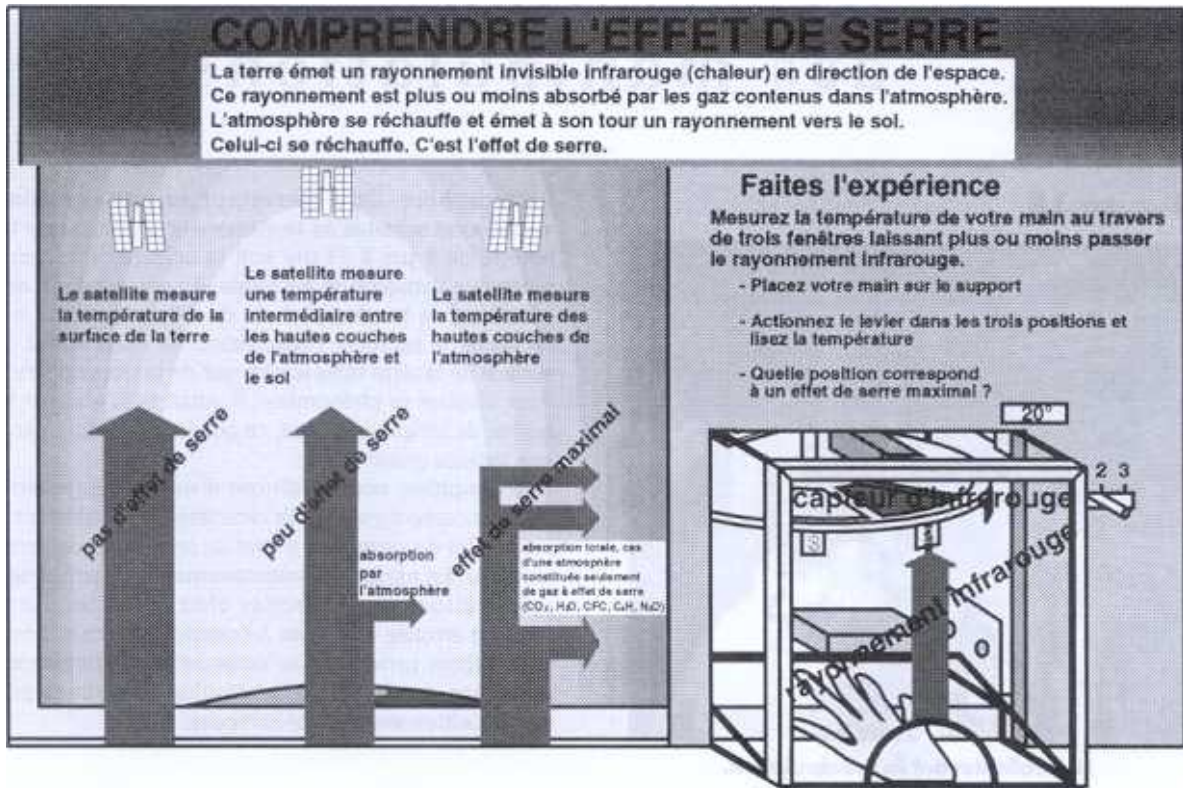
Ce dispositif montre que l'effet de serre est produit par l'absorption du rayonnement terrestre par l'atmosphère. Le public, en manœuvrant un levier, voit que la température mesurée de sa main varie en fonction de la nature du matériau entre celle-ci et le thermomètre sans contact (ou infrarouge).

La manipulation présente deux aspects :

- une maquette montre la température de la terre mesurée par un satellite à travers trois atmosphères : pas d'effet de serre, peu d'effet de serre, effet de serre maximal. Cette partie du panneau se rapporte au spectre du rayonnement émis par le système terre-atmosphère (voir fig. 8). On constate sur cette figure que le flux infrarouge mesuré dans la bande d'absorption centrée sur $15\ \mu\text{m}$ correspond au rayonnement émis par un corps noir à $-53\ ^\circ\text{C}$ (température égale à celle mesurée au sommet de la troposphère), alors que dans la fenêtre de 8 à $13\ \mu\text{m}$ le rayonnement mesuré correspond à la température du sol (ici $47\ ^\circ\text{C}$: il s'agit du Sahara à midi). Pour les autres bandes, on trouve des températures intermédiaires.

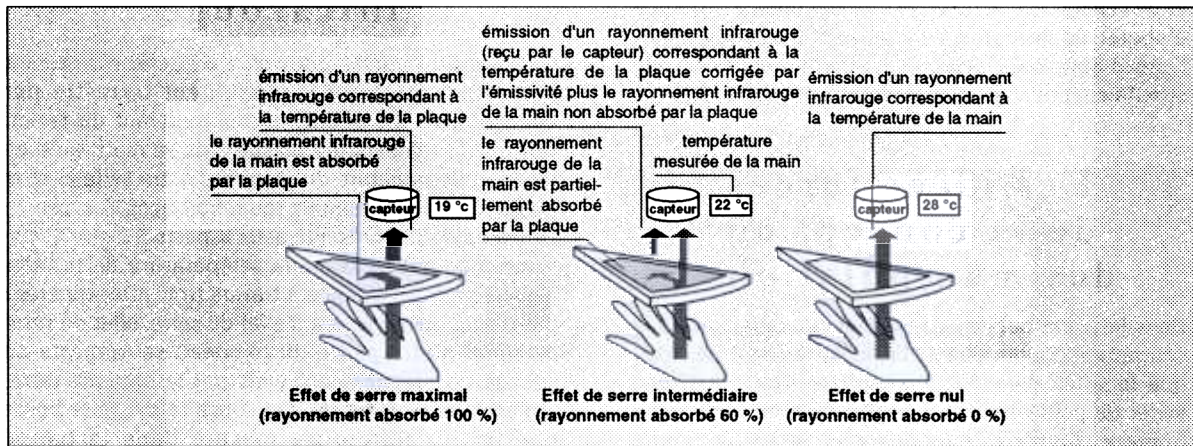
- Trois mesures de la température de la main sont obtenues à partir du flux infrarouge émis par celle-ci et transmis à travers trois fenêtres dont une est

