

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

GM
GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Convection Naturelle et Rayonnement à travers
un Gaz non Transparent
Le Dioxyde de Carbone**

Proposé par : **Mr YOUNSI N.**

Etudié par : **Mlle MEBARKI Akila**

Dirigé par : **Mr YOUNSI**

PROMOTION

E.N.P. 10, Avenue Hacén Badi - El-Harrach - Alger

JANVIER 1988

Ministère de l'enseignement supérieur

وزارة التعليم العالي

Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Département de Génie Mécanique

دائرة الهندسة الميكانيكية

Promoteur : M^r N. Younsi

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

الموجه : ن. يونس

Etudiante : M^{lle} A. Mebaraki

الطالبة : أ. مباركي

الموضوع : ان الدراسة التي قمنا بها عن منضدة التجارب، كان الغرض منها اجراء تجارب، بتقييم كمية الحرارة المتبادلة الحراري، وخاصة ما يتعلق بالانتشار الطبيعي، والاشعاعي. وفي هذا السياق، يتناول تحديد انتشارية (CO₂)، ومعامل التبادل بالانتشار الطبيعي لهذا الغاز مع حجم اسطواني أفقي وكذلك التحقق من صحتها قانون هوتل و"إيجبر".

Sujet: Le banc d'essai qui a fait l'objet de notre étude est un appareil nous permettant d'effectuer des expériences et des études quantitatives des mécanismes de transfert thermiques notamment sur la convection naturelle et le rayonnement. A cet effet, la détermination de l'émissivité du dioxyde de Carbone, l'évaluation du coefficient d'échange par convection dans ce même gaz avec un corps cylindrique horizontal, ainsi que la vérification du principe établi par Hottel et Egbert, constituent les principaux thèmes de notre étude.

Subject: The test bench which has been the subject of our work is an apparatus with which quantitative studies can be made for natural convection and Radiation mechanisms. The aim of our work is to estimate the emissivity of the Carbone dioxide gas, the evaluation of the convection coefficient in this gas with a cylindrical element in horizontal position and the checking of Hottel's and Egbert's principal.

À mes parents, à la lumière de ma vie, pour leurs amour,
leurs grande patience et leurs encouragements.

À mes frères et sœurs.

À mes beaux frères et belles sœurs.

et Soumia et Souhila.

et à tous mes amis(es).

Je suis heureuse de témoigner ma profonde reconnaissance à M^{re} Younsi pour son suivi et les conseils précieux qu'il m'a apporté tout le long de ce travail.

Mes plus sincères remerciements à M^{er} Bouamoud pour son aide matérielle ainsi que la disponibilité dont il m'a fait bénéficier.

Toute ma gratitude à mes professeurs qui m'ont guidé au cours de mes études, parmi eux les membres de mon Jury qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leurs concours.

TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

CHAP. 1 :	INTRODUCTION	1
CHAP 2 :	IBANC DE CONVECTION NATURELLE ET DE RAYONNEMENT	4
2.1	déscription générale de l'installation	5
2.1.1	élément chauffant et caisson	5
2.1.2	instrument de mesure et de réglage	8
2.2	procédure de mise en marche	11
CHAP 3 :	RAPPELS ET ETUDE THEORIQUE	15
3.1	étude du rayonnement dans les gaz non transparents	23
3.1.1	rayonnement des gaz et vapeurs	23
3.1.2	Longueur du rayon gazeux moyen	27
3.1.3	émissivité du dioxyde de carbone	31
3.1.4	rayonnement des mélanges gazeux	36
3.2	La convection naturelle	39
3.2.1	mécanisme de la transmission de la chaleur	39
3.2.2	paramètres de similitude pour la convection naturelle	40
3.2.3	détermination de la conductance par unité de surface des cylindres horizontaux	42

324	corrélation entre les résultats pour pris isolément	42
3.3	étude de l'échange de chaleur siégeant dans le caisson	46
331	flux de chaleur total échangé entre l'élément, le gaz et le caisson	48
332	flux de chaleur échangé par convection	49
333	flux de chaleur échangé par rayonnement	52
334	évaluation de l'émissivité du dioxyde de Carbone	52
CHAP 4	LES ESSAIS	54
4.1	déscription des manipulations	55
4.2	analyse du dioxyde de Carbone en I.R	57
421	principe de l'absorption	57
422	résultats de l'analyse	57
4.3	présentation des résultats	59
4.4	conclusion	67
CHAP 5	CONCLUSION	69

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le transfert thermique est l'un des mécanismes les plus répandus d'échange d'énergie. Il siège essentiellement entre deux systèmes dès qu'une différence de température existe entre eux et cela quelle que soit le milieu qui les sépare même le vide.

Notre travail à été mené dans le but d'étudier le transfert de chaleur par rayonnement et convection naturelle se rapportant à un cylindre suspendu dans un caisson en acier contenant du dioxyde de Carbone.

Le dioxyde de carbone comme tout les gaz non transparents, ont, même aux basses températures, des Pouvoirs émissifs ou absorbants. C'est un gaz composé rentrant dans la catégorie des gaz qui présentent un spectre d'émission-absorption localisé uniquement dans l'infrarouge pour des températures inférieures à 500°C . De tels gaz s'échauffent par absorption lorsqu'ils sont traversés par un flux d'énergie radiante et émettent à leur tour un rayonnement infra-rouge notable.

La méthode précise pour calculer le facteur d'absorption ou d'émission est très complexe, mais pour des applications Pratiques, Hottel et EGBERT ont développés une méthode approchée. Ces Auteurs évaluèrent le facteur d'émission pour

plusieurs gaz à différentes pressions et températures et présentèrent les résultats de leur calculs sous forme de graphiques.

Le but essentiel de notre projet consiste d'une part à choisir une méthode de calcul pour l'évaluation de l'émissivité du dioxyde de carbone pour une température et une pression donnée. D'autre part essayer de tracer les courbes de l'émissivité du gaz selon les valeurs de la pression et de la température dans le but de vérifier si leur allure correspond à celle de l'abaque déjà établit par les Auteurs cités ci-dessus.

Le banc d'essai ayant servi de support à notre étude à déjà fait l'objet d'une étude antérieure ayant pour but principal, la détermination de l'émissivité du corps cylindrique horizontal ainsi que la vérification de la loi de Stephan-Boltzman dans le cadre du projet de fin d'étude de M^r Lafer Mourad en juin 87.

Nous utiliserons directement les résultats de cette étude entre autre l'émissivité de l'élément cylindrique

$$\epsilon_e = 0,964 \pm 0,131$$

CHAPITRE 2

LE BANC DE CONVECTION NATURELLE ET DE RAYONNEMENT

2.1 Description générale de l'installation

Le banc d'essai qui a fait l'objet de notre étude est un appareil de constitution très simple destiné aux études quantitatives de la convection naturelle et du rayonnement.

Les figures 2.1 et 2.2 nous montrent l'appareil et ses différents constituants. Il comprend principalement :

- Un caisson en acier contenant un élément cylindrique horizontal chauffé par effet joule.
- Une pompe à vide.
- Un moteur électrique.
- Un panneau supportant les appareils de mesure et de commande.
- Un bâti roulant sur lequel est monté l'ensemble.

2.1.1 Élément chauffant et caisson

L'appareil comprend essentiellement un élément chauffant cylindrique suspendu horizontalement par l'intermédiaire de câbles métalliques à l'intérieur d'un caisson en acier. L'élément chauffant est en cuivre, enduit à sa surface d'une peinture spéciale noire mate. Il est chauffé à l'aide d'une

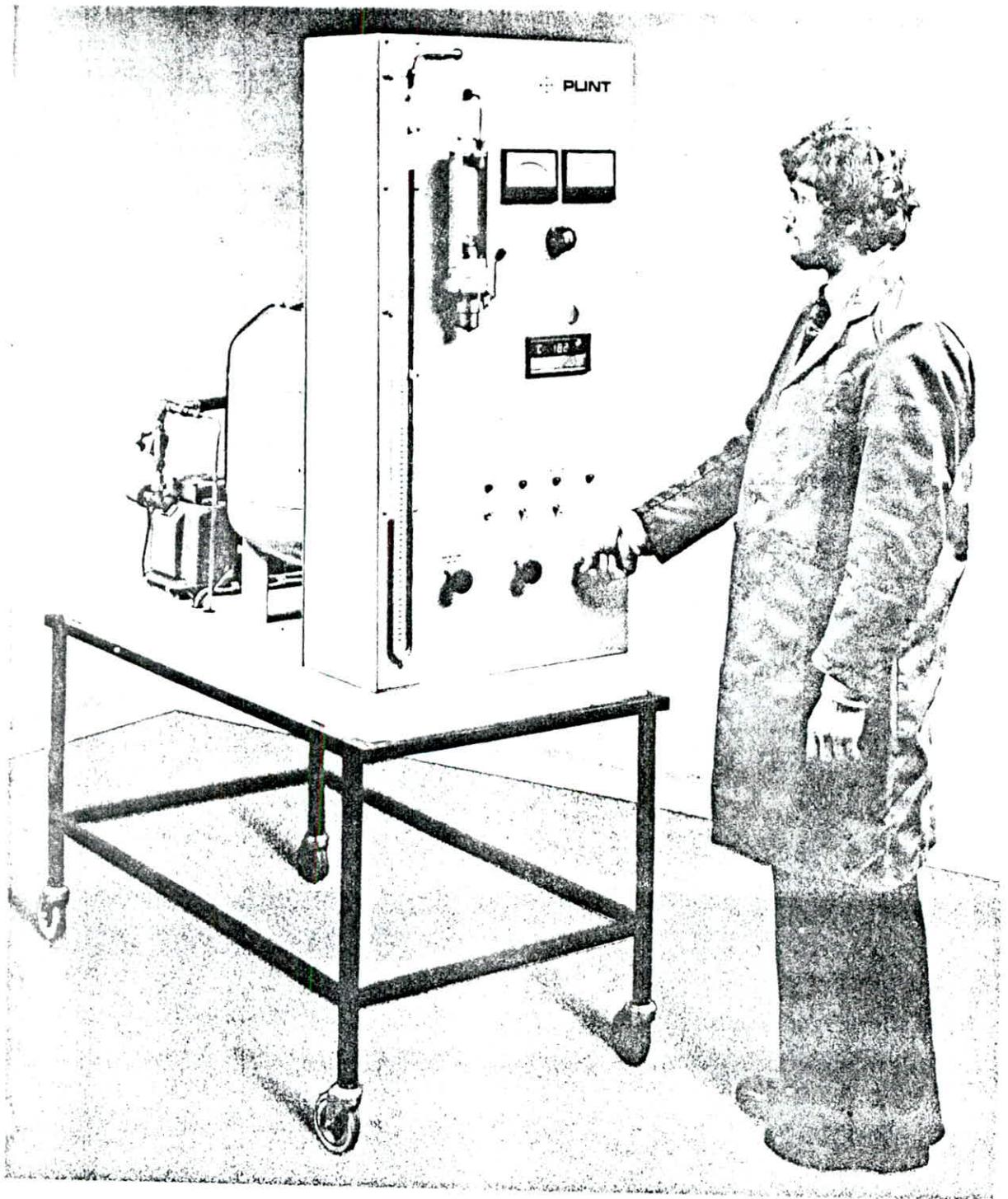


Fig 21. Banc de convection naturelle et de rayonnement.

