

MEMOIRE

présenté

à

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

Comme exigence partielle pour l'obtention du grade de

Maître ès Sciences Appliquées

M.Sc.A

par

Fouad Erchiqui, B.Sc.

---

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE D'UNE CHAMBRE DE  
COMBUSTION PAR LA MÉTHODE DES PLANS IMAGINAIRES

---

novembre 1987



### **Mise en garde/Advice**

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Je dédie ce mémoire à tous ceux et celles qui ont le goût de la recherche et la capacité de faire mieux et plus, plus particulièrement ceux et celles dont l'état des choses les soustrait de leurs moyens.

## RESUMÉ

Grâce à l'ère informatique, la modélisation mathématique fait l'objet d'une meilleure utilisation pour prédire le comportement d'une ou de plusieurs composantes d'un système dans un temps de plus en plus réduit. Ainsi, les grandes industries utilisant des combustibles fossiles comme source d'énergie, et s'intéressant aux différents phénomènes en jeu qui s'établissent dans leurs fournaises, n'ont cessé, avec l'aide de l'ordinateur, d'utiliser des méthodes numériques, pour solutionner le problème complexe et dominant de transfert de chaleur par rayonnement.

La méthode de zones qui permet de résoudre le problème d'échange de chaleur par rayonnement existe depuis trois décennies. La complexité de l'utilisation des principes de base et la difficulté qui en résulte pour la combiner avec d'autres méthodes indispensables à une prédition adéquate des autres phénomènes en jeu dans le système, nous ont amené à développer une technique plus simplifiée, " MÉTHODE DES PLANS IMAGINAIRES ", en visant une réduction de temps. La validité des résultats s'est avérée excellente autant pour les gaz réels que pour les gaz gris. Le temps de calcul est réduit, dépassant le facteur 20 pour certains maillages .

### REMERCIEMENTS

**Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur et co-directeur le Dr André Charette et le Dr R.T.Bui pour la manière dont ils ont orienté mes travaux et m'ont accordé ainsi toute leur confiance.**

**Je remercie également le groupe de l'ingénierie des systèmes pour son soutien financier.**

**Un merci spécial au Dr Y.S.Kocaefe pour toutes les discussions et critiques enrichissantes que nous avons eues.**

**Finalement, un doux merci à mon épouse pour son aide et sa patience dans la correction du texte.**

**TABLE DES MATIÉRES**

<b>RESUMÉ</b>	ii
<b>REMERCIEMENTS</b>	iii
<b>TABLE DES MATIÉRES</b>	iv
<b>LISTE DES APPENDICES</b>	vi
<b>NOMENCLATURE</b>	vii
<b>SYMBOLES GRECS UTILISÉS</b>	ix
<b>INDICES UTILISÉS</b>	i x
<b>DEFINITION DES AIRES D'ÉCHANGE DIRECT</b>	i x
<b>NOMENCLATURE D'UNE ZONE-VOLUME</b>	x
<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>1. MÉTHODE DE ZONES</b>	3
...1.1 Description sommaire	3
...1.2 Équations fondamentales	4
.....1.2.1 Considération préliminaire	4
.....1.2.2 Équations principales	5
...1.3 Méthode de Monte-Carlo	7

<b>2. MÉTHODE DES PLANS IMAGINAIRES</b>	11
...2.1 Principe de la méthode des plans imaginaires	11
...2.2 Analyse en deux dimensions	12
.....2.2.1 Équation de rayonnement pour une surface réelle	13
.....2.2.2 Équation de rayonnement pour une surface imaginaire	15
.....2.2.3 Quelques considérations sur les surfaces imaginaires	17
.....2.2.3.a Direction longitudinale	17
.....2.2.3.b Direction transversale	18
.....2.2.4 Regroupement des équations et méthode de résolution	19
.....2.2.5 Précision sur l'élaboration et l'utilisation des schémas d'écoulement	21
<b>3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</b>	24
...3.1 Maillage (10,3)	24
...3.2 Maillage (5,3)	29
...3.3 Maillage (6,2)	30
.....3.3.1 Cas 1	30
.....3.3.2 Cas 2	30
...3.4 Discussion	31
.....3.4.1 Influence de l'opacité du milieu	31
.....3.4.2 Le temps de calcul	31
.....3.4.3 Influence de la longueur d'une fournaise	32
<b>4. CONCLUSION</b>	59
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	60
<b>ANNEXES</b>	70

**LISTE DES APPENDICES**

<b><u>APPENDICE 1</u></b> .....	<b>PROGRAMMES UTILISÉS</b>	..... 62
<b><u>APPENDICE 2</u></b> .....	<b>FONCTIONNEMENT DES PROGRAMMES</b> .....	65

NOMENCLATURE :

$a_n, a_{l_n}$	: Facteurs de pondération	
$A$	: Aire d'une zone-surface grise réelle	$[m^2]$
$A_r$	: Aire d'une zone-surface fictive dans le sens des X	$[m^2]$
$A_s$	: Aire d'une zone-surface fictive dans le sens des Y	$[m^2]$
$b$	: Matrice	
$B$	: Matrice inverse de b	
$C$	: Vecteur	
$C_p$	: Chaleur massique	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$
$D$	: Matrice	
$DM_1$	: Débit massique dans la direction +Y	$[\frac{kg}{s}]$
$DM_3$	: Débit massique dans la direction -Y	$[\frac{kg}{s}]$
$DM_5$	: Débit massique dans la direction +X	$[\frac{kg}{s}]$
$DM_6$	: Débit massique dans la direction -X	$[\frac{kg}{s}]$
$E_b$	: Émittance de corps noir	$[\frac{W}{m^2}]$
$f_{ij}$	: Facteur de réception entre deux zones i et j	
$f_{g,ij}$	: Facteur de réception entre la zone de gaz i et la surface j	
$f_{ig,j}$	: Facteur de réception entre la surface i et la zone de gaz j	
$f_{g,ig}$	: Facteur de réception entre la zone de gaz i et la zone de gaz j	
$F_{j-k}$	: Facteur de forme entre la surface j et la surface k	
$\overline{gs}_k$	: Aire d'échange direct entre une zone de gaz et une surface k	$[m^2]$
$\overline{G_iG_j}$	: Aire d'échange total entre deux zones de gaz	$[m^2]$
$\overline{GS}_k$	: Aire d'échange total entre une zone de gaz et une surface k	$[m^2]$
$h_k$	: Coefficient de convection entre le gaz et la surface k	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
$H_{ent}$	: Enthalpie d'entrée d'une zone de gaz	$[W]$
$H_{sor}$	: Enthalpie de sortie d'une zone de gaz	$[W]$
$K$	: Coefficient d'absorption	$[\frac{1}{m}]$
$P_{H_2O}$	: Pression partielle de $H_2O$	$[atm]$
$P_{CO_2}$	: Pression partielle de $CO_2$	$[atm]$
$q$	: Chaleur nette	$[\frac{W}{m^2}]$
$q_0$	: Radiosité	$[\frac{W}{m^2}]$
$q_i$	: Éclairement	$[\frac{W}{m^2}]$