Figure 19



« L'absorption du rayonnement infrarouge. »

Figure 20



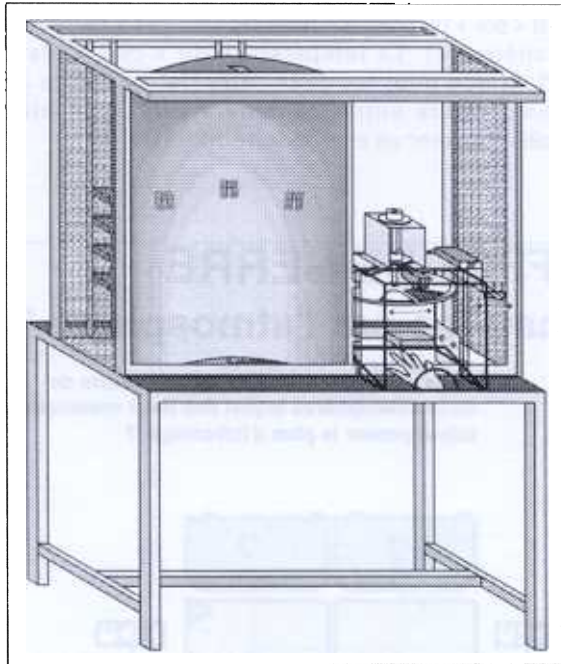
Pyromètre.

La mesure de température d'un corps au travers d'une atmosphère plus ou moins absorbante de rayonnement est captée par un pyromètre.

fermée par de l'altuglas, une autre par un morceau de sac poubelle et la troisième est sans écran. L'angle de visée du capteur infrarouge (20 °C) définit la distance de la main au capteur. Elle ne doit pas être trop grande si l'on veut éviter de devoir tenir compte de l'environnement. Le thermomètre infrarouge mesure le flux énergétique reçu et, après calcul, donne la

température correspondante. Le capteur est branché sur une alimentation qui convertit le signal en grandeur électrique linéaire (de 0 V à 5 V). La visualisation se fait par un voltmètre digital. Le public est invité à rechercher, en mesurant la température apparente de sa main, quel matériau absorbe le plus grand rayonnement IR.

Figure 21

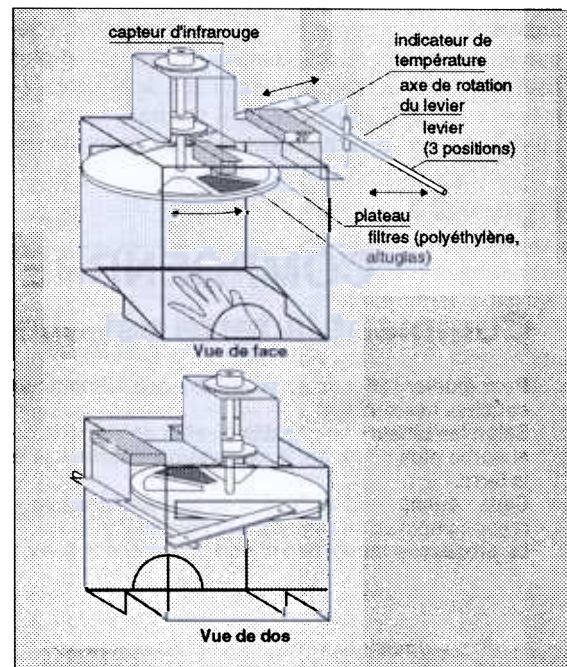


Architecture de la manip « L'absorption du rayonnement infrarouge ».

Comprendre l'effet de serre : comment la terre est-elle réchauffée par l'atmosphère ?

Cette manipulation met en évidence l'effet de l'absorption du rayonnement infrarouge sur la température de la surface de la terre. Notre démarche a consisté à créer un dispositif qui met en scène la différence de température de deux plaques chauffées avec deux lampes de même puissance. L'écart de température est produit par un triple vitrage réalisé avec des matériaux transparents possédant des spectres d'absorption différents. Cette expérience permet de demander au visiteur, en prenant soin de masquer les températures, laquelle des deux plaques est la plus chaude. Le public ne doit pas supposer que la différence de température est produite par les différences d'absorption du rayonnement visible par les différents matériaux utilisés, c'est pourquoi le chauffage de la plaque se fait par sa face inférieure (fig. 26). Les températures des plaques transparentes (altuglas à droite, fines feuilles de polyéthylène à gauche) et de la plaque en cuivre noircie sont mesurées avec des thermomètres à sonde de contact de type K et des boîtiers à affichage numérique. La solution que nous avons choisie (fig. 24) s'inscrit

Figure 22



Dispositif de la manipulation « L'absorption du rayonnement infrarouge ».