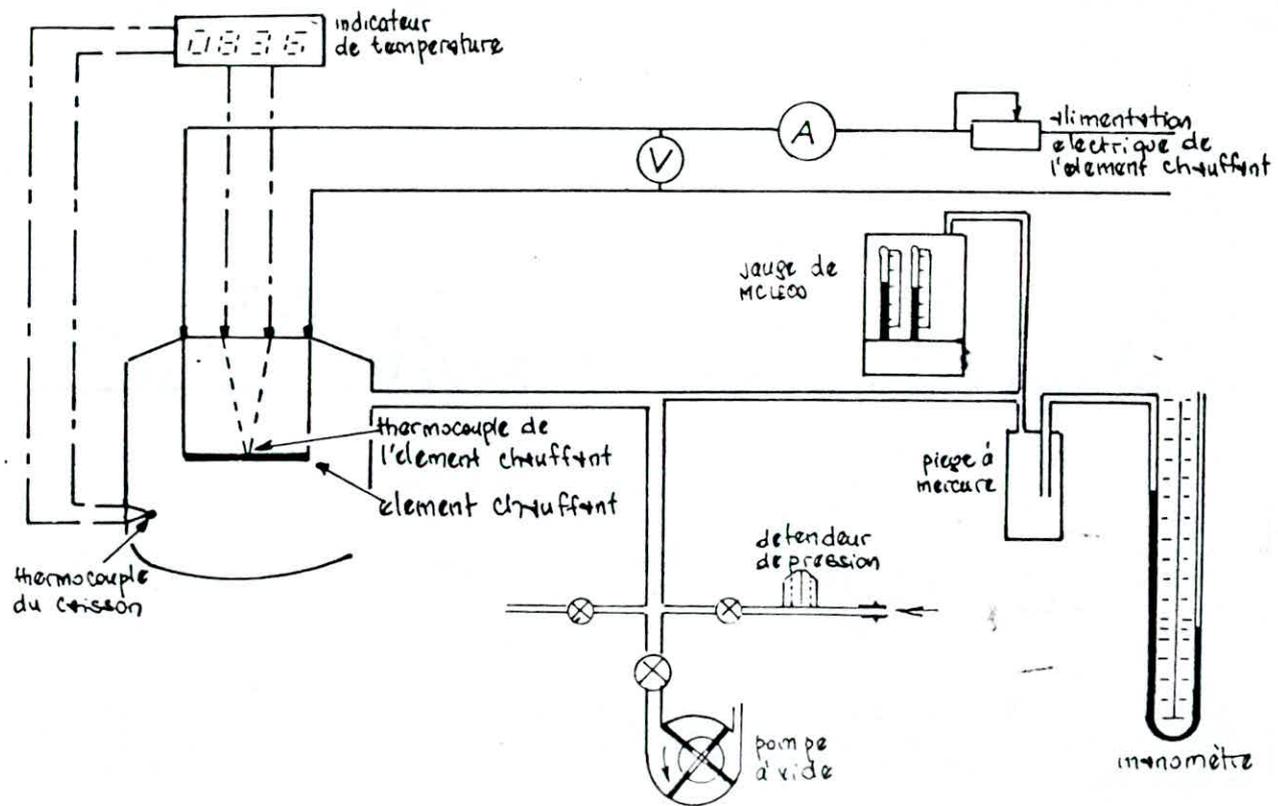


figure 22. schéma de l'appareil

résistance électrique, sa température de surface est mesurée par un thermocouple placé en son milieu.

l'élément chauffant est suffisamment éloigné des parois du caisson pour que l'échange de chaleur à sa surface se fasse essentiellement par convection naturelle.

La puissance dissipée par effet joule dans l'élément peut atteindre au maximum 10 Watts, et la température maximale de fonctionnement est 200°C. Compte tenu de cette faible puissance de chauffe, la chaleur fournie au caisson est faible.

L'accès au caisson de 447 mm de diamètre et 465 mm de hauteur est possible par sa partie supérieure munie d'un couvercle boulonné et rendu étanche à l'aide d'un joint torique et d'une graisse silicone spéciale. la température régnant à l'intérieur du caisson, donnée par un thermocouple située sur la paroi de celui-ci, est considérée égale à celle de l'enceinte. Le caisson peut être rempli d'air ou d'un autre gaz à pression variant dans une gamme étendue.

2.1.2 Instrument de mesure et de réglage

Un bâti roulant supporte l'ensemble panneau d'instruments, caisson et pompe à vide.

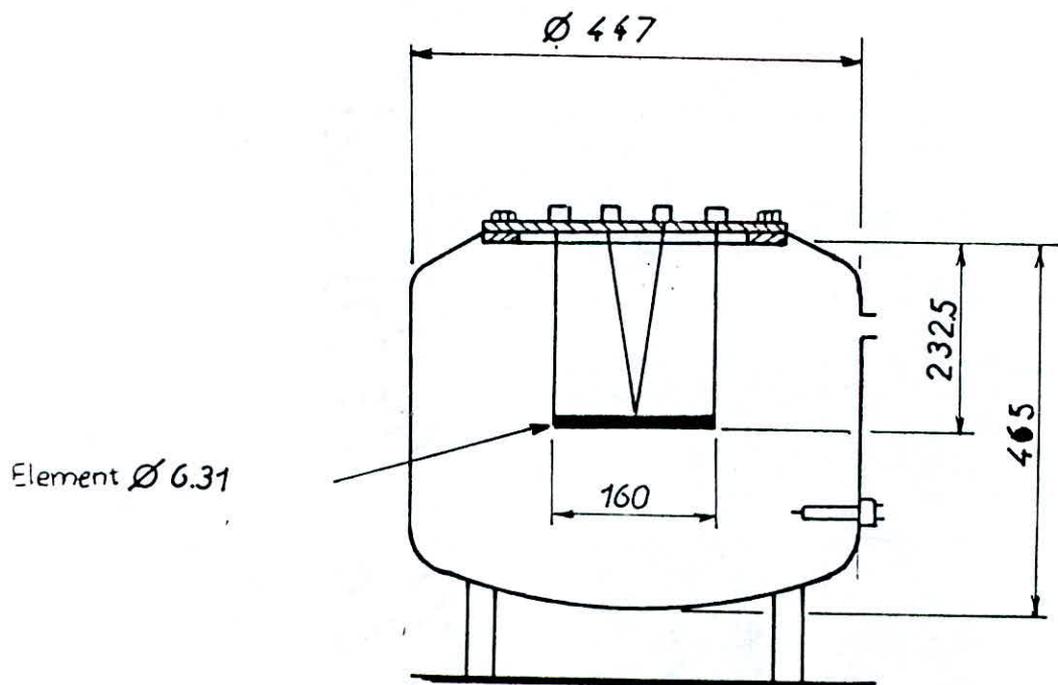


Figure 2.3 - coupe schematique du ctisson

Le caisson est placé sur la partie arrière du bâti. Il est raccordé au panneau et à une pompe à vide entraînée par un moteur électrique monophasé nous permettant d'obtenir de faibles pressions. L'enceinte peut être reliée soit à la pompe à vide, soit à une bouteille de gaz comprimé.

Des vannes de commutation et de régulation nous permettent de contrôler la pression et de varier sa valeur entre 0.05 mm Hg et 1600 mm Hg (2.2 bars environ).

Un raccord est fourni pour l'introduction d'air comprimé ou d'un autre gaz quand la pression de travail est supérieure à l'atmosphère.

Les valeurs de pression allant de la valeur maximale à 150 mm Hg sont données par lecture sur un manomètre à tube en "U", en tenant compte de la pression atmosphérique. Tandis que les valeurs inférieures à 150 mm Hg sont données par la jauge de McLeod. Un piège à mercure a été prévu pour empêcher celui-ci de s'infiltrer dans la Pompe à Vide.

Le circuit électrique est constitué d'une alimentation stabilisée de 12 V continu, d'un voltmètre, d'un ampèremètre, d'un rhéostat permettant de faire varier la puissance de chauffe et d'un interrupteur.

Pour une plus grande précision, des instruments de mesures

extérieures à l'appareil peuvent être utilisés. A cet effet, ont été prévus sur le côté droit du panneau des bornes de raccordement ainsi qu'un commutateur nous permettant d'utiliser les instruments intérieurs ou extérieurs à l'appareil.

Les fils des thermocouples en Nickel-Chrome / Nickel-aluminium sont reliés à un indicateur à affichage numérique avec soudure froide incorporée.

Des sorties externes existent pour permettre le raccordement d'un enregistreur graphique si une plus grande précision est souhaitée. Au moyen d'un commutateur d'un thermocouple on sélectionne la lecture de la température de l'élément chauffant ou celle du caisson.

2.2 Procédure de mise en marche.

Une fois l'appareil alimenté en courant électrique 220 V Alternatif, On commence par effectuer les essais.

- Fermer la vanne d'alimentation en dioxyde de Carbone se trouvant au centre du panneau.

- Ouvrir le mano-détendeur (régulateur de Pression) situé à l'extrême droite en l'actionnant dans le sens des aiguilles d'une montre.

- Fermer la vanne d'isolement se trouvant au dessus de la Pompe à vide.

. mettre en marche la Pompe. Elle doit tourner pendant 15 mn en maintenant la vanne d'isolement fermée afin de vider complètement les différents tuyaux de l'air s'y trouvant.

. Ouvrir la vanne d'isolement et laisser faire le vide pendant 60 mn au "minimum".

. Vérifier que la Pression la plus basse est atteinte, elle est de l'ordre de 0.05 mm Hg.

. Fermer la vanne d'isolement Puis arrêter la Pompe.

. Brancher l'alimentation en dioxyde de Carbone, au raccord situé sur le côté droit du Panneau.

. fermer le mano-détendeur en tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre.

. Ouvrir la vanne d'alimentation en dioxyde de carbone.

. Introduire progressivement le gaz dans le circuit en actionnant le mano-détendeur.

. fermer la vanne d'alimentation dès que la Pression désirée est atteinte.

. Alimenter l'élément chauffant en actionnant l'interrupteur "Heather".

. Régler la puissance de chauffe à l'aide du rhéostat.

. Attendre l'équilibre Puis faire la lecture de la Pression, de la température, de la tension, et du courant après avoir vérifié la stabilité de ces données.

i. La température est donnée par l'indicateur à affichage numérique et au moyen du commutateur de thermocouple, Prélever les températures de l'élément et du caisson obtenues successivement.

ii. la valeur de la Pression est indiquée par la jauge de Mc.Leod, Si elle est inférieure à 150 mmHg. Au delà de 150 mmHg, les Pressions sont lus par le manomètre en tube en "U".

Remarque :

Le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des données expérimentales varie avec la pression et la différence de température. Il est conseillé, alors, de noter des observations répétées toutes les deux minutes de la température.

Pendant toute l'expérience vérifier que la ddp et le courant ont gardés des valeurs constantes. De légères variations seront observées, faire les corrections nécessaires à l'aide du rhéostat pour maintenir la ddp et le courant à des valeurs à peu près constantes.

Emploi de gaz autres que l'air.

Il est possible d'étendre la gamme expérimentale par l'emploi de gaz différents. Le plus grand soins est nécessaire avec l'emploi de gaz inflammable, tel que l'hydrogène afin

d'éviter un mélange explosif.

La bouteille de gaz comprimé ne doit pas être raccordé à l'enceinte avant de faire le vide. Après remplissage à la pression voulue, l'enceinte doit à nouveau être évacuée et ensuite remplie de nouveau, afin d'éliminer l'air.

Après une série de mesures avec un gaz inflammable, le vide doit être fait avant de remplir à nouveau d'air afin d'éviter tout risque d'explosion.

CHAPITRE 3

RAPPELS

ET

ETUDE THEORIQUE

Notations du chapitre.3.

notations relatives au paragraphe, 3.1

dA : Elément de surface noire placé au centre de base de l'hémisphère,

D : Diamètre du caisson, $[m]$

E_g : Pouvoir émissif total d'un gaz, $[W/m^2]$

F : Facteur correctif compris entre 0.8 et 0.95 selon les formes de l'enceinte.

$I_{\lambda L}$: Intensité du rayonnement monochromatique émis à partir d'une surface noire parcourant une couche gazeuse d'épaisseur L .

R : Longueur du rayon gazeux, $[m]$.

S : Aire totale de l'enveloppe de la masse gazeuse, $[m^2]$.

S_j : Surface de l'enceinte limitant un hémisphère gazeux isotherme, $[m^2]$.

T_g, T_s : Température du gaz Température de l'élément de surface dA , $[K]$

V : Volume de la masse gazeuse, $[m^3]$.

X : Dimension caractéristique de la forme de l'enceinte contenant la masse gazeuse.

- λ : longueur d'onde de rayonnement, $[\mu]$.
- $\alpha_{g\lambda}$: facteur d'absorption du gaz pour la longueur d'onde λ .
- $\epsilon_{g\lambda}$: facteur d'émission du gaz pour la longueur d'onde λ .
- ϵ_m : facteur d'émission du mélange gazeux $[CO_2 + H_2O]$.
- ϵ_{CO_2} : facteur d'émission du dioxyde de Carbone.
- ϵ_{H_2O} : facteur d'émission de la vapeur d'eau.
- σ : Constante de Stephan. Boltzman, $5,669 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$.
- Φ : Quantité d'énergie émise vers l'élément dA à partir d'un volume gazeux hémisphérique, $[W]$.
- δ : Angle formé par la direction du rayonnement avec la normale à l'élément de surface.
- Ω : Angle solide.
- $\Delta \epsilon_{Tg}$: Terme correctif du facteur d'émission pour des rayonnements superposés issus de CO_2 et H_2O .

notations relatives au paragraphe 3.2

A_e et A_c : Surface de caisson et de l'élément cylindrique, $[m^2]$.

d : Diamètre de l'élément cylindrique, $[m]$.