$(q_i)_{net}$	: Perte de chaleur nette	$[\frac{W}{m^2}]$
$q_{c,i}$	: Chaleur dégagée par la combustion	$[W]$
$q_{e,i}$	: Diminution de l'enthalpie sensible du gaz circulant à travers une zone de volume et convection à partir de toute surface contigüe	$[W]$
$Q_c$	: Chaleur dégagée par la combustion	$[W]$
$\overline{s_j s_k}$	: Aire d'échange direct entre les surfaces j et k	$[m^2]$
$\overline{S_j S_k}$	: Aire d'échange total entre les surfaces j et k	$[m^2]$
$T_{ag_1}$	: Température d'entrée des gaz par la surface réelle 1	$[K]$
$T_{ag_5}$	: Température d'entrée des gaz par la surface réelle 5	$[K]$
$T_{ag_6}$	: Température d'entrée des gaz par la surface réelle 6	$[K]$
$T_0$	: Température de l'environnement	$[K]$
$T_g$	: Température d'une zone de gaz	$[K]$
$T_{g,k}$	: Température d'une zone de gaz contigüe à la surface A	$[K]$
$T_k$	: Température de la surface k	$[K]$
$U_k$	: Coefficient global de transfert de chaleur entre la surface k et l'environnement	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$V_i$	: Volume de la zone $i$	$[m^3]$
$x$	: point de localisation de la zone de volume (sens X)	$[m]$
$y$	: point de localisation de la zone de volume (sens Y)	$[m]$
$z$	: point de localisation de la zone de volume (sens Z)	$[m]$

SYMBOLES GRECS UTILISÉS:

- $\alpha$  : Facteur d'absorption  
 $\beta$  : Angle avec la normale d'une surface  
 $\delta$  : Delta de Kronecker  
 $\Delta X$  : Longueur de la fournaise  
 $\Delta Y$  : Largeur de la fournaise  
 $\Delta Z$  : Hauteur de la fournaise  
 $\epsilon$  : Facteur d'émission  
 $\sigma$  : Constante Stefan-Boltzmann  
 $\tau$  : Facteur de transmission

INDICE UTILISÉS:

- $j$  : surface  
 $k$  : surface  
 $l$  : chambre  
 $m$  : rangée  
 $n$  : indice de chaque gaz gris

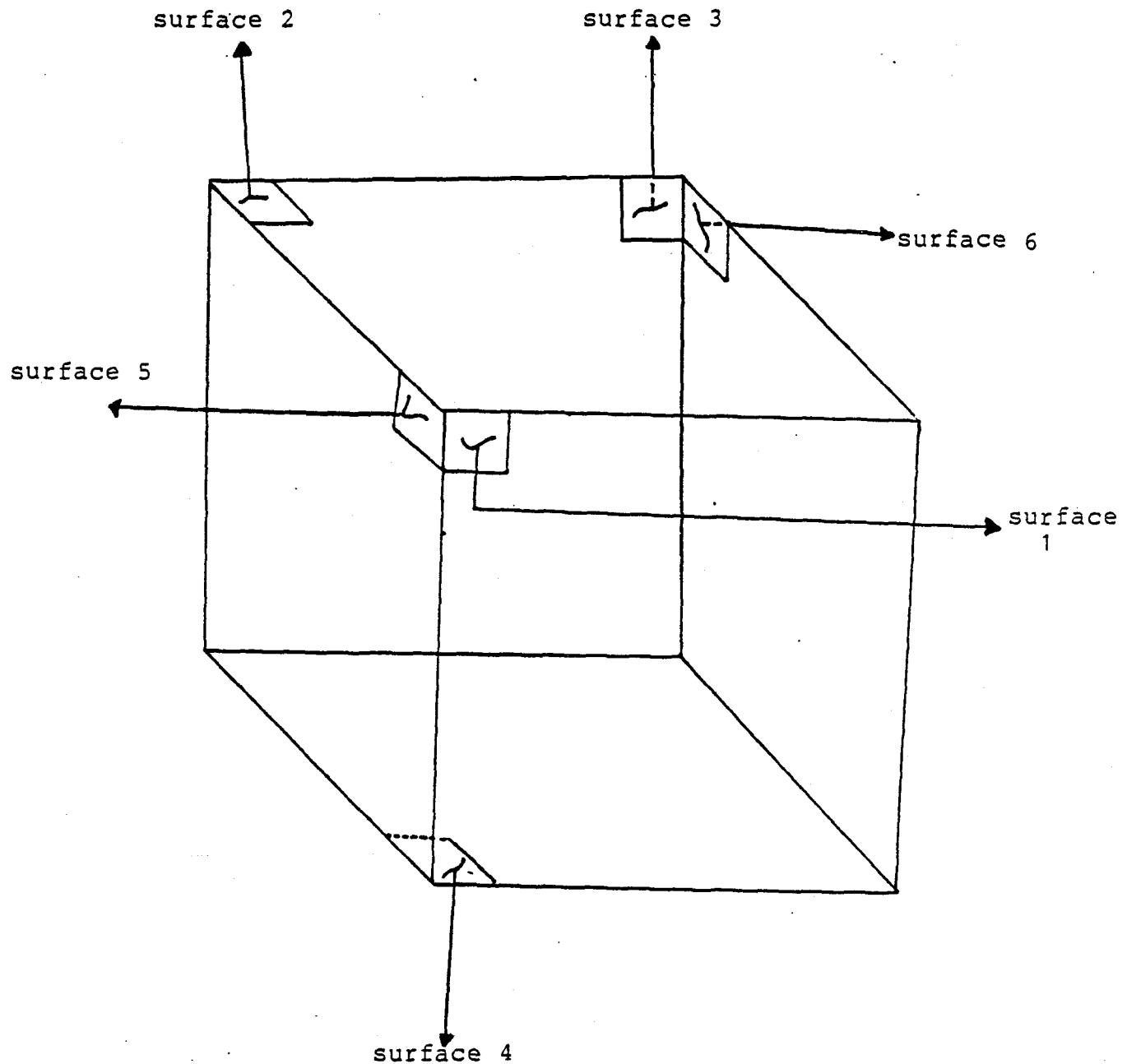
DÉFINITION DES FACTEURS D'ÉCHANGE DIRECT:

$$\begin{aligned}
 \overline{s_j s_k} &= \overline{s_k s_j} = A_j F_{j-k} \bar{\tau}_{j-k} = \int_{A_k} \int_{A_j} \frac{\tau(s) \cos(\beta_k) \cos(\beta_j)}{\pi s^2} dA_k dA_j, \\
 \overline{g s_j} &= \int_{A_k} \int_{A_j} \frac{K \cos(\beta_j) \tau(s)}{\pi s^2} dA_j dV, \\
 A_k F_{j-k} \bar{\alpha}_{j-k} &= A_j F_{k-j} \bar{\alpha}_{k-j} = \int_{A_k} \int_{A_j} \frac{\alpha(s) \cos(\beta_k) \cos(\beta_j)}{\pi s^2} dA_k dA_j
 \end{aligned}$$

Où les facteurs de transmission et d'absorption sont donnés par:

$$\tau(s) = \exp(-ks) \quad \alpha(s) = 1 - \tau(s)$$

et  $s$  est la distance séparant les éléments en question.