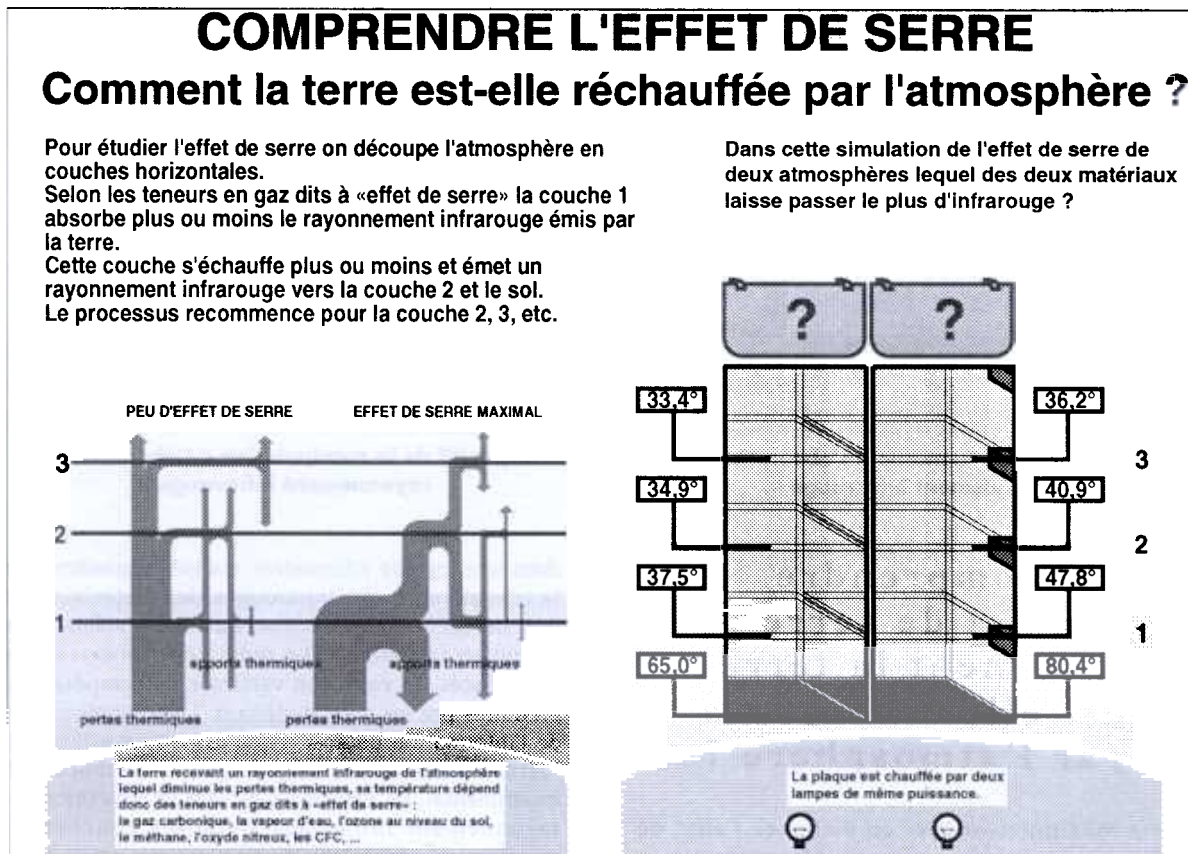
dans une logique informative, malgré la question sur la transparence aux infrarouges des matériaux qui doit inciter le visiteur à manœuvrer les volets pour découvrir la réponse. Le public doit observer les différences de variation verticale de température produites par les deux matériaux. La compréhension de l'information nécessite que le visiteur articule la lecture du panneau de gauche avec le dispositif expérimental. Le graphisme montre la répartition du rayonnement infrarouge selon les couches, il solutionne le problème de savoir comment la terre est réchauffée par l'atmosphère.

Afin de réduire les échanges de chaleur entre les plaques horizontales et les surfaces verticales, il faut que la hauteur entre les plaques soit de l'ordre de 3 cm (ce qui limite les échanges par conduction) et que les surfaces soient les plus grandes. Les échanges se font par rayonnement selon l'angle solide α , c'est-à-dire l'angle par lequel une surface voit l'autre. Plus l'angle est grand, plus les échanges sont importants. Une amélioration (fig. 28) consiste à introduire un autre dialogue sur le dispositif expérimental à partir de la question : « Deux plaques sont chauffées par deux résistances identiques, elles sont recouvertes à gauche par du polyéthylène qui laisse passer le rayonnement infrarouge et à droite par de l'altuglas qui l'absorbe, laquelle est la plus chaude ? Choisissez la plaque : droite, gauche, aucune. » Quand le visiteur appuie sur un des trois boutons, des volets se soulèvent, lui révélant les températures, ainsi qu'un texte de conclusion

présentant les propriétés des deux matériaux. À l'image, il est apparu qu'une information importante est absente de cette manipulation. Pour que le raisonnement soit complet, il faut que le plus haut des trois écrans voit, pour les deux côtés, le même « œil ». C'est-à-dire qu'il faudrait mettre un quatrième écran totalement opaque (une plaque