Gr : Nombre de Grashof ; $Gr = d^3 \rho^2 g \beta \Delta T / \mu^2$.

h_c : Coefficient d'échange de chaleur par convection naturelle, $[W/m^2 \cdot K]$.

K : Conductibilité thermique évaluée à la température T_m , $[W/m \cdot K]$.

Nu : Nombre de Nusselt ; $Nu = h_c d / K$.

Pr : Nombre de Prandtl ; $Pr = C_p \mu / K$, calculée pour la température T_m .

T_f, T_m, T_s : Température du fluide au repos ; moyenne arithmétique entre T_s et T_f ; Température de surface de l'élément $[^\circ K]$.

Alphabet grec :

β : coefficient cubique de dilatation, $[^\circ K^{-1}]$.

μ : Viscosité dynamique du fluide, $[Kg/m \cdot s]$.

ρ : masse volumique du fluide $[Kg/m^3]$.

notations du paragraphe 3.3.

F_{ev}, F_{eg}, F_{vg} : facteurs d'angles, fraction du rayonnement émise par la surface noire de l'élément cylindrique et interceptée par les parois du caisson; Fraction de rayonnement émise par l'élément cylindrique et absorbée par le gaz; La fraction rayonnée vers le gaz par les parois du caisson.

H : hauteur du caisson, [m].

J : Densité de flux de rayonnement effectif, [W/m^2].

L : Longueur de l'élément cylindrique, [m].

Φ : Puissance de chauffage fournie à l'élément cylindrique, [W].

q : flux de chaleur transmis par l'élément cylindrique, [W/m^2].

Φ_c : Quantité de chaleur échangée par convection, [W].

Φ_r : Quantité de chaleur échangée par rayonnement, [W].

T_e, T_v, T_m Température de l'élément chauffant, Température de Paroi du caisson, moyenne arithmétique entre la température T_e de l'élément et celle du caisson T_v : $T_m = \frac{T_e + T_v}{2}$, [$^{\circ}K$].

ϵ_e, ϵ_v : émissivité de l'élément chauffant, émissivité de l'élément cylindrique.

W_{bv}, W_{be}, W_{bg} : Potentiel thermique des parois du caisson,
Potentiel thermique de la surface de l'élément,
Potentiel thermique du gaz, $[W/m^2]$.

L'échange de chaleur entre l'élément chauffant et le milieu environnant dans lequel il se trouve s'effectue par les mécanismes de transmission qui sont le rayonnement et la convection.

L'élément chauffant est considéré suffisamment éloigné des parois du caisson pour que l'échange de chaleur par convection soit effectivement par convection naturelle.

Le rayonnement issu de la surface du cylindre passe à travers la masse gazeuse contenue dans l'enceinte, qui dans notre cas est du dioxyde de carbone, qui est un gaz composé ayant des bandes d'émission-absorption suffisamment importantes pour être prises en considération. Ainsi le gaz introduit dans le caisson n'est pas transparent au rayonnement.

Compte tenu de la faible puissance de chauffe fournie au cylindre, le maximum atteint étant 10 Watts, la quantité de chaleur perdue par conduction à travers les parois vers le milieu extérieur sera négligeable.

On supposera aussi, que la surface de l'élément est faible devant celle de l'enceinte, vu que le constructeur ne nous donne aucun renseignement sur la surface et l'émissivité

du caisson. Mais cette simplification reste acceptable car elle n'introduit pas une grande erreur dans les calculs faits à partir des équations établies ci-dessous.

3.1 Etude du rayonnement dans les gaz absorbants.

3.1.1 Rayonnement des gaz et Vapeurs :

Beaucoup de gaz et de mélanges gazeux tel que O_2 , N_2 , H_2 , air sec... etc ont des molécules symétriques et sont pratiquement transparents au rayonnement thermique, ils n'émettent ni absorbent de quantités appréciables d'énergie rayonnante aux températures usuelles. Par contre le rayonnement des gaz asymétriques et des vapeurs tel que CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , NH_3 , les hydrocarbures et les alcools, a son importance dans les équipements de transfert de chaleur.

Alors que les solides rayonnent à toutes les longueurs d'ondes dans le spectre entier, les gaz émettent et absorbent le rayonnement seulement dans des régions étroites de longueurs d'ondes appelées bandes. La figure - 3.1 - montre ces bandes pour CO_2 et H_2O .

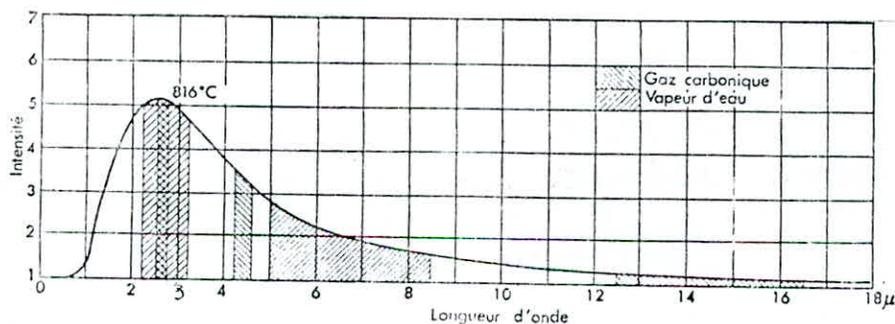


FIG. 3.1. — Bandes d'émission du gaz carbonique et de la vapeur d'eau

Les bandes de rayonnement pour CO_2 se trouvent entre :

$$\lambda = 2.36 \text{ et } 3.02 \mu$$

$$\lambda = 4.01 \text{ et } 4.81 \mu$$

$$\lambda = 12.5 \text{ et } 16.5 \mu ;$$

celles de H_2O se situent entre :

$$\lambda = 2.26 \text{ et } 3.27 \mu$$

$$\lambda = 4.8 \text{ et } 8.5 \mu$$

$$\lambda = 12 \text{ et } 25 \mu$$

En supposant un rayonnement un rayonnement du corps noir à l'intérieur des bandes, le rayonnement à partir des trois bandes de CO_2 pour 200, 1000, et 2000°C est respectivement 12, 10,5 et 6 pour cent du rayonnement total émis par le corps noir aux températures considérées. La vapeur d'eau émet, aux mêmes températures, respectivement 67, 46 et 24 pour cent du rayonnement du corps noir.

On constate que l'intensité du rayonnement émis par un gaz augmente moins rapidement avec la température que celle émis par un corps noir. En effet aux températures élevées, l'intensité maximale de la courbe de la figure -3.1- se déplace vers les courtes longueurs d'ondes ce qui amène une diminution du pourcentage de l'énergie rayonnée par le corps noir tombant à l'intérieur des bandes de rayonnement des gaz.

Le rayonnement d'un gaz diffère du rayonnement d'un corps solide par d'autres aspects. L'émission et l'absorption de l'énergie rayonnée par un corps solide sont essentiellement des phénomènes de surface, mais dans les calculs du rayonnement émis ou absorbé par une couche gazeuse, on doit tenir compte de son épaisseur, de sa pression et de sa forme.

Lorsqu'un rayonnement monochromatique d'intensité I_{λ_0} passe à travers une couche gazeuse d'épaisseur L l'énergie absorbée sur une distance dx obéit à la relation:

$$dI_{\lambda x} = -K_{\lambda} I_{\lambda x} \cdot dx$$

où

$I_{\lambda x}$: intensité à la distance x .

K_{λ} : constante de proportionnalité ou coefficient d'absorption monochromatique dont la valeur dépend de la pression et de la température du gaz.

En intégrant entre les limites $x=0$ et $x=L$ on obtient:

$$I_{\lambda L} = I_{\lambda_0} (1 - e^{-K_{\lambda} L})$$

La quantité entre parenthèse représente le facteur d'absorption du gaz $\alpha_{g\lambda}$ pour la longueur d'onde λ , où d'après la loi de Kirchoff, le facteur d'émission $\epsilon_{g\lambda}$ pour la longueur d'onde λ .

Pour obtenir les valeurs effectives du facteur total d'émission

ou d'absorption, il est nécessaire de faire une sommation sur toutes les bandes de rayonnement. On remarque que pour de grandes valeurs de L , c.à.d pour des couches gazeuse épaisses, le rayonnement des gaz se rapproche des conditions du corps noir à l'intérieur de ses bandes.

3.1.2 Longueur du rayon gazeux : R

Avant de calculer l'échange de chaleur par rayonnement de la surface du gaz, nous devons donner la méthode de calcul tenant compte de la longueur du rayon gazeux.

L'évaluation de cette grandeur est assez longue puisqu'il s'agit de calculer des intégrales doubles sur les différentes formes de l'enceinte.

Il existe un cas où ce calcul est très simple, c'est lorsque la surface S_j de l'enceinte limite un hémisphère gazeux isotherme et dA est un petit élément de surface noire placé au centre du plan de base de l'hémisphère.

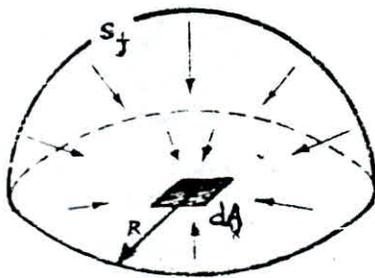


Figure 3.2 représente une couche gazeuse isotherme de forme hémisphérique rayonnant vers le centre de sa base.

Dans ces conditions, la distance séparant S_j de dA reste constante dans toutes les directions et est égale au rayon R de l'hémisphère.

Dans la pratique, les volumes gazeux que l'on a à considérer sont en général de formes autres qu'hémisphériques.

Nous décrivons ici une méthode pratique attribuée à Hottel.

Il s'agit d'une méthode approchée, qui n'est valable que pour les milieux gazeux isothermes. On remplace la couche gazeuse par un hémisphère gazeux de rayon R . Le rayon R de l'hémisphère équivalent correspondant à un certain nombre de configurations courantes, a été calculé et les résultats sont présentés sous forme de tableau.

Le tableau 3.1 - donne le coefficient F par lequel il faut multiplier une dimension X caractéristique de la forme gazeuse considérée, pour obtenir le rayon R de l'hémisphère gazeux équivalent.

Les valeurs du coefficient F ont été obtenues analytiquement par des intégrations sur les différentes formes particulières, en faisant d'abord l'hypothèse d'un milieu optiquement mince, qu'on retrouve dans la troisième colonne du Tableau 3.1 - . Dans la quatrième colonne de ce tableau, on trouvera des valeurs corrigées de ces coefficients F (le facteur correctif est compris entre 0.8 et 0.95 selon les formes) de manière à tenir compte d'une épaisseur optique non mince, comme c'est souvent le cas dans la pratique courante.

Pour les configurations non tabulées, on montre qu'il est possible d'estimer approximativement R , pour le rayonnement d'un gaz isotherme vers la totalité de son enveloppe à l'aide des formules suivantes:

Tableau 34

Rayon de l'hémisphère équivalent à différents volumes gazeux, d'après [14] et [7].

Forme du volume gazeux	Dimension X caractéristique de la forme	Facteur F : (R = X.F)	
		Milieu optiquement mince : (P _g , R) = 0	Épais, op. moyenne (Val. moy. de P _g , R)
Sphère rayonnant vers toute sa surface	Diamètre	2/3	0,63
Cylindre infiniment long rayonnant vers toute sa surface	Diamètre	1	0,90
Cylindre semi-infini rayonnant vers le centre de sa base	Diamètre	1	0,90
Idem, mais rayonnant vers toute la base	"	0,81	0,96
Cylindre, hauteur = diamètre, rayonnant le centre d'une base	Diamètre	0,77	0,71
Idem, mais rayonnant vers la totalité de l'enveloppe	"	2/3	0,66
Cylindre, hauteur = diamètre/2, rayonnant vers une base	Diamètre	0,47	0,43
Idem, mais rayonnant vers la surface latérale	"	0,52	0,46
Idem, mais rayonnant vers toute l'enveloppe	"	0,500	0,45
Cylindre, hauteur = 2 . diamètre, rayonnant vers une base	Diamètre	0,73	0,60
Idem, mais rayon. vers la surface latérale	"	0,82	0,76
Idem, mais rayon. vers toute l'enveloppe	"	0,80	0,73
Cylindre infini, section droite 1-2 circulaire, rayonnant vers le centre du plan diamétral	Rayon		1,20
Cube rayonnant vers une face	Arête	2/3	0,66
Parallélépipèdes rectangulaires :			
• rapport de dimensions 1-1-4, rayon. vers une face 1-4	Arête la plus courte	0,90	0,82
" " " " 1-1	"	0,86	0,71
" " " " la totalité de l'enveloppe	"	0,89	0,81
• rapport de dimensions 1-2-6, rayon. vers une face 2-6	Arête la plus courte	1,18	
" " " " 1-6	"	1,24	
" " " " 1-2	"	1,18	
" " " " la totalité de l'enveloppe	"	1,20	
Lame à faces parallèles	Épais. de la lame	2	1,76
Volume gazeux extérieur à un faisceau de tubes et rayonnant vers un tube :			
• tubes disposés en triangle équilatéral, diamètre tubes = pas/2	Jour entre 2 tubes = (pas - diamètre)	3,4	2,8
• idem, sauf diamètre = pas/3	"	4,45	3,8
• tubes disposés en carré, diamètre des tubes = pas/2	"	4,1	3,5

• P_g est la pression partielle du gaz absorbant, mélangé avec un autre gaz transparent.
 • Pour obtenir le rayon R de l'hémisphère équivalent, au point de vue radiatif, à un volume gazeux donné, multiplier X par le facteur F.

$$R = 4V/S \quad 3.1$$

Pour un milieu optiquement mince.

$$R = 3,6V/S \quad 3.2$$

Pour une épaisseur optique moyenne.