NOMENCLATURE D'UNE ZONE-VOLUME

## INTRODUCTION

Dans les échanges thermiques, où interviennent simultanément divers modes de transmission de la chaleur, le rayonnement représente généralement le principal mode pour les chambres de combustion. Celui-ci, très complexe, fait intervenir, pour chaque partie donnée de l'enceinte, des échanges thermiques avec toutes les autres parties du système (autant les parties gazeuses que les parties solides). En plus, sa prédiction nécessite des renseignements détaillés sur l'écoulement, le mélange, les réactions chimiques, ainsi que sur les températures, les propriétés et les orientations géométriques des différentes surfaces de la fournaise. Pour chacun de ces phénomènes, le degré d'interaction avec les autres est aussi à considérer. Il s'ensuit que son traitement mathématique rigoureux est presque impossible pour les cas réels si on ne fait pas intervenir des hypothèses simplificatrices. On est ainsi amené soit à supposer que les schémas d'écoulement et de combustion sont connus par des relations empiriques, soit à les poser a priori d'une façon plus ou moins intuitive.

Habituellement, on utilise deux méthodes pour traiter mathématiquement ce genre de problème, les méthodes de flux et la méthode de zones. Ces deux techniques ont fait l'objet de multiples travaux théoriques et de vérifications expérimentales. Les méthodes de flux sont basées sur une approximation des échanges radiatifs en jeu; les équations obtenues sont sous forme différentielle [1] et leur solution peut être obtenue par une méthode numérique. Toutefois, ces méthodes de flux donnent souvent des résultats inadéquats puisque le rayonnement y est traité comme un phénomène local. Contrairement aux méthodes de flux, la méthode de zones est une méthode rigoureuse [2]; le rayonnement est traité d'une manière non locale, c'est-à-dire qu'il tient compte de la participation de toutes les parties du système. Cette méthode présente toutefois l'inconvénient d'être plus complexe et très longue à traiter, ce qui peut limiter son application dans des situations données. Nos travaux ont porté sur la méthode de zones que nous avons cherché à simplifier de façon à la rendre moins rébarbative aux utilisateurs.

Cette nouvelle technique que nous avons appelée "MÉTHODE DES PLANS IMAGINAIRES" et que nous traitons dans ce mémoire, constitue une extension en deux dimensions

du modèle de B.Ström [3]. Ce modèle concerne le transfert de chaleur par rayonnement dans une fournaise de section rectangulaire. Les équations pertinentes sont décrites, ainsi que le fonctionnement et l'utilisation du programme FORTRAN qui a été développé pour concrétiser ce modèle. Soulignons que l'objectif visé est de réduire le temps de calcul, de façon à ce que le logiciel mis au point soit utilisable par l'industrie.

Les aires d'échange sont calculées par la méthode de Monte-Carlo [4], ce qui nous permet d'utiliser un maillage quelconque.

## CHAPITRE I

### MÉTHODE DE ZONES

Lorsqu' un système thermique comporte plusieurs surfaces de rayonnement, il devient très compliqué de déterminer les flux de chaleur ou les températures de ces surfaces par des méthodes d'analogie physique, par exemple la méthode des circuits thermiques [5]. Aussi recourt-on à des méthodes mathématiques plus systématiques telle la méthode de zones .

#### 1.1 DESCRIPTION SOMMAIRE

Considérons un élément différentiel de volume d'un milieu non isotrope traversé par un faisceau monochromatique d'énergie. Alors, la variation de l'intensité du faisceau est régie par la loi de transfert de rayonnement donnée par:

$$\cos \phi \frac{dI}{dx} = -K_\lambda I + \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} K_\lambda I d\Omega \quad (i)$$

où:

$I = I(x, \phi, \psi, \lambda)$  :Intensité monochromatique de rayonnement

$K_\lambda$  :Coefficient monochromatique d'absorption

$d\Omega$  :Angle solide différentiel

Le premier terme du membre de droite de l'équation (i) représente l'absorption dans le milieu et le deuxième terme traduit l'émission du volume différentiel. Une solution de cette équation intégro-différentielle donnera la distribution de l'intensité monochromatique dans le milieu. Le flux radiatif net s'obtient à l'aide des intégrations sur toutes les longueurs d'ondes et sur toutes les directions. Malheureusement une solution exacte n'est possible que pour des cas simples. Toutefois, la méthode de zones [2] permet d'obtenir une solution approchée au problème et, de ce fait, elle constitue une alternative très intéressante. Cette technique consiste tout d'abord à subdiviser le système en petites zones de surfaces et volumes (éléments finis) dans lesquels les propriétés (telles que la température et la concentration) sont supposées

uniformes. L'élément différentiel de l'équation de transfert est remplacé par l'élément fini (zone), et l'intégration par une sommation sur toutes les zones (autant les surfaces que les volumes). La solution des équations obtenues génère la distribution des températures et des flux de chaleur dans l'enceinte étudiée. Le nombre de zones choisi résulte d'un compromis entre la précision désirée et un temps de calcul souhaité. Malgré la valeur qu'elle apporte pour la description de l'échange radiatif, cette méthode est considérée comme pénible et très longue ; ceci est dû essentiellement à la nécessité de calculer  $n^2$  aires d'échange total ( où  $n$  est le nombre total de zones) ainsi qu'à la non-linéarité des équations à résoudre lorsque des gaz réels sont considérés.

Malgré tout cela, la méthode de zones a été appliquée avec succès dans plusieurs études de modélisation [6,7,8].

## 1.2 ÉQUATIONS FONDAMENTALES

### 1.2.1 Considération préliminaire

Lors de la combustion, la vapeur d'eau et le gaz carbonique présentent un spectre d'émission-absorption localisé uniquement dans l'infra-rouge et composé de bandes distinctes. 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 quand ils sont portés à température élevée. Le facteur total d'émission ou d'absorption d'un mélange de ces éléments (considéré comme gaz réel) est décrit par une somme pondérée de gaz gris fictifs [9], soit:

$$\epsilon_g(T_g) = \sum_{i=0}^n a_i(T_g) [1 - \exp(-K_i L)] \quad (1.1)$$

$$\alpha_g(T_g, T_s) = \sum_{i=0}^n a'_i(T_g, T_s) [1 - \exp(-K_i L)] \quad (1.2)$$

où  $\epsilon_g(T_g)$  et  $\alpha_g(T_g, T_s)$  sont respectivement le facteur d'émission (fonction de la température du volume de gaz émetteur) et le facteur d'absorption (fonction de la température de la source et du volume de gaz émetteur),  $a_i$  et  $a'_i$  sont les coefficients de pondération,  $K_i$  les

coefficients d'absorption des gaz gris fictifs, et  $L$  la longueur moyenne utile. L'approche utilisée pour déterminer les coefficients de pondération est celle de T.F.Smith [9, p.602-608] selon laquelle :

$$a_i(T_g) = \sum_{j=1}^4 c_{i,j} T_g^{j-1} \quad (1.1.a)$$

$$a'_i(T_g, T_s) = \sum_{j=1}^4 \left[ \sum_{k=1}^4 d_{i,j,k} T_s^{k-1} \right] T_g^{j-1} \quad (1.2.a)$$

$$\sum_{i=0}^3 a_i = 1 \quad \sum_{i=0}^3 a'_i = 1 \quad (1.2.b)$$

où  $c_{i,j}$  et  $d_{i,j,k}$  sont des constantes données pour  $\frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2}} = 2$  ( le cas traité dans ce mémoire).