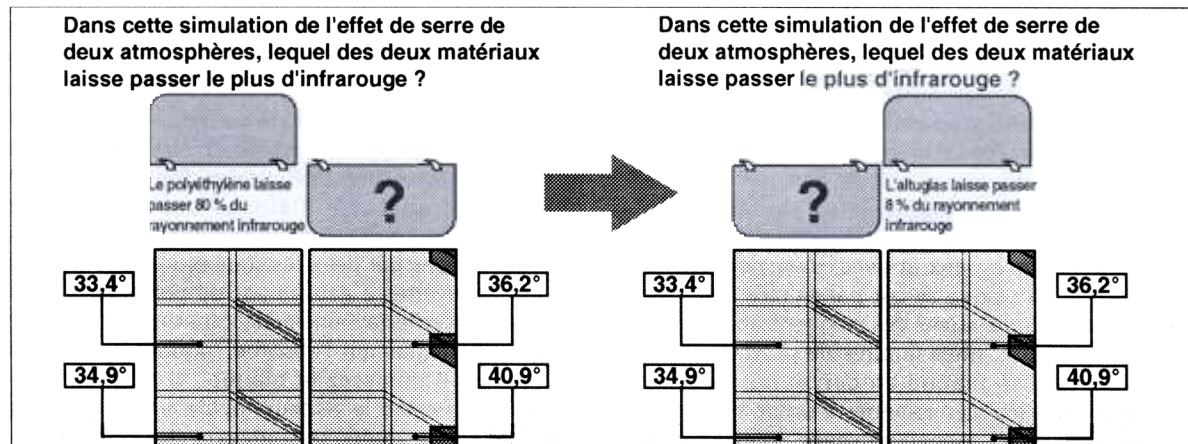
métallique par exemple), avec son thermomètre. On verrait ainsi la variation régulière de la température du « sol » (la plaque inférieure) au « ciel » (la plaque supérieure). La température du « ciel » étant identique pour les deux côtés, la différence de température entre les deux « sols » est bien cohérente avec un effet de serre différent.

Figure 23



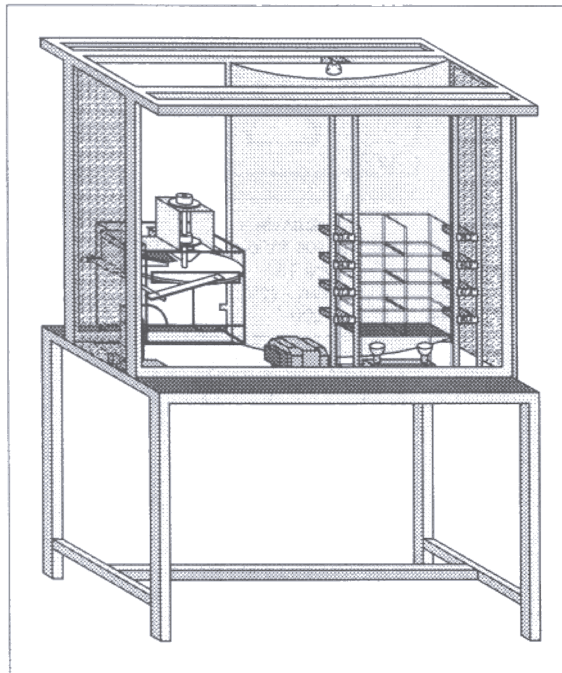
Panneau avec la simulation de deux effets de serre.

Figure 24



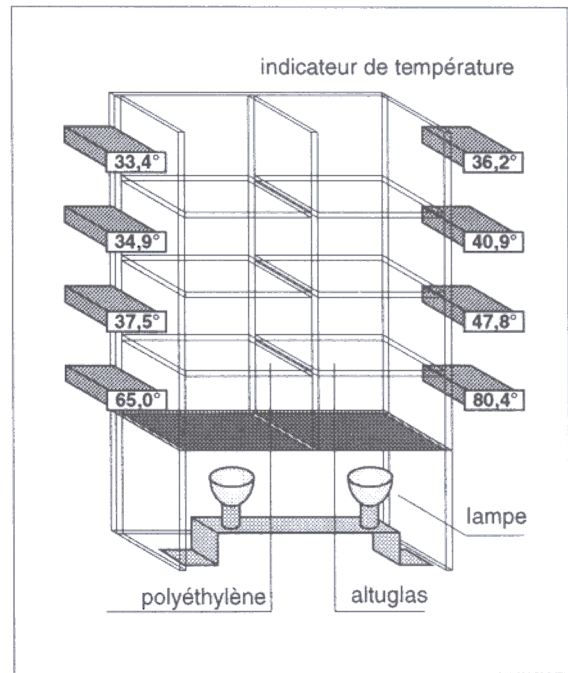
Questions sur les matériaux.

Figure 25



Architecture de la manipulation.

Figure 26



Solution adoptée.

Figure 27

Faites l'expérience

les deux plaques chauffées par deux lampes identiques. Celle de gauche est recouverte d'un matériau qui laisse passer l'infrarouge et celle de droite d'un matériau qui l'absorbe

Laquelle est la plus chaude ?

Choisissez la plaque

gauche
 droite
 aucune

Faites l'expérience

les deux plaques chauffées par deux lampes identiques. Celle de gauche est recouverte d'un matériau qui laisse passer l'infrarouge et celle de droite d'un matériau qui l'absorbe

Laquelle est la plus chaude ?