V: volume de la masse gazeuse exprimée en m^3 .

S: l'aire totale de son enveloppe exprimée en m^2 .

Dans notre cas nous avons considéré que la forme contenant le dioxyde de carbone est entièrement cylindrique ayant 447 mm de diamètre et 465 mm de hauteur. Nous remarquons que ces deux dimensions sont très voisines nous nous trouvons alors dans le cas de la quatrième ligne du tableau 3.1 : Un cylindre dont la hauteur est égale au diamètre rayonnant vers la totalité de l'enveloppe dans le cas d'une épaisseur optique moyenne avec X correspondant au diamètre du cylindre et F égale à 0.6.

$$R = F \cdot X = 0.6 D \quad 3.3$$

$$R = 0.6 \cdot 0.447 = 0.268 \text{ m.}$$

3.1.3. Emissivité du dioxyde de carbone: ϵ_g

Hottel et Egbert ont établis, une série d'abaques fournissant pour les gaz absorbants les plus courants (CO_2 , SO_2 , NH_3 , CO , H_2O , méthane) l'émissivité d'une couche homogène et isotherme, de forme hémisphérique, rayonnant vers un élément de surface placé au centre de sa base.

Considérons une masse gazeuse contenue dans une enceinte hémisphérique de rayon R à l'intérieur de laquelle se trouve du dioxyde de Carbone à la pression partielle P_2 .

On se propose d'évaluer l'échange mutuel de chaleur par rayonnement entre le gaz à la température T_g et une surface noire à la température T_s , située au centre du plan de base de l'hémisphère.

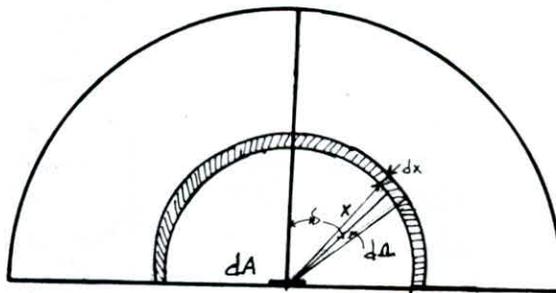


Figure 3.3: émission vers un élément de surface à partir d'une mince couche gazeuse d'épaisseur dx à la distance x :

La quantité rayonnée vers dA peut s'écrire:

$$E_G = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad 3.4$$

à partir d'une mince couche, de rayon x , l'émission vers l'élément de surface,

par unité de surface et par unité d'épaisseur de la couche s'écrira :

$$\frac{dE_g}{dx} \cdot dx = \sigma T_g^4 \frac{dE_g}{dx} dx \quad 3.5$$

Puisque le pouvoir émissif vaut π fois l'intensité, l'intensité de l'irradiation au centre de la base, due à une couche hémisphérique dx vaut alors :

$$\frac{1}{\pi} \cdot \frac{dE_g}{dx} dx = \frac{1}{\pi} \sigma T_g^4 \frac{dE_g}{dx} dx \quad 3.6$$

La quantité d'énergie émise vers l'élément de surface dA à partir d'un volume gazeux limité par l'angle solide $d\Omega$ et les rayons x et $x+dx$ partant de dA , lorsque ces rayons forment un angle δ avec la normale à dA , est donnée par l'équation :

$$d\phi = I dA \cos \delta d\Omega \quad 3.7$$

$$d\phi = \frac{1}{\pi} \sigma T_g^4 \frac{dE_g}{dx} dx \cdot dA \cos \delta d\Omega \quad 3.7a$$

La quantité d'énergie totale échangée s'obtient par intégration de l'expression ci-dessus :

$$\int_0^{x_{\max}} \int_A \int_{\Omega} d\phi = \int_0^{x_{\max}} \int_A \int_{\Omega} \frac{1}{\pi} \sigma T_g^4 \frac{dE_g}{dx} dx dA \cos \delta d\Omega \quad 3.8$$

La figure 3.4. fournit l'émissivité d'une couche gazeuse hémisphérique, pour le dioxyde de Carbone. Le facteur d'émission dépend de l'épaisseur de cette couche et de sa température.

Comme le coefficient d'absorption est sensiblement proportionnel, dans chaque bande d'absorption du gaz, à sa pression partielle p_g , ϵ_g dépendra donc à chaque température, du produit $p_g \cdot R$.

Les grandeurs d'entrée de l'abaque de la figure 3.4. sont donc :

- La température du gaz exprimée en Kelvin.
- Le produit $p_g \cdot R$ de la pression partielle du gaz absorbant (mélangé avec un gaz transparent) par le rayon de l'hémisphère gazeux. exprimé en m.atm.

Ce graphe a été établi pour une pression totale P_T du mélange gaz absorbant + gaz transparent égale à 1 atmosphère, et une pression partielle p_g du gaz absorbant. Mais dans la pratique on a généralement des pressions autres que celle-ci.

On tient compte de l'influence des valeurs réelles des pressions totales sur ϵ_g en multipliant les émissivités obtenues à partir de l'abaque de la figure 3.4. par des coefficients correcteurs fournis par les courbes de la figure 3.5. .

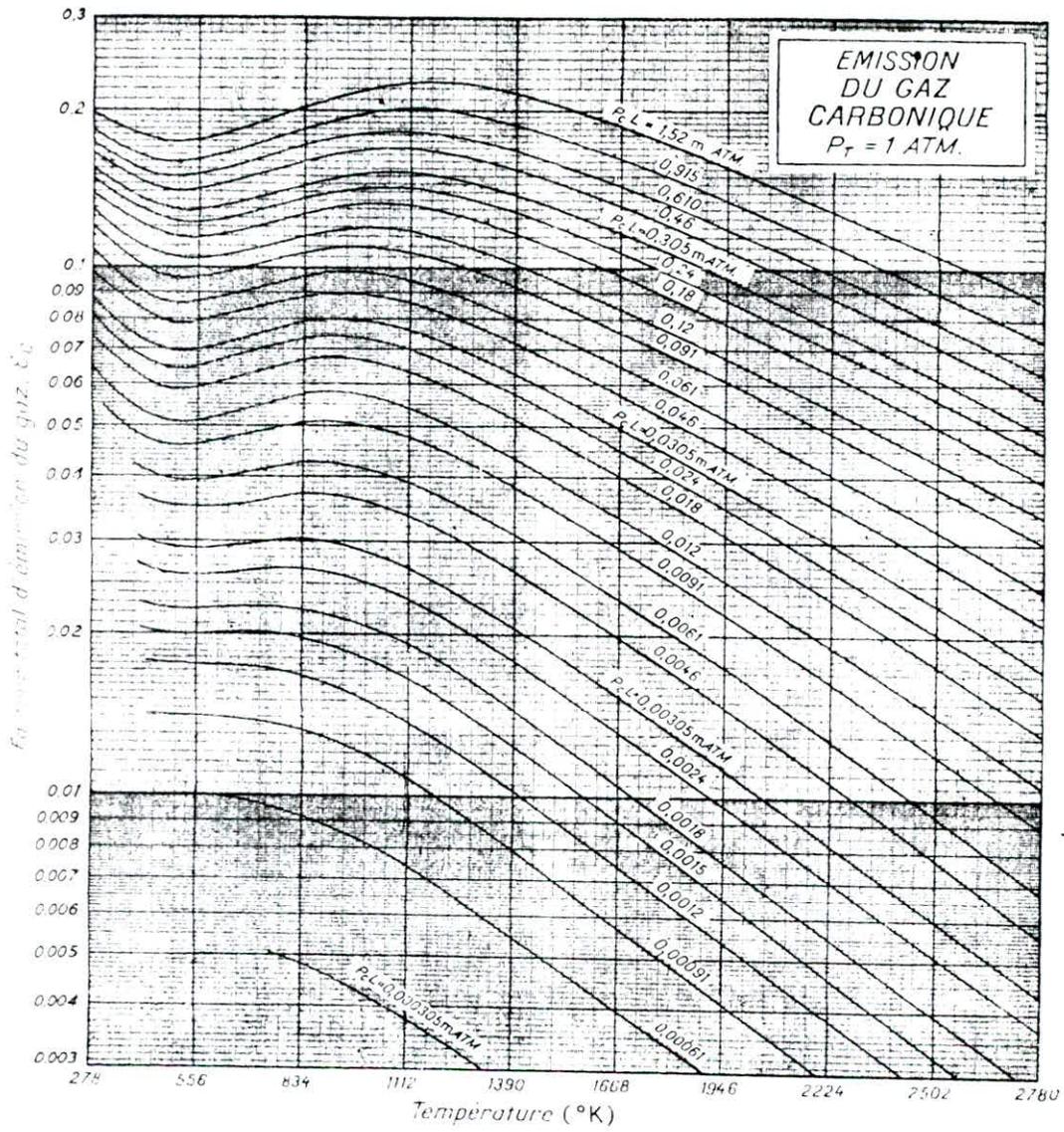


FIG. 3.4 Facteur total d'émission du gaz carbonique.

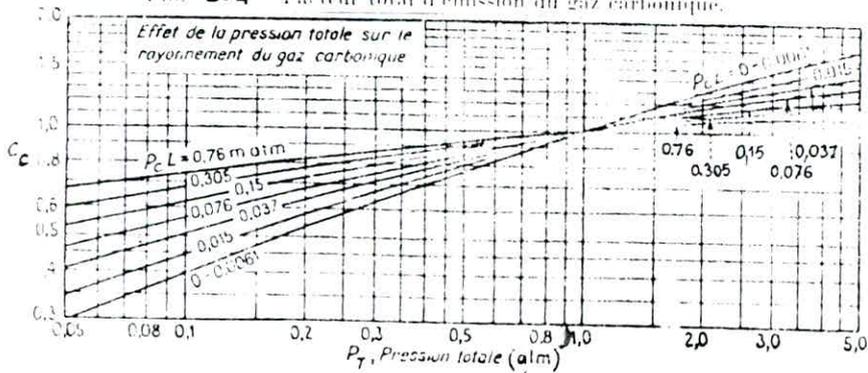


FIG. 3.5 - Facteur correctif C_c pour convertir le facteur total d'émission du CO_2 sous une atmosphère de pression totale en facteur total d'émission sous une pression de 1 atmosphère.

3.14 Rayonnement des mélanges gazeux :

Lorsqu'on est en présence d'un mélange de gaz absorbants le rayonnement issu de ces gaz peut être un facteur important dans l'évaluation de la transmission totale de chaleur.

Les spectres relatifs aux gaz se chevauchent pour provoquer un accroissement du facteur total d'émission.

Prenons le cas où du gaz carbonique et de la vapeur d'eau sont présents simultanément dans un mélange gazeux parmi d'autres constituants non absorbants, comme c'est le cas pour les gaz de combustion. On évalue l'émissivité totale du mélange gazeux en additionnant les contributions de CO_2 et de H_2O calculées séparément.

Du fait d'un léger recouvrement des bandes spectrales d'émission de ces deux gaz, on aboutit de la sorte à une valeur de l'émissivité légèrement trop forte. On la corrige donc en lui soustrayant une quantité $\Delta \epsilon$ fournie par les courbes de la figure 3.6. dont les entrées dépendent des pressions partielles du CO_2 et de H_2O , de l'épaisseur de la couche gazeuse L et de la température du mélange.

$$\epsilon_m = (\epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}) - \Delta \epsilon_{Tg} \quad 3.9$$

Remarque : On adopte le même raisonnement que dans le paragraphe 3.13 pour l'évaluation du coefficient total d'émission $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ ainsi que le facteur

correctif C_{CH_2O} respectivement à partir des courbes des figures 3.7 et 3.8.