### 1.2.2 Équations principales [10]

Considérons une enceinte fermée en présence d'un tel gaz absorbant. Subdivisons le système en petites zones ( surfaces et volumes ) à l'intérieur desquelles les propriétés sont supposées constantes :

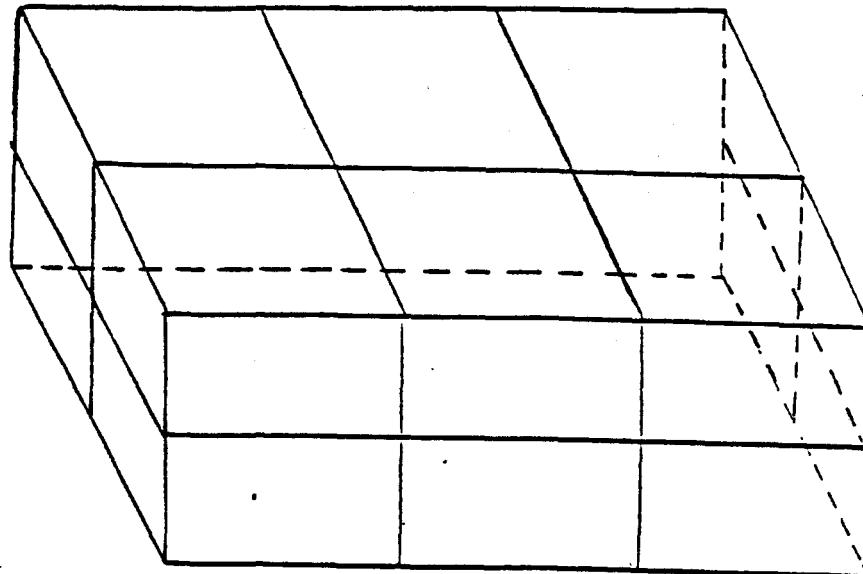


Figure 1.a: Principe de la méthode de zones

Par application du principe de conservation d'énergie sur une paire de zones ( i,j ), l'énergie nette échangée par rayonnement est:

gaz-surface

$$q_{g_i \Rightarrow s_j} = \overrightarrow{G_i S_j} E_{b_{s_i}} - \overleftarrow{G_i S_j} E_{b_{s_j}} \quad (1.3)$$

gaz-gaz

$$q_{g_i \Rightarrow g_j} = \overrightarrow{G_i G_j} E_{b_{s_i}} - \overleftarrow{G_i G_j} E_{b_{s_j}} \quad (1.4)$$

surface-surface

$$q_{s_i \Rightarrow s_j} = \overrightarrow{S_i S_j} E_{b_{s_i}} - \overleftarrow{S_i S_j} E_{b_{s_j}} \quad (1.5)$$

où  $\overrightarrow{S_i S_j}$ ,  $\overleftarrow{S_i S_j}$ ,  $\overrightarrow{G_i S_j}$ ,  $\overleftarrow{G_i S_j}$ ,  $\overrightarrow{G_i G_j}$  et  $\overleftarrow{G_i G_j}$  sont les aires d'échange total dirigé pour chaque paire de zones (surface/surface, volume/surface ou volume/volume). Elles sont définies comme étant le rapport de l'énergie émise dans une direction sur l'émissance noire de l'émetteur (la direction de la flèche étant dans le même sens que le flux rayonnant). Si on est en présence d'un gaz gris, on remplace alors les aires d'échange total dirigé par les aires d'échange total dans les équations fondamentales (1.3), (1.4) et (1.5), soit:

gaz-surface

$$q_{g_i \Rightarrow s_j} = \overline{G_i S_j} (E_{b_{s_i}} - E_{b_{s_j}}) \quad (1.6)$$

gaz-gaz

$$q_{g_i \Rightarrow g_j} = \overline{G_i G_j} (E_{b_{s_i}} - E_{b_{s_j}}) \quad (1.7)$$

### surface-surface

$$q_{s_i \rightarrow s_j} = \overline{S_i S_j} (E_{b_{s_i}} - E_{b_{s_j}}) \quad (1.8)$$

Si la température d'une zone surface  $A_i$  est inconnue, alors la vérification du bilan sur  $A_i$  de la forme suivante est nécessaire:

$$\sum_j \overrightarrow{S_j S_i} E_{b_{s_j}} + \sum_j \overrightarrow{G_j G_i} E_{b_{s_j}} - A_i \epsilon_i E_{b_{s_i}} + h_i A_i (T_{g,k} - T_{s,i}) = (q_i)_{\text{net}} \quad (1.9)$$

et s'il s'agit d'une zone volume  $V_i$ , il faut vérifier le bilan sur  $V_i$ , soit:

$$\sum_j \overrightarrow{G_j G_i} E_{b_{s_j}} + \sum_j \overrightarrow{S_j S_i} E_{b_{s_j}} - \sum_n 4a_n K_n V_i E_{b_{s_i}} + q_{e,i} = q_{e,i} \quad (1.10)$$

Il est à remarquer que, lorsqu'un bilan est réalisé sur un élément de surface ou de volume  $i$ , les sommes sont effectuées à partir de toutes les autres zones  $j$  de l'enceinte. De plus, les équations simultanées obtenues sont non linéaires.

### 1.3 MÉTHODE DE MONTE-CARLO

La raison de l'utilisation de cette méthode numérique est de rendre plus général le calcul des aires d'échange direct (total) entre toutes les paires de zones possibles (surface/surface, surface/volume et volume/volume).

La méthode de Monte-Carlo [4] est une méthode statistique qui repose sur la génération de nombres aléatoires entre 0 et 1, qui peuvent être vus comme étant la probabilité que certains événements (assujettis à des contraintes physiques) se produiront.