Choisissez la plaque

gauche
 aucune

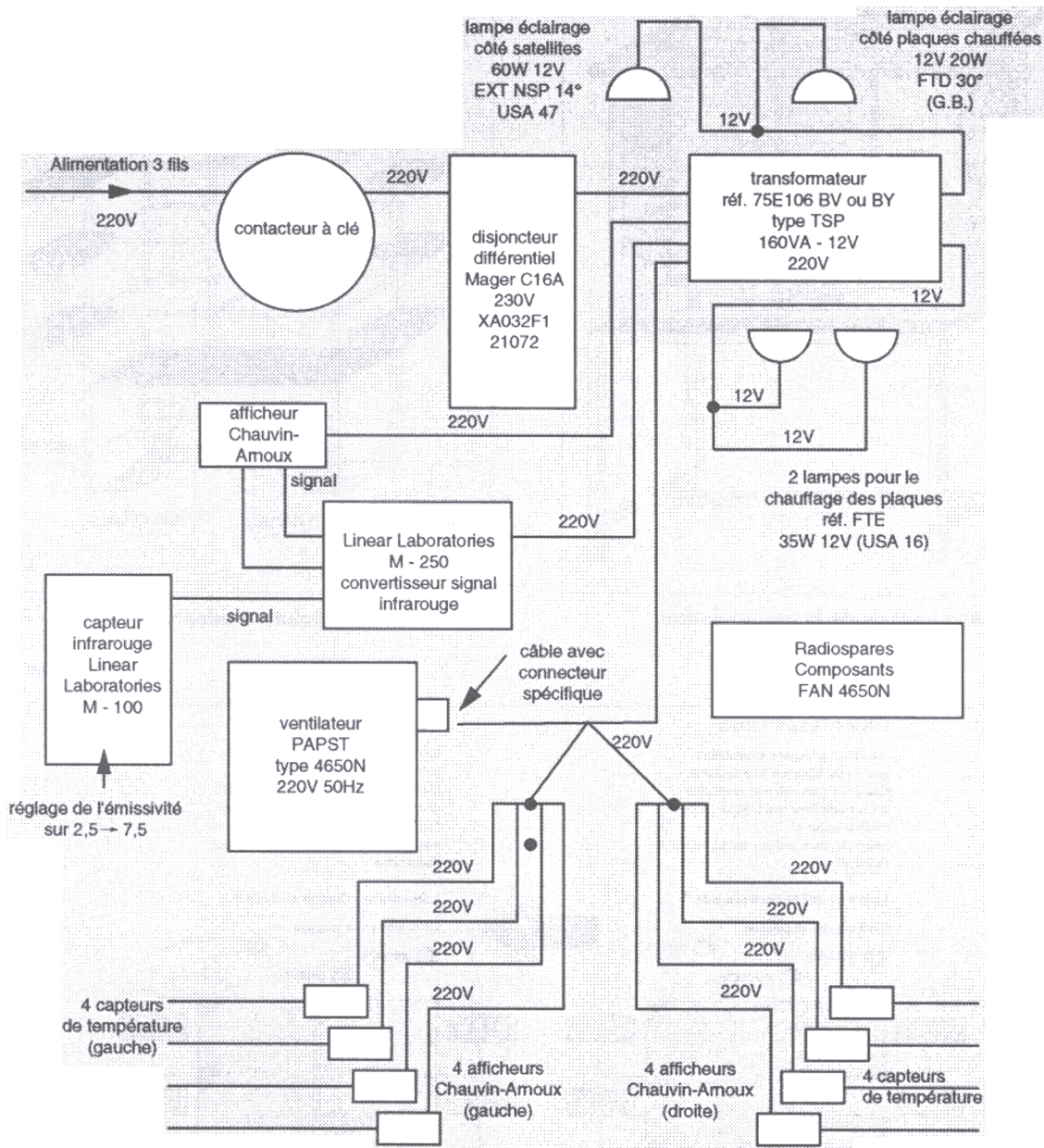
La plaque est chauffée par deux lampes de même puissance.

pourquoi : ?

La plaque est chauffée par deux lampes de même puissance.

pourquoi : Le polyéthylène laisse passer 80 % du rayonnement infrarouge L'altuglas laisse passer 8 % du rayonnement infrarouge

Variante.



Nomenclature des composants et schéma électrique des deux manipulations « Effet de serre ».

3. Exploitation pédagogique

Pour la première manipulation, on part de l'hypothèse que le transfert de chaleur par rayonnement infrarouge est induit par le fait que l'on mesure la température de la main à distance. Cela suppose que le public s'interroge sur la spécificité du thermomètre radiatif par rapport au thermomètre d'ambiance ou de contact. Pour susciter cette interprétation, on peut adjoindre à cette manipulation un panneau qui mette en lumière les expériences de Herschell sur le rayonnement.

Le travail muséologique ou pédagogique sur l'effet de serre doit centrer sa réflexion sur l'interprétation du public de ce qui est montré et nous amener à réfléchir sur la dimension historique de l'évolution des conceptions tant sur le rayonnement infrarouge que sur l'effet de serre atmosphérique.