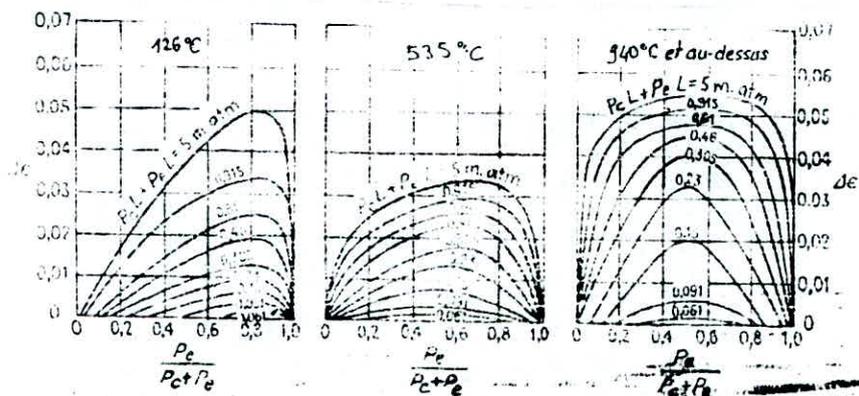


Fig. 3-6 — Correction du facteur total d'émission du gaz due au chevauchement des spectres de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

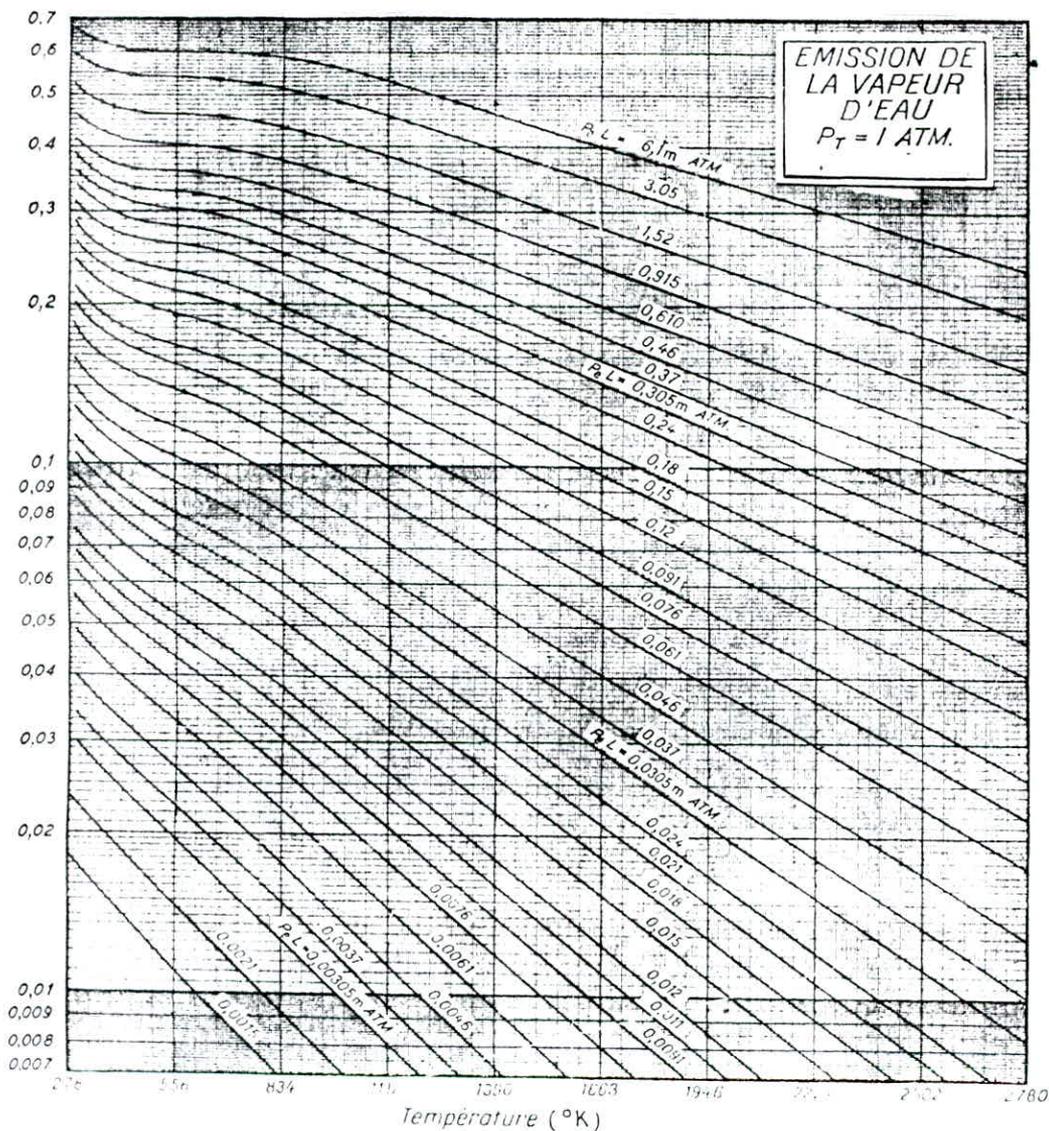


Fig. 3-7 Facteur total d'émission de la vapeur d'eau

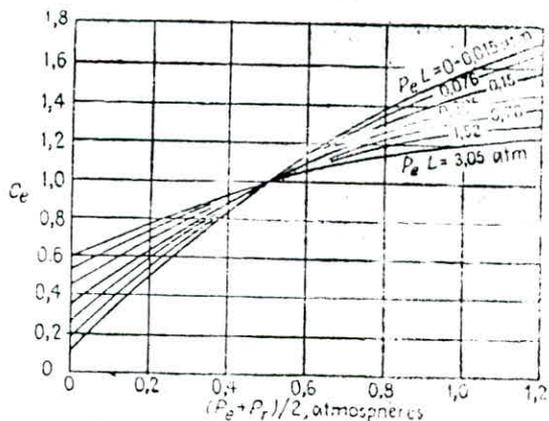


Fig. 3-8 — Facteur correctif C_e pour convertir le facteur total d'émission de l'eau en valeurs de P_e et de P_T autres que 0 et 1 atm, respectivement.

3.2 La convection naturelle :

3.2.1 mécanisme de la transmission de la chaleur :

On a transmission de la chaleur par convection à chaque fois qu'un corps sera placé dans un fluide à une température différentes de la sienne. C'est cette différence de température qui provoque l'écoulement de la chaleur entre le fluide et le corps, ainsi qu'une variation de densité des couches fluides au voisinage de la surface. La différence de densité est à l'origine de l'écoulement ascendant de la chaleur. Dans le cas où le mouvement du fluide ne résulte que des différences de densité uniquement le mécanisme de transmission de la chaleur correspondant est dit convection naturelle.

La quantité de chaleur échangée par convection entre la paroi solide et le fluide environnant est déterminée généralement par l'équation de Newton :

$$d\varphi_c = h_c dA (T_s - T_f). \quad 3.10$$

Cette équation est rapportée à une surface infiniment petite dA du fait que le coefficient d'échange, h_c , par convection n'est pas uniforme sur une surface. On fera donc une distinction entre une valeur locale de h_c et une valeur moyenne \bar{h}_c .

3.2.2 Paramètres de Similitude pour la convection naturelle.

Lorsque des corps sont géométriquement semblable, il a été montré que les rapports des forces d'inerties aux forces de viscosité étaient identiques.

$$\frac{\rho_2 v_2 L_2}{\mu_2} = \frac{\rho_1 v_1 L_1}{\mu_1} \quad 3.11$$

Il est de même pour le rapport des forces ascensionnelles aux forces de viscosité, ainsi :

$$\frac{\rho_2 g \beta_2 (T - T_{\infty})_2 L_2^2}{\mu_2 v_2} = \frac{\rho_1 g \beta_1 (T - T_{\infty})_1 L_1^2}{\mu_1 v_1} \quad 3.12$$

Cette expression sans dimension, conjuguée avec le nombre de Reynolds exprime une similitude dans un système de convection naturelle, mais vu qu'il est difficile de déterminer la vitesse du fluide qui n'est pas une quantité indépendante mais dépendant de la force ascensionnelle, il serait plus commode de l'éliminer, on obtient ainsi :

$$\frac{\rho_2^2 g \beta_2 (T - T_{\infty})_2 L_2^3}{\mu_2^2} = \frac{\rho_1^2 g \beta_1 (T - T_{\infty})_1 L_1^3}{\mu_1^2} \quad 3.14$$

Le nombre sans dimension $\rho^2 g \beta (T - T_\infty) L^3 / \mu$ est appelé nombre de Grashof qui représente le rapport des forces ascensionnelles aux forces de viscosité.

Les unités utilisées

ρ	Kg/m^3	;	L	m
μ	Kg/m.s	;	$T - T_\infty$	$^\circ\text{C}$
β	$1/\text{degre. absolu}$;	g	m/s^2

Lorsque la force ascensionnelle agit seule, on peut déterminer la vitesse du fluide à l'aide des quantités se trouvant dans le nombre de Grashof, alors le nombre de Reynolds n'est d'aucune utilité en convection naturelle et l'égalité des nombres de Grashof établit la similitude dynamique.

Par conséquent, la similitude des champs de vitesse et de température exige pour des corps chauffés ou refroidis par convection naturelle que les nombres de Grashof et Prandtl soient égaux en des points correspondants et il en découle que les nombres Nusselt le sont aussi.

De plus si les vitesses sont suffisamment petites pour que les forces d'inerties puissent être négligées devant les forces de viscosité et de la force ascensionnelle, le nombre de Nusselt peut être exprimé comme

Fonction de la seule variable $[Gr. Pr]$ et on peut écrire :

$$Nu = \psi (Gr. Pr) \quad 3.15$$

3.23 Détermination de la conductance par unité de surface pour des cylindres horizontaux.

L'analyse dimensionnelle ayant donné une corrélation entre les résultats expérimentaux, les courbes passant par les points représentatifs des résultats expérimentaux ont été mise en équation afin de comparer ces résultats avec ceux obtenus avec la méthode analytique. On s'est intéressé juste aux interprétations des résultats obtenus pour des cylindres horizontaux puisqu'ils rentrent dans le cas de notre travail.

Les équations proposées s'appliquent strictement à des corps immergés dans un milieu de dimension infini où l'écoulement est influencé par la forme et la disposition du corps transmettant la chaleur.

3.24 Corrélation entre les résultats pour des cylindres horizontaux pris isolément.

Jodlbauer a mesuré les vitesses et les températures à proximité d'un cylindre horizontal chauffé. Herman a prévu ces résultats d'une

manière approchée à partir de considérations théoriques dans le cas des nombres de Grashof $Gr > 10^3$, Herman a indiqué :

$$Nu = \frac{hcd}{k} = 0,37 Gr^{0,25}$$

3.16

pour la convection naturelle sur un cylindre horizontal unique baignant dans des gaz diatomiques ($C_p \mu/k = 0,74$).

Pour la transmission de chaleur par convection naturelle à partir de cylindres horizontaux, on possède des résultats pour l'air, l'hydrogène, l'anhydride carbonique, l'oxygène, l'eau, l'ampiline, le tétrachlorure de Carbone, la glycérine, le Toluène et l'huile d'olive.

Les diamètres des cylindres peuvent être dans rapport de 1 ÷ 7300, les pressions des gaz dans rapport de 1 ÷ 10 000, le nombre de Prandtl dans un rapport de 1 ÷ 1100 et tandis que les ΔT dans une gamme de température allant de quelques degrés à 1600°C.

Si maintenant l'équation 3.16 relative à des gaz étant généralisée en y ajoutant $(C_p \mu/k)^{0,25}$, on obtiendrait :

$$Nu = \frac{hcd}{k} = 0,47 \left[\frac{d^3 \rho^2 g \beta (T_e - T_f) \cdot C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{0,25} \quad 3.17$$

Pour des ΔT petits, l'équation cidessus conduit à des valeurs du nombre de Nusselt $Nu = \frac{h_c \cdot d}{k}$ inférieurs de 25% à celles que l'on connaît pour les gaz.

Les propriétés physiques C_p, μ, k et ρ ont été calculées pour une température du film de fluide prise à mi-chemin entre la température du fluide ambiant et la température superficielle du cylindre.

Sur la figure .38 . sont représentées les courbes des valeurs sans dimensions. Il est recommandé d'utiliser la courbe A.A pour évaluer les coefficients de transmission de la chaleur à partir de fils ou de tuyaux considérés isolément dans des fluides quelconques.