Cette technique, grâce à l'ordinateur, permet de déterminer notamment les facteurs de réception, c'est à dire la fraction du nombre de faisceaux émis à partir d'un élément d'aire

$dA_i$  (ou de volume  $dV_i$ ) qui seront absorbés par un autre élément d'aire  $dA_j$  (ou de volume  $dV_j$ ). La séquence suivante concernant l'émission d'un rayon individuel à partir d'une surface  $dA_i$  (ou d'un élément de volume  $dV_i$ ) doit être respectée :

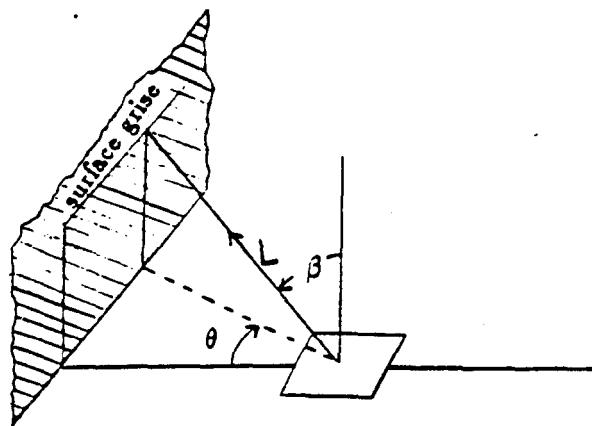


Figure 1.b : Localisation d'un faisceau

### a) Localisation du point de départ

La position du point de départ  $(x, y, z)$  est liée aux nombres aléatoires  $R_1, R_2, R_3$  par:

$$x = R_1 \Delta x + x \quad (1.11)$$

$$y = R_2 \Delta y + y \quad (1.12)$$

$$z = R_3 \Delta z + z \quad (1.13)$$

où:

$x$  : Point de localisation de la zone de volume (sens X)

$y$  : Point de localisation de la zone de volume (sens Y)

$z$  : Point de localisation de la zone de volume (sens Z)

$\Delta x$  : Dimension de la zone selon X

$\Delta y$  : Dimension de la zone selon Y

$\Delta z$  : Dimension de la zone selon Z

**b) Direction de l'émission**

Si le point d'émission est situé sur une surface, alors l'angle polaire  $\beta$  est lié à un nombre aléatoire  $R_4$  par :

$$\sin^2 \beta = R_4 \quad (1.14)$$

Si le point d'émission est à l'intérieur d'un volume, alors l'angle polaire  $\beta$  est lié à un nombre aléatoire  $R_5$  par :

$$\cos \beta = 1 - 2R_5 \quad (1.15)$$

L'angle plan  $\theta$  est le même que ce soit pour l'émission à partir d'une surface ou d'un volume, il est lié à un nombre aléatoire  $R_6$  par :

$$\theta = 2\pi R_6 \quad (1.16)$$

**c) Longueur du trajet**

Pour le cas où le milieu absorbant a des propriétés uniformes le long du trajet suivi par le faisceau, la distance franchie  $L$  est liée au nombre aléatoire  $R_7$  par :

$$L = \frac{-(\ln R_7)}{K} \quad (1.17)$$

où:

K : Coefficient d'absorption.

#### d) Point terminal du faisceau

Une fois le point de départ, la direction et la longueur du trajet déterminés, le faisceau ne doit pas dépasser les limites physiques du système. Si le rayon frappe l'élément d'aire  $dA_j$ , il est facile de déterminer si le faisceau est absorbé; il suffit alors de générer un nombre aléatoire  $R_8$  que l'on compare avec le facteur d'absorption de la surface  $dA_j$ . Lorsque ce nombre aléatoire est inférieur au facteur d'absorption de  $dA_j$ , le faisceau est alors absorbé et on rajoute une unité au bilan des faisceaux absorbés par  $dA_j$ . Sinon, on détermine alors une nouvelle position, une nouvelle direction et une nouvelle longueur et le processus est repris. On reprend cette procédure jusqu'à ce que "N" faisceaux soient émis à partir de  $dA_i$ . On peut ainsi calculer la fraction des faisceaux émis de  $dA_i$  puis absorbés par  $dA_j$  ( $f_{dA_i, dA_j}$ ) ou par le gaz ( $f_{dA_i, g}$ ). Le même principe s'applique aussi pour n'importe quel élément de volume ( $dV_i$ ). Les aires d'échange total peuvent être obtenues par les relations suivantes [11]:

$$\overline{G_i S_j} = 4KV_i(f_{g_i j}) \quad (1.18)$$

$$\overline{S_j G_i} = A_j \epsilon_j(f_{g_i j}) \quad (1.19)$$

$$\overline{S_i S_j} = A_i \epsilon_i(f_{i j}) \quad (1.20)$$

$$\overline{G_i G_j} = 4KV_i(f_{g_i g_j}) \quad (1.21)$$

Par ailleurs, pour une zone de gaz de volume  $V_g$ , les aires d'échange direct  $\overline{s_i s_j}$ ,  $\overline{g s_i}$  et  $\overline{s_i g}$  peuvent être obtenues par les relations suivantes:

$$\overline{s_i s_j} = A_i(f_{i j}) \quad (1.22)$$

$$\overline{g s_j} = 4KV_g(f_{g j}) \quad (1.23)$$

$$\overline{s_i g} = A_i(f_{i g}) \quad (1.24)$$

## CHAPITRE II

### MÉTHODE DES PLANS IMAGINAIRES

#### 2.1) Principe de la méthode des plans imaginaires

Le principe de base de la méthode a été posé par B. Ström [3] et appliqué avec succès à des fournaises rectangulaires à une dimension. La figure 2.a illustre schématiquement un tel système :

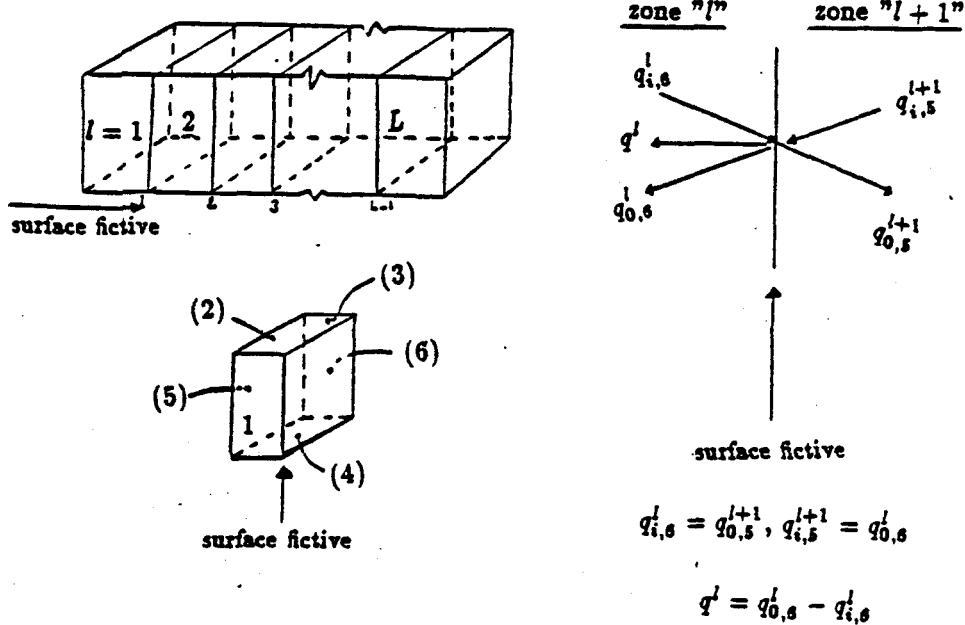


Figure 2.a : Principe de la méthode des plans imaginaires  
(une dimension)