Historique de la recherche expérimentale sur l'infrarouge

- En 1668, Newton montre que la lumière solaire décomposée par le prisme, s'étale en un spectre coloré allant du rouge au violet.
- En 1800, Herschell explore le spectre solaire étalé par un prisme, au moyen d'un thermomètre. Dans la région invisible prolongeant le spectre au-delà du rouge, un thermomètre sensible indique une élévation de température avec des maxima et des minima, selon la région explorée. Un rayonnement infrarouge est donc capable de produire des effets thermiques.
- Dès 1804, Leslie précise que le verre est absorbant et qu'il faut adopter des optiques en matière (sel gemme, soufre, fluorine) « perméable » aux « rayons obscurs » des « sources calorifiques » pour des études dans l'infrarouge. Le thermomètre ordinaire s'avère trop peu sensible pour la mesure des rayonnements. Le thermomètre à air de Leslie est formé de deux ampoules de verre réunies par un mince tube en v contenant un liquide coloré et donnant les différences de niveau. L'une des ampoules est noircie pour absorber les radiations et placée au foyer d'un miroir. L'autre est protégée des radiations par un écran. De nouveaux appareils plus adéquats apparaissent. Melloni utilise une pile thermo-électrique améliorée par Rubens (1898).
- En 1830, Nobili applique aux recherches sur l'infrarouge son thermomultiplicateur qui reste employé jusqu'à la découverte du bolomètre.

- En 1839, on utilise un écran absorbant séparant les rayons visibles les plus lumineux de l'infrarouge, ce qui permet de voir le proche infrarouge.

- En 1842, Becquerel établit le rôle activateur de l'infrarouge sur la phosphorescence et les bases de la phosphorographie. Il reconnaît le spectre jusqu'à 13 μm avec un écran en sulfure de zinc activé.

- En 1847, Fizeau et Foucault observent des franges d'interférences et étalonnent en longueurs d'onde le spectre d'un prisme jusqu'à 14,45 μm .

- En 1880, Dessains détermine avec Pierre Curie la dispersion d'un prisme de sel gemme jusqu'à 70 μm et établit une technique qui servira aux étalonnages de prisme jusqu'à 23 μm .

- En 1881, Langley présente un instrument de mesure du rayonnement infrarouge de grande précision : le bolomètre. Il détermine la dispersion du flint jusqu'à 27 μm , du sel gemme jusqu'à 53 μm .

- En 1901, la formule de radiation de Planck est vérifiée sur un espace spectral étendu à 52 μm .

- En 1923, Nichols et Tear décèlent des ondes infrarouges dans l'émission d'un petit oscillateur électrique et confirment leur nature électromagnétique. Ils établissent la jonction entre les ondes hertziennes et l'infrarouge. Ils obtiennent des ondes hertziennes de 290 μm .

Notons que sur le plan théorique, Stefan a trouvé sa formule en 1879 ; Planck publia la loi du rayonnement (loi de Planck) en 1900.

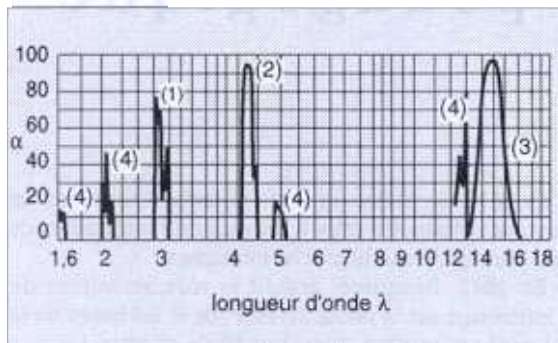
Historique de l'effet de serre

Au XVIII^e siècle, le Suisse H.B. de Saussure a construit un appareil composé de boîtiers décrit dans le chapitre « Contenu scientifique ». Le but était d'étudier l'effet du rayonnement solaire sur la température de l'air contenu dans les boîtes. Il a expérimenté ce dispositif sur les cimes des montagnes et dans les vallées.

Vers 1824, Fourier a comparé l'enveloppe atmosphérique à des boîtes vitrées. Il a formulé une première hypothèse sur le principe de l'effet de serre : la chaleur (rayonnement solaire) trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air qu'elle n'en trouve pour repasser après sa conversion en chaleur obscure (rayonnement infrarouge terrestre).

L'analyse des propriétés radiatives des gaz a commencé avec le Français Pouillet et l'irlandais Tyndall (voir « Contenu scientifique »), dont les travaux s'inscrivent dans le contexte des nombreux

Figure 29



Absorption du gaz carbonique

(1) : 5 cm d'épaisseur ; (2) : 3 cm d'épaisseur ;
 (3) : 6,3 cm d'épaisseur ; (4) : 100 cm d'épaisseur.

Source : d'après Eckert E. R. G. & Drake R. M., *Heat and mass transfer*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.

débats sur les changements climatiques pendant les périodes glaciaires. Il a utilisé la métaphore de couverture pour caractériser la propriété de l'atmosphère de retenir la chaleur à la surface de la terre (1860).

Au début du xx^e siècle, A. Arrhénius a associé l'effet de serre aux grands cycles géochimiques. Il a calculé que si le CO₂ disparaissait de l'atmosphère, la température de la terre diminuerait de 21 °C, ce qui engendrerait une diminution de la vapeur d'eau, donc un nouvel abaissement de la température. Il a constaté que des changements très faibles dans l'atmosphère peuvent avoir des conséquences importantes. Il a mis en relation la consommation industrielle du charbon et l'augmentation de l'effet de serre.

À partir de 1957-58 ont commencé les travaux de relevé systématique de CO₂ et de reconstitution des climats du passé en étudiant les époques glaciaires récentes à partir du carottage des glaces de l'antarctique. Parmi les principaux résultats, on a établi un parallèle entre la variation de température, du niveau d'eau de la mer et l'évolution de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, du méthane, etc.