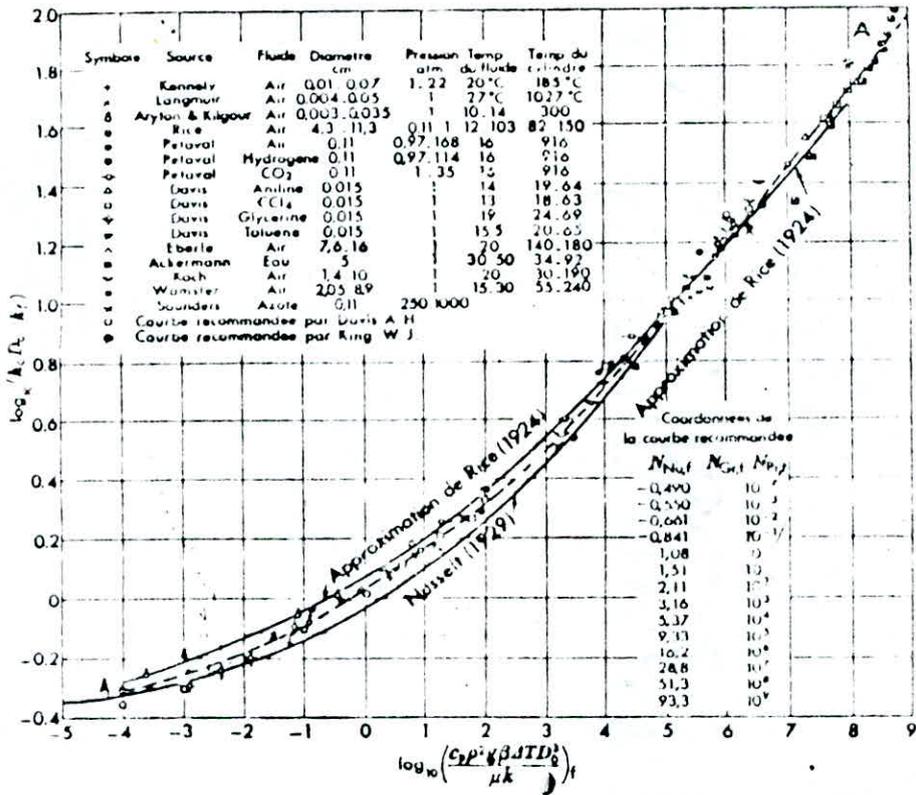


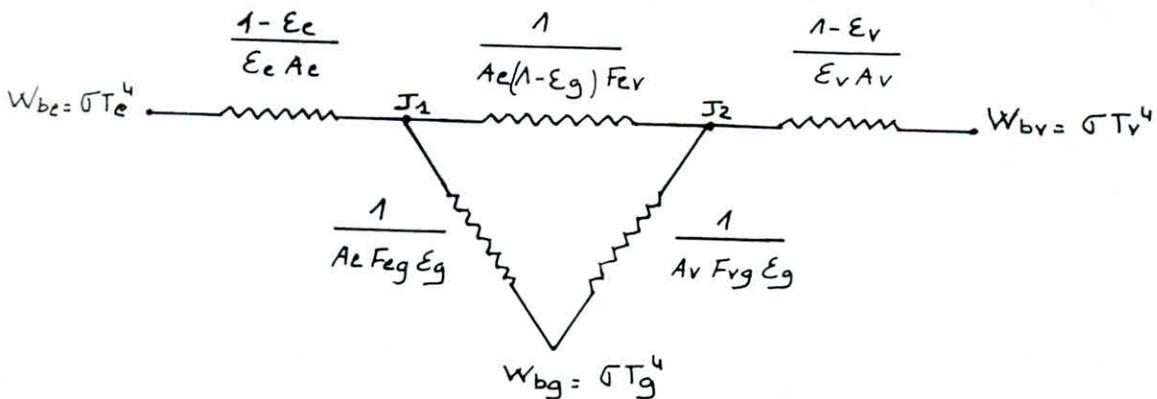
FIG. 9-30 - Corrélations entre les données pour la transmission de chaleur par convection naturelle à partir des cylindres horizontaux dans des gaz et des liquides (Par autorisation de W. H. McADAMS, Heat Transmission, 3ed., New York: Mc Graw-Hill Book Company Inc. 1954)

3.3 Échange de chaleur siégeant dans le caisson.

Le rayonnement émanant de la surface du corps noir passe à travers la masse gazeuse, certaines régions du spectre infra-rouge sont absorbées. Le spectre infrarouge du gaz est dû à des changements quantiques simultanés des niveaux d'énergie de rotation et de vibration interatomique des molécules.

Le problème peut être traité par l'analogie électrique.

Le réseau électrique équivalent à l'échange de chaleur par rayonnement entre l'élément chauffant, le gaz et le caisson, (en considérant que toute la surface des parois du caisson est irradiée uniformément) se présente comme suit :



3.10. réseau équivalent à l'échange de chaleur par rayonnement.

La quantité de chaleur échangée entre le cylindre le gaz et les parois de l'enceinte peut être déterminée quantitativement puisqu'elle correspond à la puissance absorbée par l'élément chauffant.

$$\Phi = UI \cdot 0.96 \quad [W] \quad 3.18$$

Cette puissance calorifique n'est pas égale exactement à celle fournie par l'alimentation stabilisée car des pertes dans les câbles conducteurs et dans les câbles supportant l'élément chauffant, non négligeables doivent être pris en considération.

Nous ne pouvons estimer avec exactitude la quantité de chaleur perdue par les câbles de supports vu qu'on ne connaît pas les caractéristiques physiques des câbles et de leur isolant, de ce fait, on utilisera l'équation proposée par le constructeur dans le calcul de l'effet des câbles.

$$\Phi_{\text{câbles},s} = 0.0017 (T_c - T_v) [W] \quad 3.19$$

Le fait de l'existence des pertes au niveau des câbles porteurs nous amène à corriger la surface de l'élément chauffant d'une certaine fraction de sa surface A_e qui échangerait la même quantité que celle perdue par les câbles. Nous ne ferons pas les calculs pour déterminer cette surface équivalente pour les mêmes raisons citées précédemment et nous adopterons ici aussi la valeur proposée par le constructeur qui est $1.02 A_e$.

Les pertes par effet joule dans les câbles d'alimentation doivent être pris en considération. Ils correspondent aux 17% de la puissance de chauffe mesurée fournie au cylindre.

Ce chiffre est à l'origine de l'estimation faite par le constructeur, donc les pertes dans les câbles d'alimentation s'expriment:

$$Q_{\text{câbles},a} = 0,17 UI \quad [W] \quad 3.20$$

3.3.1 Flux de chaleur transmis par l'élément chauffant.

En tenant compte des pertes dans les câbles de support et d'alimentation, nous pouvons corriger la puissance de chauffage

On rappelle les pertes dans les différents câbles:

$$Q_{\text{câbles},s} = 0,0017 (T_e - T_v) \quad [W]$$

$$Q_{\text{câbles},a} = 0,17 UI \quad [W]$$

Ainsi la puissance réelle de chauffage vaut:

$$\Phi = UI \, 0,96 - 0,0017 (T_e - T_v) \quad [W] \quad 3.21$$

Et le flux de chaleur transmis par l'élément chauffant:

$$q = \frac{\Phi}{1,02 \cdot A_c} \quad [W/m^2] \quad 3.22$$

$$q = q_r + q_c$$

3.3.2. Quantité de chaleur échangée par convection.

Reprenons l'équation 3.17 obtenue à partir de corrélation entre le nombre de Nusselt et le produit (Gr, Pr) celle-ci nous permet de calculer le coefficient d'échange par convection h_c .

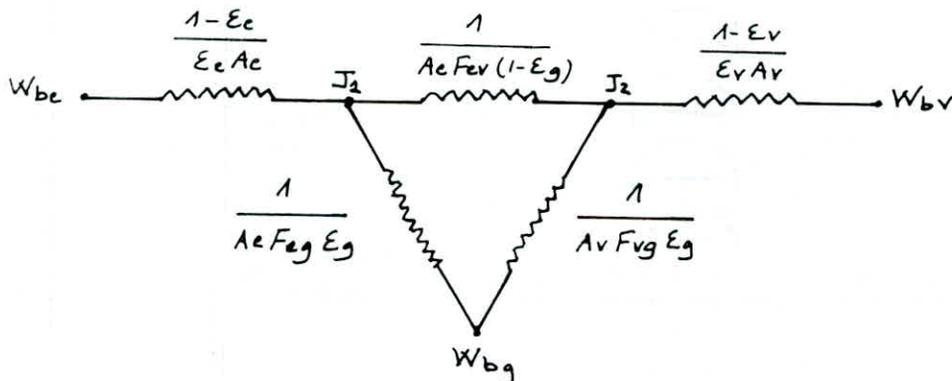
$$h_c = \frac{K}{d} \cdot 0,47 (Gr, Pr)^{0,25}$$

ainsi la quantité de chaleur échangée par convection est donnée par

$$\dot{Q} = 1.02 A_c h_c (T_e - T_v) \quad 3.23$$

3.3.3 Quantité de chaleur échangée par rayonnement

Reprenons le réseau équivalent à l'échange de chaleur par rayonnement:



L'élément chauffant ainsi que le gaz se trouvent entièrement entourés par l'enceinte donc les facteurs d'angles F_{ev} , F_{eg} , F_{vg} valent l'unité.

$$F_{ev} = F_{vg} = F_{eg} = 1 \quad 3.24$$

la surface de l'élément est calculée exactement et vaut :

$$A_e = \left(2\pi \frac{d^2}{4} + \pi d l \right) = 32.27 \text{ cm}^2$$

En supposant que l'enceinte est entièrement cylindrique la surface participant à l'échange est estimée à :

$$A_v = \left(2\pi \cdot \frac{D^2}{4} + \pi D H \right) = 9668.55 \text{ cm}^2$$

Étant donné que la surface de l'enceinte est très grande, on pourrait négliger la résistance de surface du caisson.

$$\frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v A_v} = 0$$

Il s'ensuit que le nœud J_2 se confond avec le potentiel W_{bv}

$$J_2 = W_{bv} = \sigma T_v^4 \quad 3.25$$

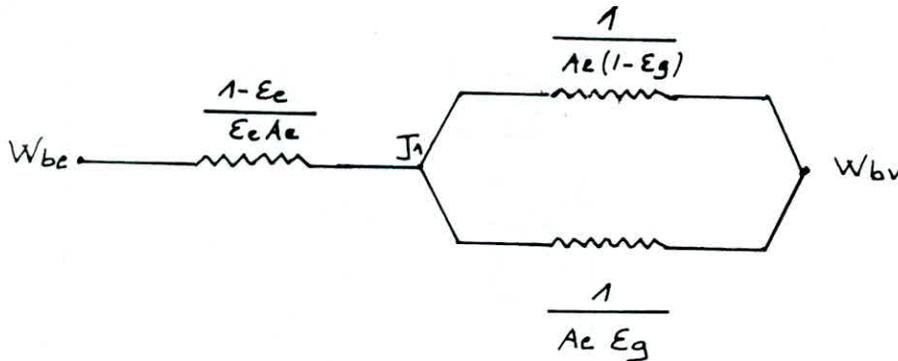
Si on suppose que la température du gaz est celle mesurée sur la paroi du caisson après l'équilibre thermique.

$$T_g = T_v \quad 3.26$$

Ce qui nous amène à déduire que :

$$J_2 = W_{bv} = W_{bg} \quad 3.27$$

Le réseau équivalent devient :

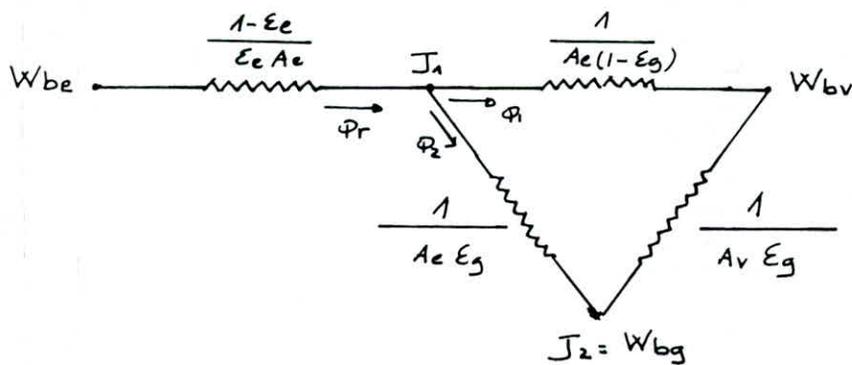


Le flux de chaleur échangé par rayonnement relatif au réseau ci-dessus est :

$$q_r = \frac{W_{bc} - W_{bv}}{\frac{1 - \epsilon_e}{\epsilon_e A_e} + \frac{1}{A_e}} \quad 3.28$$

On remarque que l'expression de q_r ne fait pas intervenir l'émissivité du gaz ϵ_g , qui est le but de notre travail.