Le système est subdivisé en  $L$  zones de volume séparées l'une de l'autre par  $L - 1$  surfaces imaginaires. Chaque surface imaginaire commune à deux zones-volumes voisines, a pour rôle de ne laisser passer que le rayonnement provenant de l'une ou l'autre de ces zones. Ceci constitue l'idée principale de la méthode des plans imaginaires. Ainsi la zone volume " $l$ " est en interaction avec la zone volume " $l + 1$ " par l'intermédiaire de la surface imaginaire 6 (une même surface imaginaire, peut être identifiée par 5 ou 6 selon qu'elle est considérée par rapport à la zone volume " $l + 1$ " ou " $l$ "). La nature de cette interaction est décrite à la figure

2.a. Cette interaction suppose que les flux incidents  $q_i$  sur la surface 6 venant de la zone " $l$ " sont égaux aux flux émergents  $q_0$  de la même surface 6 mais dirigés vers la zone " $l + 1$ ", et vice-versa. Donc:  $q_{i,6}^l = q_{0,5}^{l+1}$ ,  $q_{i,5}^{l+1} = q_{0,6}^l$  et  $q^l = q_{0,6}^l - q_{i,6}^l$ .

L'idée fondamentale de la technique consiste dans un premier temps à trouver les flux nets aux surfaces imaginaires  $q^l$ ,  $l = 1, \dots, L - 1$ , et dans un deuxième temps, à trouver les flux de chaleur nets aux surfaces réelles en tenant compte de la contribution des surfaces imaginaires. Et cela par l'établissement des équations fondamentales. La méthode permet également de déterminer les températures inconnues.

Soulignons que la méthode des plans imaginaires utilise les aires d'échange direct plutôt que les aires d'échange total.

## 2.2) Analyse en deux dimensions

Considérons une fournaise industrielle rectangulaire et symétrique subdivisée sur sa longueur en  $L$  zones-volumes (séparées l'une de l'autre par  $L - 1$  surfaces imaginaires), et sur sa largeur en  $M$  zones-volumes (séparées l'une de l'autre par  $M - 1$  surfaces imaginaires), donc la fournaise contient  $2ML - M - L$  surfaces imaginaires et  $2ML + 2M + L$  surfaces réelles. La figure 2.b ci-dessous illustre cette subdivision :

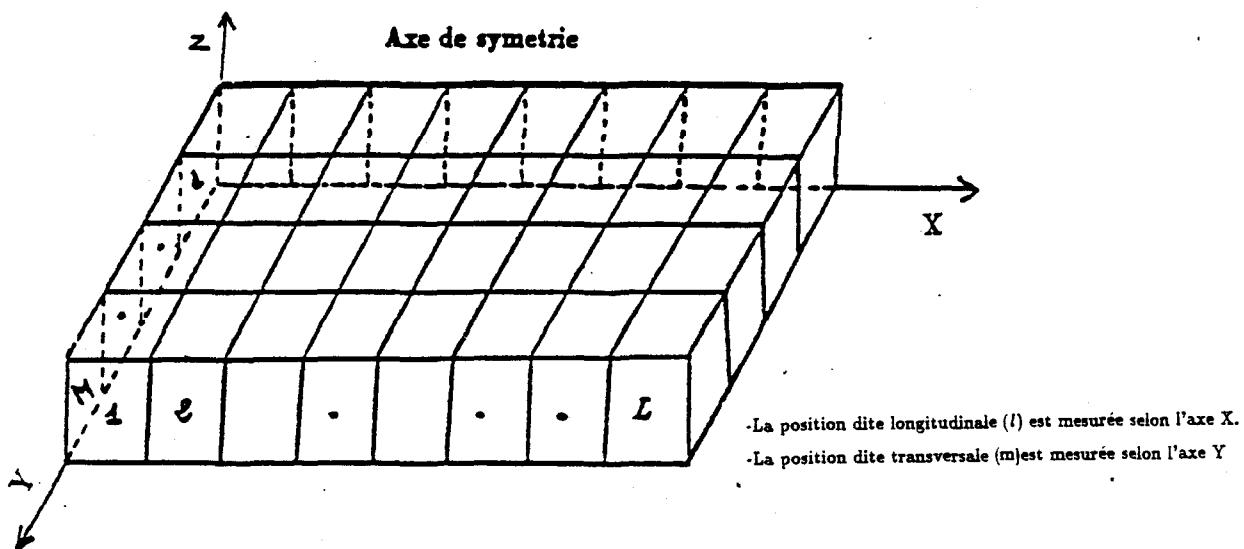


Figure 2.b : subdivision de la fournaise

### 2.2.1 Équation de rayonnement pour une surface réelle

Pour une surface réelle  $k$  ( considérée comme grise ) d'une zone-volume  $(l, m)$  schématisée par la Figure 2.c ci-dessous, l'énergie nette fournie , par application du principe de conservation d'énergie, est:

$$Q_k^{l,m} = q_k^{l,m} A_k^{l,m} = (q_{0,k}^{l,m} - q_{i,k}^{l,m}) A_k^{l,m} \quad (2.1)$$

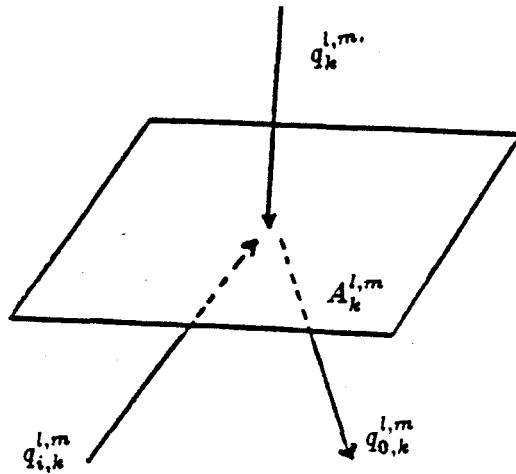


Figure 2.c: Énergie nette fournie à la surface réelle  $k$

Or, la radiosité  $q_{0,k}^{l,m}$  est égale à la somme de l'énergie émise par unité de surface,  $\epsilon_k E_{b_k}$ , et de l'éclairement réfléchi ,  $(1 - \epsilon_k)q_{i,k}$ , par la surface  $k$ , soit :

$$q_{0,k}^{l,m} = \epsilon_k^{l,m} E_{b_k}^{l,m} + (1 - \epsilon_k^{l,m}) q_{i,k}^{l,m} \quad (2.2)$$