De nos jours, les super-ordinateurs permettent de modéliser en trois dimensions et de simuler les comportements de l'atmosphère, des océans, du système des glaces, puis de coupler ces modèles. De plus, la densification des réseaux d'observation et l'augmentation de leur précision permettent de mieux connaître les phénomènes naturels qui se manifestent localement ou sur une grande échelle. Malgré ces nouveaux outils et instruments, il reste beaucoup d'interrogations sur la question du réchauffement global, car le climat est déterminé par un ensemble complexe d'interactions entre l'atmosphère, l'océan, les grands glaciers, les banquises et la biosphère.

Quelques observations sur l'effet du rayonnement infrarouge du sol

Ce rayonnement, bien qu'invisible, manifeste sa présence de diverses façons.

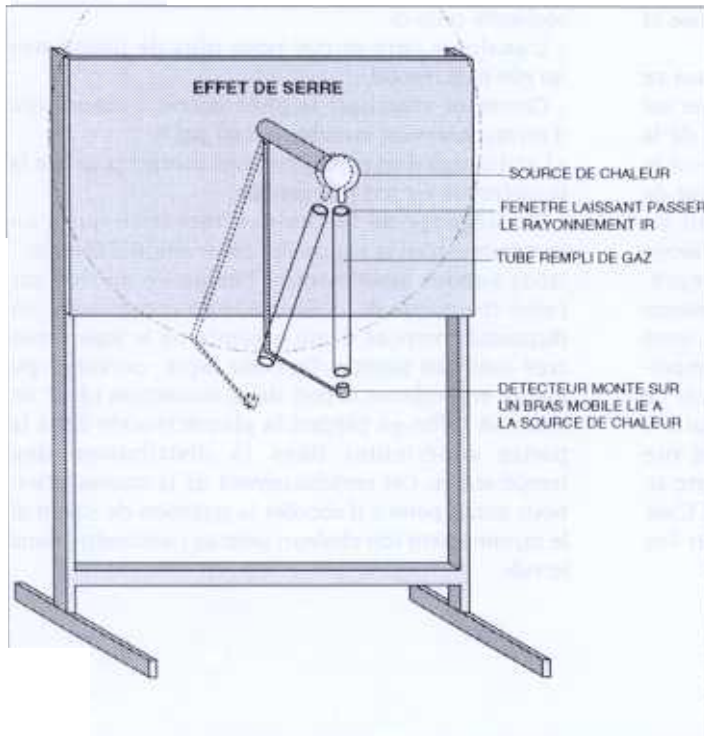
a) Lorsque le temps est suffisamment froid et que le ciel est bien dégagé pendant la nuit, on constate le matin que les allées sont couvertes de givre, sauf près des arbres. On peut en déduire que l'arbre est un parapluie à givre. En fait, il ne protège pas plus l'herbe de la glace qu'il ne la protège de l'air, car le givre ne tombe pas du ciel. Nous sommes en présence du gel de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique sur l'herbe. L'absence de givre auprès des arbres traduit le fait que, dans cette zone, l'herbe est plus chaude. L'herbe se refroidit (perd de l'énergie) par émission de rayonnement infrarouge vers son environnement et se réchauffe par l'absorption des rayons infrarouges émis par son environnement. Sur de grandes étendues plates, l'échange se fait essentiellement avec l'atmosphère tandis que sous un arbre, l'échange se fait essentiellement avec celui-ci. Le rayonnement IR émis par l'atmosphère étant beaucoup plus faible que celui émis par l'arbre, l'herbe se refroidit plus sur des surfaces dégagées que sur des surfaces couvertes par des arbres.

b) En été sur les plages, on trouve d'autres exemples de réchauffement par rayonnement infrarouge. Au cours de la nuit, la formation de rosée assombrit la couleur du sable, mais on constate que celle-ci n'est pas uniforme. Les crêtes sont plus humides que les creux. Il fait suffisamment chaud dans les creux pour que la rosée ne puisse s'y former. Contrairement au sable des crêtes, celui des creux n'échange pas seulement du rayonnement infrarouge avec le ciel mais également avec le sable environnant.

Histoire du projet

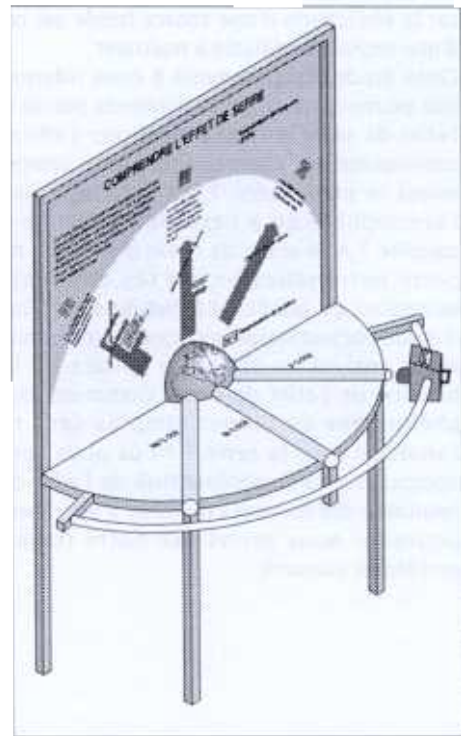
La première idée de mise en exposition de «l'effet de serre» est d'utiliser la serre, par exemple une cloche à fromage en plastique transparent, éclairée par un spot et de comparer les températures obtenues avec ou sans serre. On mesure les températures avec un thermomètre de voiture à double affichage, sonde intérieure et sonde extérieure. Nous avons utilisé des sphères par analogie avec le globe terrestre. Pour nous, cette représentation n'est pas suffisante pour permettre au public d'appréhender l'effet de serre. De plus, elle requiert que le visiteur change de point de vue par rapport à l'atmosphère. Il doit se situer en dehors de l'atmosphère, d'où notre idée de montrer les températures que l'on peut mesurer d'un satellite en fonction des longueurs d'onde. Autrement dit, quelles sont les conditions qui font que le satellite voit ou ne voit pas le sol ?