On ne doit donc pas écrire que $T_v = T_g$, hypothèse trop simplificatrice dans ce cas le réseau devient :



La quantité de chaleur échangée par rayonnement est obtenue simplement en retranchant au flux total la quantité de chaleur échangée par convection.

$$\Phi_r = \Phi - \Phi_c. \quad 3.29$$

3.34 Evaluation théorique de l'émissivité du gaz : ϵ_g

L'équilibre thermique du nœud J_1 nous permet d'établir l'équation suivante :

$$\Phi_r = \Phi_1 + \Phi_2 \quad 3.30$$

$$\Phi_r = \frac{J - W_{bv}}{\frac{1}{A_e(1-\epsilon_g)}} + \frac{J - W_{bg}}{\frac{1}{A_e \epsilon_g}} \quad 3.31$$

on peut aussi exprimer Φ_r par la relation suivante :

$$\Phi_r = \frac{W_{be} - J_1}{\frac{1-\epsilon_e}{A_e \epsilon_e}} \quad 3.32$$

L'équilibre thermique du nœud J_2 permet d'écrire :

$$\frac{W_{bg} - J}{\frac{1}{\epsilon_g A_c}} = \frac{W_{bg} - W_{bv}}{\frac{1}{A_v \epsilon_g}} \quad 3.33$$

Connaissant l'émissivité de l'élément cylindrique ϵ_c on détermine la densité de flux de rayonnement effectif J à partir de l'équation 3.32.

$$J = W_{bc} - \Phi_r \left(\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c A_c} \right) \quad 3.34$$

L'équation 3.33 nous donne la température du gaz :

$$W_{bg} = \frac{A_c J + A_v \sigma T_v^4}{A_v + A_c} \quad 3.35$$

$$W_{bg} = \sigma T_g^4 \Rightarrow T_g = \left(\frac{W_{bg}}{\sigma} \right)^{1/4} \quad 3.36$$

l'émissivité peut ainsi être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\epsilon_g = \frac{\Phi_r / A_c + (W_{bv} - J)}{(W_{bv} - W_{bg})} \quad 3.37$$

$$\epsilon_g = \frac{\Phi_r / A_c + (\sigma T_v^4 - J)}{\sigma (T_v^4 - T_g^4)} \quad 3.37a$$

CHAPITRE 4

LES ESSAIS

4.1 Description de la manipulation :

La procédure de mise en marche de l'appareil est donnée en début du Chapitre 2 .

La première étape de notre manipulation, consiste à faire le vide à l'intérieur du caisson. On vérifie que la pression la plus basse est atteinte, elle est de l'ordre de 0.05 mm Hg.

Une bouteille de dioxyde de carbone, comprimée à 60 bars, est raccordé à l'enceinte. Le dioxyde de carbone contient des impuretés dont la plus grande proportion est la vapeur d'eau, c'est pourquoi nous procéderons à la déshumidification du gaz en le faisant passer dans une colonne de Tamis moléculaire.

Le Tamis moléculaire utilisé se présente sous forme de perles ayant une granulométrie de 2 mm et des interstices de 3Å.

Ainsi la bouteille de dioxyde de carbone est reliée d'abord à la colonne de Tamis moléculaire à l'aide d'un tuyau en plastique puis raccordé ensuite à l'enceinte .

Le raccordement étant réalisé, on ouvre la bouteille de gaz, un mono. détendeur nous permet de régler la pression de sortie à 1,5 bars (cette pression représente aussi la pression d'entrée de l'enceinte).

On ouvre la vanne d'alimentation puis on la ferme une fois que la pression désirée est atteinte .

A l'élément cylindrique suspendu à l'intérieur du caisson est fournie une puissance de chauffe électrique $W = UI$, qui portera l'élément à une certaine température T_e . suite à cet échauffement, il échangera de la chaleur avec le dioxyde de Carbone se trouvant à l'intérieur du caisson et les parois de ce dernier qui à l'équilibre thermique sont portées à la température T_v .

la pression du gaz étant fixée à 1 barns, on fait varier la puissance de chauffe, une fois l'équilibre établi, on fait la lecture de la pression, la température, de la tension et du courant après avoir vérifié la stabilité de ces données :

ii. la température est donnée par l'indicateur à affichage numérique.

Et au moyen du commutateur de thermocouple on prélève les températures de l'élément et du caisson obtenues successivement.

ii. la valeur de la pression est indiquée par le manomètre en tube en "U".

Remarque:

le temps nécessaire pour atteindre la stabilité des données expérimentales varie avec la pression et la différence de température. Il est conseillé, alors, de noter des observations répétées toutes les deux minutes de la température de l'élément qui serviront d'indication.

Avant chaque expérience, le tamis moléculaire doit être déshumidifié en le faisant passer à l'étuve pendant 24 h à une température de 300°C .

4.2 Analyse du dioxyde de Carbone par spectroscopie I.R

La spectroscopie infrarouge permet l'identification des constituants d'un composé au groupement fonctionnel.

4.2.1 Principe de l'absorption.

Dans une molécule, les atomes se trouvent dans certains états de vibration. La répartition des électrons est asymétrique à cause de la différence d'électronégativité. C'est la raison pour laquelle des changements de moments dipolaires de fréquence déterminée ont lieu dans des éléments de structure moléculaire.

La fréquence d'une telle oscillation dépend de la force de liaison et de la masse des atomes concernés.

Si le rayon incident a la même fréquence que celle de l'oscillation d'un des éléments de structure, il y a absorption du rayon.

L'énergie de vibration de la particule concernée augmente et la molécule passe à un état excité.

4.2.2 Résultats de l'analyse.

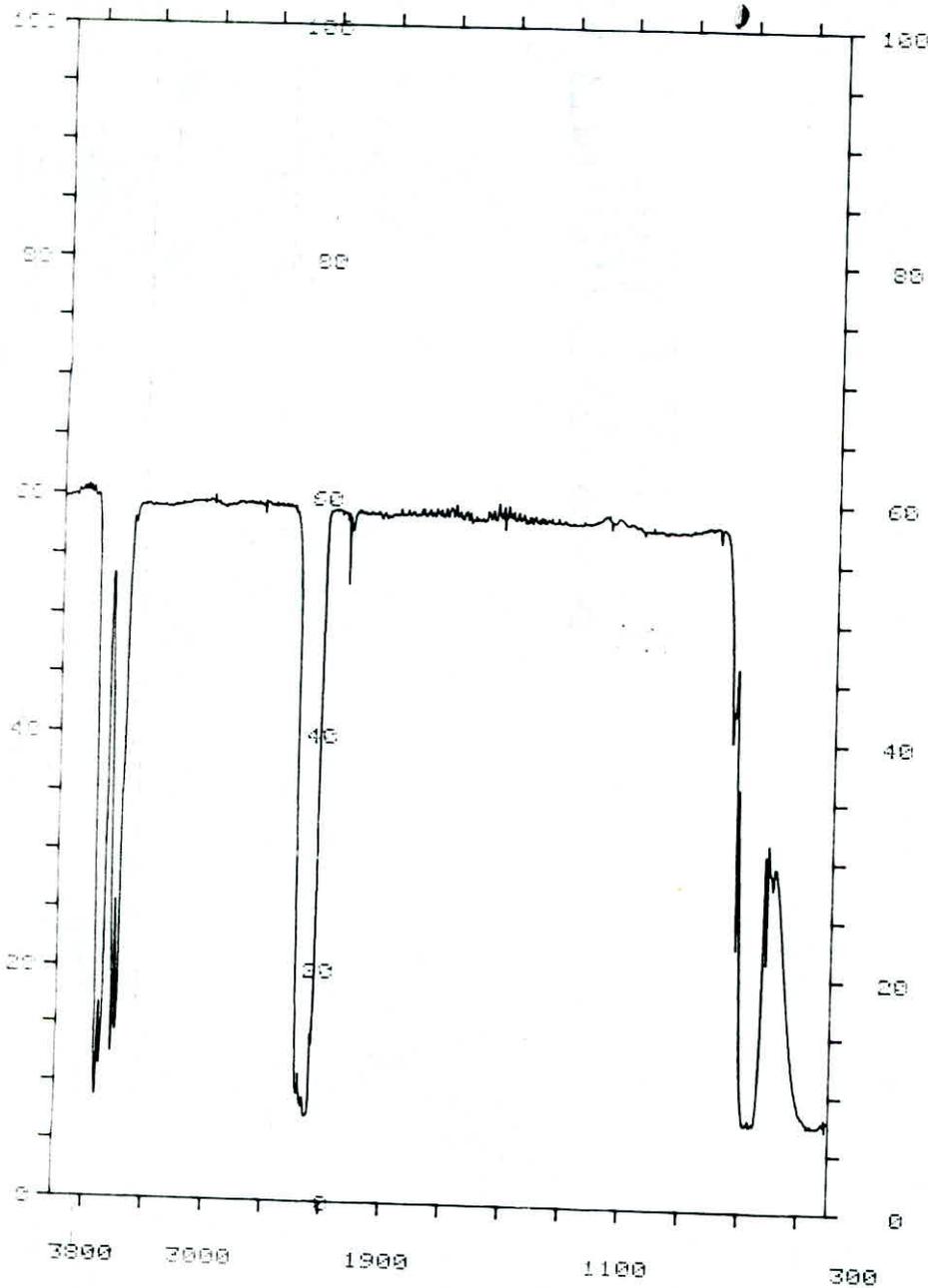
Un échantillon de dioxyde de Carbone ayant servi à notre expérience a été prélevé au moyen d'une cellule à gaz après

son passage par la colonne de Tamis moléculaire, puis examiné en I.R.

Le spectre obtenu dans la figure 4-2 représente les deux bandes fondamentales d'absorption du dioxyde de Carbone situées à 2369 cm^{-1} et 667 cm^{-1} .

Cet examen révèle aussi la présence de vapeur d'eau, ce qui explique que le gaz contenu dans le caisson contient de l'humidité malgré son passage par la colonne de Tamis moléculaire.

Figure 4-2 : Spectre I.R du Dioxyde de Carbone.



PERKIN-ELMER 983

DATE 3.01.1988

SAMPLE gaz CO₂

OPERATOR Melle MEBARWI

SCAN MODE 4
 NOISE FILTER 1
 RESOLUTION 3.0
 ORDINATE MODE %T
 RANGE 4000.0- 400.0
 ABSO. SCALE 0.25

PEAK THRESHOLD 2 %T	
CM-1	%T
3728.0	8.56
3704.0	11.35
3625.0	12.41
3600.0	14.27
2307.0	7.20
2078.0	52.77
741.0	40.02
720.0	22.47
665.0	7.20
617.0	21.10

4.3 Présentation des résultats.

Tout en gardant la pression constante à une atmosphère, nous avons pris les températures de l'élément chauffant et du caisson pour différentes valeurs de la puissance de chauffe.

On a manipulé pour huit valeurs de la puissance de chauffe.

Les propriétés physiques K, ρ, μ, β , intervenant dans les nombres adimensionnels ont été prises pour la température T_m , correspondant à la moyenne arithmétique de la température du cylindre et du gaz, prise en première approximation égale à celle de l'enceinte.