Comme l'éclairement incident  $A_k q_{i,k}$  sur la surface  $k$  est égal à la somme de l'énergie émise par toutes les surfaces  $j$  ( autant réelles que imaginaires ) de la zone-volume  $(l, m)$  ( dont une partie est absorbée par les gaz ( gris ou réel )) et de l'énergie émise par chacun de ces gaz, on a pour le cas d'un modèle à trois gaz gris et un gaz transparent:

$$A_k^{l,m} q_{i,k}^{l,m} = \sum_{j=1}^6 \sum_{n=0}^3 a_n(T_j, T_g)^{l,m} s_j \bar{s}_k^{l,m,n} q_{0,j}^{l,m} + \sum_{n=1}^3 a_n(T_g)^{l,m} g \bar{s}_k^{l,m,n} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.3)$$

Le premier terme du membre de droite de l'égalité (2.3) ci-dessus représente l'énergie émise par les surfaces (autant réelles que imaginaires) sur la surface réelle  $k$  et dont une partie est absorbée par les gaz gris, alors que le second terme représente l'énergie émise par chacun de ces gaz gris sur la même surface  $k$ . Le gaz transparent est identifié ici par  $n = 0$ , ce qui explique le début de la sommation à  $n = 1$  dans le dernier terme du membre de droite.

La combinaison des équations (2.1) et (2.2) fournit:

$$q_k^{l,m} = \frac{\epsilon_k^{l,m} (E_{b_k}^{l,m} - q_{0,k}^{l,m})}{1 - \epsilon_k^{l,m}} \quad (2.4)$$

Ce même flux de chaleur net fourni à la surface  $k$  donné par l'équation (2.4) ci-dessus peut être aussi obtenu en substituant l'équation (2.3) (qui exprime l'éclairement à partir des propriétés géométriques et physiques de la chambre de combustion) dans l'équation (2.1), soit :

$$q_k^{l,m} = q_{0,k}^{l,m} - \sum_{j=1}^6 \sum_{n=0}^3 a_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{s_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} q_{0,j}^{l,m} - \sum_{n=1}^3 a_n(T_g)^{l,m} \frac{g \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.5)$$

Combinant maintenant les équations du flux net fourni à la surface  $k$  selon ces deux formes (équation(2.4) et équation(2.5)), on obtient alors l'égalité suivante :

$$\frac{\epsilon_k^{l,m} (E_{b_k}^{l,m} - q_{0,k}^{l,m})}{1 - \epsilon_k^{l,m}} = q_{0,k}^{l,m} - \sum_{j=1}^6 \sum_{n=0}^3 a_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{s_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} q_{0,j}^{l,m} - \sum_{n=1}^3 a_n(T_g)^{l,m} \frac{g \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.6)$$

Multiplions les deux membres de l'équation (2.6) par  $(1 - \epsilon_k^{l,m})$ , on obtient donc :

$$q_{0,k}^{l,m} - (1 - \epsilon_k^{l,m}) \sum_{j=1}^6 \sum_{n=0}^3 \tilde{a}_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{s_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} q_{0,j}^{l,m} = (1 - \epsilon_k^{l,m}) \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g} \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} a_n(T_g)^{l,m} E_{b_g}^{l,m} + \epsilon_k^{l,m} E_{b_k}^{l,m} \quad (2.7)$$

Pour une surface réelle  $k$  d'une zone-volume  $(l, m)$ , l'équation qui caractérise le transfert de chaleur par rayonnement est donnée par l'équation (2.7) ci-dessus.

### 2.2.2 Équation de rayonnement pour une surface imaginaire

Une surface imaginaire  $k$ , est une surface qui n'a pas d'émission propre, i.e. pour laquelle  $\epsilon_k = 0$ . On peut toutefois écrire selon le principe de conservation d'énergie:

$$Q_k^{l,m} = q_k^{l,m} A_k^{l,m} = (q_{0,k}^{l,m} - q_{i,k}^{l,m}) A_k^{l,m} \quad (2.8)$$

où  $Q_k^{l,m}$  représente le flux de chaleur net fourni à la surface imaginaire  $k$ .

Substituant l'expression de l'éclairement  $q_{i,k}^{l,m}$  donnée par l'équation (2.3) dans l'équation (2.8), on obtient alors :

$$q_{0,k}^{l,m} - \sum_{j=1}^6 \sum_{n=0}^3 \tilde{a}_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{s_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} q_{0,j}^{l,m} = \frac{Q_k^{l,m}}{A_k^{l,m}} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g} \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} a_n(T_g)^{l,m} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.9)$$

où  $A_k^{l,m}$  est l'aire de la surface imaginaire  $k$ .

On conclut donc, pour une surface imaginaire  $k$  d'une zone-volume  $(l,m)$ , que l'équation qui caractérise le transfert de chaleur par rayonnement est donnée par l'équation (2.9) ci-dessus.

En résumé, les équations fondamentales de transfert de chaleur par rayonnement ( eq.(2.7) et eq.(2.9) ) peuvent s'écrire sous une forme simplifiée, donnée par :

$$\sum_{j=1}^6 b_{k,j}^{l,m} q_{0,j}^{l,m} = D_k^{l,m} \quad k = \{1, \dots, 6\} \quad (2.10)$$

Où :

Pour une surface réelle  $k$  :

$$b_{k,j}^{l,m} = \delta_{k-j} - (1 - \epsilon_k^{l,m}) \sum_{n=0}^3 a_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{\bar{s}_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} \quad (2.10-a)$$

$$D_k^{l,m} = \epsilon_k^{l,m} E_{b_k}^{l,m} + (1 - \epsilon_k^{l,m}) \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g} \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} a_n(T_g)^{l,m} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.10-a')$$

et:

Pour une surface imaginaire  $k$  :

$$b_{k,j}^{l,m} = \delta_{k-j} - \sum_{n=0}^3 a_n(T_j, T_g)^{l,m} \frac{\bar{s}_j \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} \quad (2.10-b)$$

$$D_k^{l,m} = \frac{Q_k^{l,m}}{A_k^{l,m}} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g} \bar{s}_k^{l,m,n}}{A_k^{l,m}} a_n(T_g)^{l,m} E_{b_g}^{l,m} \quad (2.10-b')$$

### 2.2.3 Quelques considérations sur les surfaces imaginaires

#### 2.2.3.a) Direction longitudinale

Considérons les chambres  $l$  et  $l + 1$  d'une même position transversale  $m$  avec  $l \neq 1$  et  $l \neq L - 1$ , l'énergie nette fournie à une surface imaginaire commune à ces deux chambres dans la direction des **X** (voir figure 2.d, ci-dessous) s'écrit:

$$\frac{Q_k^{l,m}}{A_k^{l,m}} = q_k^{l,m} = q_{0,6}^{l,m} - q_{i,6}^{l,m} \quad (2.11)$$