Figure 30



Premier projet de manipulation.

Figure 31



Deuxième projet de manipulation.

Dans cette perspective, une première proposition des scientifiques devait montrer la propriété d'absorption des infrarouges par les gaz et l'effet thermique de cette absorption ou effet de serre (fig. 30). Grâce à un dispositif composé de deux cuves, l'une remplie de CO_2 et l'autre d'air, l'absorption devait être mesurée et l'on constatait visuellement l'effet thermique de cette absorption. Pour cela, la partie basse des deux cuves était traversée longitudinalement par un rayonnement infrarouge identique. En sortie, on mesurait la température de la source chaude émettrice des IR. D'après la différence de température, le public pouvait voir que le CO_2 absorbait le rayonnement infrarouge plus que l'air et que l'absorption de ce rayonnement, du fait de l'existence d'un courant de convection, produisait un réchauffement du CO_2 et non de l'air contenu dans la cuve de référence (fig. 31). Cette proposition, intéressante par la présentation simultanée des deux propriétés caractérisant l'effet de serre, n'a pas été retenue en raison des problèmes techniques rencontrés, notamment la nécessité de nettoyer les dépôts de fumée après chaque consultation et de la difficulté de trouver des particules suffisamment légères pour se maintenir plusieurs heures en sustentation dans l'air. De plus, il fallait placer, en bas de cuves, des fenêtres qui laissent passer une bande spectrale du rayonnement infrarouge. Il y avait enfin le problème optique posé par la concentration

de ce rayonnement, à savoir que le champ de visée du pyromètre devait se limiter à ces fenêtres. Ces problèmes ajoutés à un coût trop important n'étaient pas compensés par une amélioration sensible de l'efficacité de la communication, contrairement à la solution analogique qui fut finalement retenue.

Une deuxième proposition (fig. 32) devait présenter un globe terrestre ainsi qu'une cloison horizontale accolée à sa circonférence et séparant deux cuves contiguës, l'une remplie de CO_2 et l'autre d'air. Une source de lumière éclairait les deux parties du globe, le public percevait l'effet de serre en lisant les températures des deux hémisphères. Cette solution posait les mêmes problèmes techniques que la première version.

Toujours en utilisant les gaz, nous avons élaboré des scénographies se rapprochant de la configuration atmosphère-terre. Ces solutions ont été éliminées pour les mêmes raisons.

Par la suite, nous avons exploré des solutions montrant l'effet de serre par une simulation du rôle de l'atmosphère. Deux enceintes dont la partie supérieure était refroidie à -15°C , étaient équipées, à mi-hauteur, d'une plaque opaque aux IR pour la première enceinte et transparente aux IR pour la seconde. Le public touchait la face extérieure de la plaque du fond, éclairée par le dessus avec une lampe simulant le soleil. En comparant les deux températures, le public devait s'intéresser aux

propriétés des plaques produisant plus ou moins d'effet de serre. Nous avons abandonné ce dispositif, car la réalisation d'une source froide est coûteuse et d'une technique difficile à maîtriser.

Cette étude nous a amené à nous interroger sur ce que peuvent apporter les différents points de vue sur l'effet de serre en vue d'améliorer l'efficacité de la communication. Dans quel contexte comprend-on le mieux ce phénomène ? Sur la terre, à l'intérieur de l'atmosphère ou à l'extérieur, comme le fait un satellite ? À ce stade de notre démarche, nous avons porté notre réflexion sur les différentes représentations du public de l'effet de serre. En l'absence d'études scientifiques sur ces représentations, nous avons analysé les difficultés portant sur la compréhension de l'effet de serre. Comment expliquer ce phénomène en termes simples sans recourir à l'analogie avec la serre ? Nous nous sommes vite aperçus que la compréhension de l'effet de serre se heurtait à des concepts difficiles à appréhender. C'est pourquoi nous avons axé notre travail sur les problèmes suivants.

- Il n'est pas évident de comprendre que le ciel de température inférieure à celle de la surface de la terre réchauffe celle-ci.

- L'analogie vitre et ciel pose plus de problèmes qu'elle n'en résoud.

- Comment visualiser le phénomène d'absorption d'un rayonnement invisible par un gaz ?

- L'utilisation d'un pyromètre sans contact pour lire la température est fort peu connue.

- Le piégeage de la chaleur nécessite que l'on comprenne bien la notion de conservation d'énergie.

Nous aurions aimé montrer l'influence du vide sur l'effet thermique du phénomène en construisant un dispositif composé d'une enceinte où le vide serait créé avec une pompe. De cette façon, on aurait pu mettre en évidence la part de la convection (dont on réduirait l'effet en plaçant la plaque chaude dans la partie supérieure) dans la distribution des températures. Cet enrichissement de la manipulation nous aurait permis d'aborder la question de savoir si le rayonnement (ou chaleur) peut se transmettre dans le vide.