Un programme sur ordinateur nous donne les résultats présentés dans le tableau.

```

10 D=.00831:AE=.003227:AV=.966855:SEGMA=5.669E-08:G=9.810001:EE=.964
11 INPUT "LA TENSION =",U
12 INPUT "L'INTENSITEE =",I
13 INPUT "LA TEMPERATURE DE L'ELEMENT =",TE
14 INPUT "LA TEMPERATURE DU CAISSON =",TV
15 INPUT "LA DENSITE =",DE
16 INPUT "BETA =",BE
17 INPUT "VISCOSITE =",MU
18 INPUT "LE NB DE PRANDTL =",PR
19 INPUT "LA CONDUSTIBILITE =",K
117 Q1=U*I*.96-.0017*(TE-TV)
118 GR=(DE^2)*D^3*BE*(TE-TV)*G)/(MU^2)
119 NU=.07*((GR*PR)^.25)
120 HC=K/NU*D
121 QC=HC*1.02*AE*(TE-TV)
122 QR=Q1-QC
123 J=SEGMA*(TE^4)-QR*(1-EE)/(EE*AE)
124 TB=(J+AE*J+AV*SEGMA*(TV^4))/(AV+AE)/SEGMA^.25
125 EG=(QR/AE+(SEGMA*(TV^4)-J))/(SEGMA*(TV^4)-(TG^4))
126 PRINT "LA VALEUR DE L'EMISSIVITE =",EG;"TG =",TG
127 GOTO 12

```

U (Volts)	10,5	10	9,5	9	8,5	8	7,5	7
I (Amp)	1	0,925	0,875	0,84	0,80	0,75	0,7	0,65
$W = UI$ (Watts)	10,5	9,25	8,31	7,56	6,8	6,0	5,25	4,55
T_e °K	419	405	396,3	389,5	379,6	373,3	363,5	357
T_r °K	289,6	288,6	288,6	288,7	289	289,5	289,8	289,8
$T_m = \frac{T_e + T_r}{2}$ °K	354,3	346,8	342,5	339,1	334,3	331,4	326,65	323,4
$\Delta T = T_e - T_r$ °K	129,4	116,4	107,6	100,8	90,6	83,8	73,7	67,2
T_g °K	290,35	289,23	289,26	289,21	289,43	289,88	290,12	290,08
Φ (Watts)	9,86	8,68	7,79	7,086	6,37	5,62	4,914	4,25
Φ_r (Watts)	3,99	3,54	3,138	2,785	2,61	2,20	2,00	1,66
Φ_c (Watts)	5,87	5,14	4,652	4,301	3,76	3,42	2,914	2,59
K (W/m·K)	0,0205	0,0205	0,0208	0,0209	0,0209	0,0208	0,0208	0,0208
h_c (W/m²·K)	13,77	13,42	13,15	12,96	12,62	12,37	11,98	11,74
$\mu \cdot 10^4$ (Kg/m.s)	17,2	17,29	17,3	17,3	17,4	17,45	17,48	17,52
ρ (Kg/m³)	1,536	1,536	1,537	1,544	1,544	1,543	1,544	1,544
Pr	0,755	0,755	0,755	0,754	0,754	0,754	0,754	0,754
Gr	8774,77	7893,23	7296,48	6496,64	5839,24	5400,98	4750,03	4433,1
Nu	4,24	4,13	4,05	3,93	3,82	3,75	3,64	3,55
$Gr \cdot Pr$	6624,95	5959,38	5508,84	4898,46	4402,78	4072,34	3581,52	3265,65
E_g	15,63	5,51	-2,91	-1,37	-2,67	-5,5	-8,66	-24,11

Tableau 41

Les quantités de chaleur calculées ainsi que l'émissivité sont entachées d'erreurs dues aux appareils de mesure, donc un calcul d'erreur s'impose:

4.3.1 Calcul d'erreur sur le flux de chaleur total:

La puissance de chauffe apportée à l'élément s'exprime par:

$$\Phi = UI \cdot 0,96 - 0,0017 (T_e - T_v)$$

En passant au logarithme et en dérivant):

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = \frac{1}{\Phi} \left[0,96 \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right) UI \right] + 0,0017 [\Delta T_e + \Delta T_v]$$

Les instruments de mesures électriques (Voltmètre et Amperemètre) sont de classe 1,5. l'erreur relative due à ces appareils se calcule comme suit:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\text{Calibre} \times \text{classe}}{100} = \frac{1 \cdot 1,5}{100} = 1,5\%$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\text{Calibre} \times \text{classe}}{100} = \frac{15 \cdot 1,5}{100} = 22,5\%$$

La lecture des températures sur l'indicateur digital s'effectue avec une erreur de $\pm 2\%$.

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = \frac{\Delta T_v}{T_v} = \pm 0,02$$

l'expression relative sur la quantité de chaleur totale.

$$\frac{\Delta \Phi}{\Phi} = \frac{1}{\Phi} \left[0,96 UI \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right) + 0,0017 (\Delta T_e + \Delta T_v) \right] = 24,7\%$$

$$\Delta \Phi = 2,44 \text{ W} \quad \Phi = (9,86 \pm 2,44) \text{ W}$$

4.3.2 Calcul d'erreur sur le coefficient d'échange de chaleur par Convection.

l'expression de h_c est donnée par :

$$h_c = 0,47 \frac{\text{K}}{\text{d}} \left[\frac{d^3 \rho^2 g \Delta T \cdot \beta \cdot Pr}{\mu^2} \right]^{0,25}$$

l'expression relative sur h_c est :

$$\frac{\Delta h_c}{h_c} = \frac{\left[\frac{\Delta T_e}{T_e} + \frac{\Delta T_v}{T_v} \right] \frac{T_e}{T_v}}{4 \left(\frac{T_e - T_v}{T_v} \right)^{5/4}} = 3,96\%$$

$$h = (13,77 \pm 0,545) \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

4.3.3 Calcul d'erreur sur la quantité échangée par convection :

l'expression du flux de chaleur échangé par convection :

$$\Phi_c = 1,02 \cdot h_c \cdot A_e (T_e - T_v).$$

L'erreur relative sur la quantité de chaleur échangée par convection:

$$\frac{\Delta \varphi_c}{\varphi_c} = \left[\frac{\Delta h_c}{h_c} + \frac{\Delta T_e + \Delta T_v}{T_e - T_v} \right] = 14,85\%$$

$$\Delta \varphi_c = 0,88 \quad \varphi_c = (5,95 \pm 0,88) \text{ W}$$

4.3.4 Calcul d'erreur sur la quantité de chaleur échangée par rayonnement.

l'expression de cette quantité rayonnée s'exprime par:

$$\varphi_r = \varphi - \varphi_c.$$

l'expression de l'erreur relative est:

$$\frac{\Delta \varphi_r}{\varphi_r} = \frac{1}{\varphi_r} [\Delta \varphi + \Delta \varphi_c] = 86\%$$

$$\Delta \varphi_r = 3,32 \text{ W} \quad \varphi_r = (3,993 \pm 3,32) \text{ W}$$

4.3.5 Calcul d'erreur sur la densité de flux de rayonnement

l'expression de la densité de flux de rayonnement est telle que.

$$J = \sigma T_e^4 + \varphi_r \left(\frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c \lambda_c} \right)$$

l'erreur relative sur J est donnée par :

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{1}{J} \left[4\sigma T_e + \varphi_r \left(\frac{1-\epsilon_e}{A_e \epsilon_e} \right) \left[\frac{\Delta \varphi_r}{\varphi_r} + \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_e (1-\epsilon_e)} \right] \right] = 12,2\%$$

$$\Delta J = 207 \text{ W/m}^2 \quad J = (1701,01 \pm 207) \text{ W/m}^2$$

4.3.6 Calcul d'erreur sur la température du gaz :

l'expression de la température du gaz s'exprime comme suit :

$$\frac{\Delta T_g}{T_g} = \frac{1}{T_g^4} \left[\frac{1}{A_v + A_e} \right] \left[\frac{A_e}{4\sigma} \cdot \Delta J + A_v \Delta T_v \cdot T_v^3 \right] = 2\%$$

$$\Delta T_g = 5,85 \quad T_g = (290,35 \pm 5,85) \text{ } ^\circ\text{K}$$

4.3.7 Calcul d'erreur sur l'émissivité :

$$\epsilon_g = \frac{\varphi_r / A_e + (\sigma T_v^4 - J)}{\sigma (T_v^4 - T_g^4)}$$

les différentes erreurs remplacées dans les équations précédentes, par leurs valeurs respectives nous permettent d'aboutir à l'expression de l'erreur sur l'émissivité.

$$\Delta \epsilon_g = \frac{1}{A_e \sigma \epsilon_g} \left[\frac{\Delta Q_r}{Q} + \frac{T_v \cdot 4 \Delta T_v + T_g^3 \cdot 4 \Delta T_g}{T_v^4 - T_g^4} \right] \cdot \left[\frac{Q_r}{T_v^4 - T_g^4} \right] +$$

$$\frac{1}{\sigma \epsilon_g} \left[\frac{\sigma T_v^3 4 \Delta T_v + \Delta J}{\sigma T_v^4 - J} + \frac{T_v^3 4 \Delta T_v + T_g^3 \cdot 4 \Delta T_g}{T_v^4 - T_g^4} \right] \cdot \left[\frac{\sigma T_v^4 - J}{T_v^4 - T_g^4} \right]$$

$$\frac{\Delta \epsilon_g}{\epsilon_g} = 1,028$$

$$\Delta \epsilon_g = 16,067$$

$$\epsilon_g = 15,65 \pm 16,067$$

4.5 Conclusion

Les erreurs de mesures et certaines hypothèses simplificatrices, nous ont introduit des erreurs dans les résultats. Cela s'est traduit par des émissivités supérieures à l'unité et même négatives.

Un examen des sources probables d'erreurs est nécessaire.

Nous remarquons que les instruments de mesures extérieures utilisés, bien que plus précis que ceux fournis avec le banc d'essai nous introduisent une erreur allant jusqu'à 25%. ce qui est non négligeable.

De plus dans l'hypothèse d'une résistance de surface du caisson négligeable, des réserves doivent être faites, telles qu'une émissivité des parois suffisamment faible.

Aussi l'uniformité de la répartition des températures de l'élément, du caisson et du gaz, peut ne pas être réalisée une fois le régime permanent atteint.

L'analyse du gaz étudié révèle la présence de vapeur d'eau, le spectre infrarouge d'un échantillon présente un pic important dans la frange correspondante.

Toutes les grandeurs mesurées, notamment le courant, la différence de potentiel et les différentes températures sont entachées d'erreurs dues

aux appareils de mesures utilisés. Comme ces grandeurs interviennent directement dans le calcul du flux de chaleur total transmis par l'élément chauffant qui est à la base de tout les calcul qui suivent, les erreurs s'accumulent de cette manière pour donner des incertitudes beaucoup plus importantes.

Nous savons que l'importance relative des divers mécanismes de transmission de la chaleur d'un corps à un autre diffère beaucoup selon la température. Il résulte qu'aux basses températures, la plus grande partie de la chaleur est transmise par convection et par conduction, tandis qu'aux températures élevées, le rayonnement est le facteur déterminant de cette transmission.

Le coefficient d'échange de chaleur par convection influe beaucoup sur la quantité de chaleur transmise par convection du fait qu'il est inversement proportionnel à la différence de température donnant naissance à ce phénomène. Alors, l'évaluation du coefficient de transmission de la chaleur par convection et l'étude de sa variation avec la pression qui est à l'origine de sa fluctuation, sont indispensables pour mettre en évidence les pertes de chaleur par convection.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS

On s'est proposé de déterminer l'émissivité du dioxyde de Carbone et de vérifier le principe dû à Hottel et Eckert. Les résultats de cette étude n'ont pas été satisfaisants.

La vérification de ce principe exige beaucoup de précautions quant aux conditions de travail, les valeurs des émissivités obtenues théoriquement à partir de la figure 3.4 et pour les conditions de l'expérience sont comprises entre 0.15 et 0.18, les mesures nécessitent donc une très bonne précision.

En se basant sur l'analyse dimensionnelle, il est possible de déterminer le nombre de Nusselt connaissant le produit $(Gr.Pr)$, et d'en déduire le coefficient d'échange par convection.

A la lumière de notre travail, il apparaît que l'émissivité et le coefficient d'échange sont déterminants dans les phénomènes de rayonnement et de convection naturelle.

L'adjonction d'appareils de mesures extérieurs plus précis que ceux que nous avons utilisés serait souhaitable afin de diminuer le plus possible les erreurs introduites lors du relevé des différents paramètres.

La déshumidification du gaz contenu dans l'enceinte doit probablement être plus poussée. Il serait nécessaire pour cela de réduire la vitesse d'écoulement du gaz à de faibles valeurs dans la colonne.

de tamis moléculaire en soumettant celle-ci à de faibles dépressions.

Une solution pourrait être d'interposer entre la colonne et le caisson, un réservoir tampon.

Afin de diminuer les risques d'erreurs relatifs à une non uniformité de la température du gaz entre l'élément chauffant et les parois du caisson, il serait nécessaire de mesurer et de contrôler les variations de cette température en fonction des espaces ainsi que celle du caisson.

En tenant compte de toutes ces considérations et en limitant au maximum les risques d'erreurs, nous aurions, peut être, pu arriver à des résultats plus proches de la réalité.

REFERENCES.

- 1 : *Transmission de la chaleur* - W. H. Mc Adams.
- 2 : *Transmission de la chaleur et thermodynamique* - F. KREITH
- 3 : *Initiation aux transferts Thermique* - J. F SACCADURA.