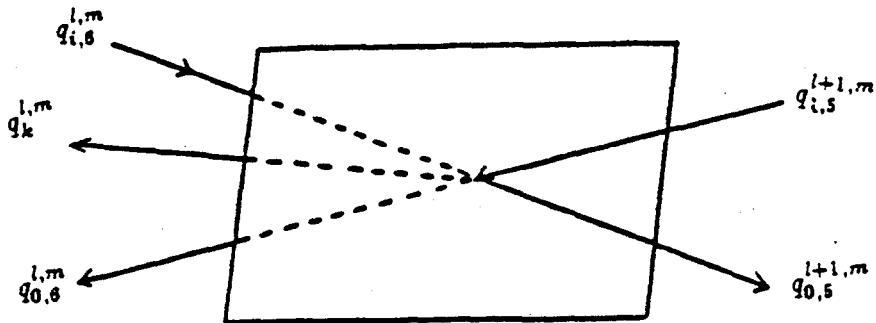


Figure 2.d: Énergie nette fournie à une surface imaginaire  $k$ , direction des **X**

Or, le principe de base de la méthode des plans imaginaires ( voir figure 2.d ) veut que :

$$q_{i,6}^{l,m} = q_{0,5}^{l+1,m} \quad (2.12)$$

en substituant l'équation (2.12) dans (2.11), on obtient alors :

$$\frac{Q_k^{l,m}}{A_k^{l,m}} = q_k^{l,m} = q_{0,6}^{l,m} - q_{0,5}^{l+1,m} \quad (2.13)$$

### 2.2.3.b) Direction transversale

Considérons maintenant les chambres  $m$  et  $m + 1$  d'une même position longitudinale  $l$  avec  $m \neq M - 1$ , alors la quantité d'énergie nette fournie à la surface imaginaire commune à ces deux chambres dans la direction des  $Y$  (voir figure 2.e ci-dessous) s'écrit :

$$\frac{Q_k^{*,l,m}}{A_k^{l,m}} = q_k^{*,l,m} = q_{0,1}^{l,m} - q_{i,1}^{l,m} \quad (2.14)$$

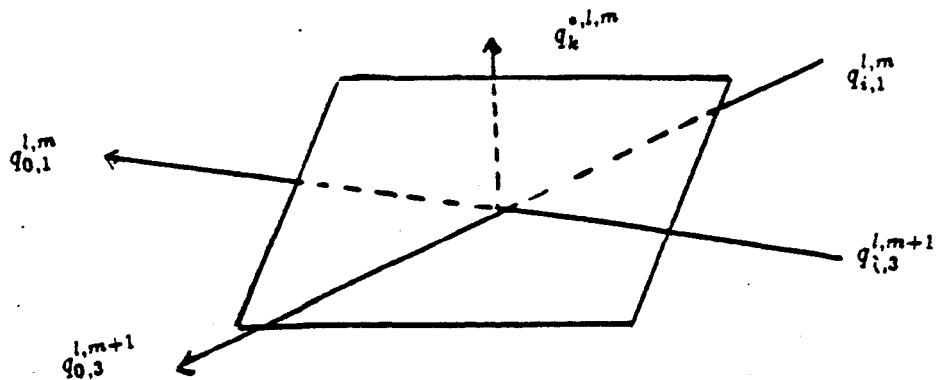


Figure 2.e : Énergie nette fournie à une surface imaginaire  $k$ , direction des  $Y$

Appliquons le principe de la méthode dans cette direction, on obtient alors:

$$q_{i,1}^{l,m} = q_{0,3}^{l,m+1} \quad (2.15)$$

Substituant l'équation (2.15) dans (2.14), on a alors:

$$\frac{Q_k^{*,l,m}}{A_k^{l,m}} = q_k^{*,l,m} = q_{0,1}^{l,m} - q_{0,3}^{l,m+1} \quad (2.16)$$

Etant dans un cas en deux dimensions, le terme  $Q_k^{l,m}$  se définit ainsi:

$$\begin{aligned}
 Q_k^{l,m} &= +Q^{*,l,m} \text{ pour la surface } k = 1 \\
 Q_k^{l,m} &= -Q^{*,l,m-1} \text{ pour la surface } k = 3 \\
 Q_k^{l,m} &= -Q^{l-1,m} \text{ pour la surface } k = 5 \\
 Q_k^{l,m} &= +Q^{l,m} \text{ pour la surface } k = 6.
 \end{aligned}$$

De même, pour une surface imaginaire  $k$ , on définit  $A_k$  par:

**Dans le sens des X** :  $A_k = A_r$  pour les surfaces 5 et 6.

**Dans le sens des Y** :  $A_k = A_s$  pour les surfaces 1 et 3.

#### 2.2.4) Regroupement des équations et méthode de résolution

En inversant le système d'équation (2.10) pour  $k = 1,..6$ , on obtient alors :

$$q_{0,k}^{l,m} = \sum_{j=1}^6 B_{k,j}^{l,m} D_j^{l,m} \quad k = \{1, \dots, 6\} \quad (2.18)$$

où  $D_j^{l,m}$ , pour une surface imaginaire, est fonction de la quantité de chaleur  $Q_k^{l,m}$  échangée à cette surface (voir équation (2.10-b)). Pour calculer ces  $Q_k^{l,m}$ , on doit résoudre les systèmes (2.13) et (2.16). Cet exercice fournit un système de  $M(L-1) + L(M-1)$  équations dont la formulation matricielle s'écrit:

$$[B2]\{q^{l,m}\} = \{C\} \quad (2.19)$$

où  $\{C\}$  est un vecteur connu (fonction des émissances et des aires d'échange direct),  $\{q^{l,m}\}$  est le vecteur à calculer (il contient les flux nets aux surfaces imaginaires dans les directions des X et Y respectivement) et  $[B2]$  est une matrice bandée fonction des  $B_{k-j}^{l,m}$ . Pour plus de

détails concernant ce système d'équations, nous référons à l'annexe 1 où toutes les équations utilisées sont décrites. Le vecteur  $\{q^{l,m}\}$  peut être retracé à chacune des pages de cet annexe à travers les équations apparaissant sous l'identification "Alors" ( $\frac{Q^{l,m}}{A_r}$  ou  $\frac{Q^{l,m}}{A_s} = q^{l,m}$ ). Ce vecteur  $\{q^{l,m}\}$  est calculé par la méthode de Gauss-Jordan [12].

Si toutes les températures des surfaces réelles et des zones de gaz sont connues, tous les flux émergents  $q_{0,k}^{l,m}$  peuvent être calculés pour chaque surface réelle. On peut ensuite facilement déduire les flux nets  $q_k^{l,m}$  sachant que:

$$q_k^{l,m} = \frac{\epsilon_k^{l,m} (E_{b_g}^{l,m} - q_{0,k}^{l,m})}{(1 - \epsilon_k^{l,m})} \quad (2.20)$$

Si la température d'une surface réelle est inconnue, on doit vérifier l'équation de bilan de chaleur à cette surface, soit:

$$q_k^{l,m} + U_k^{l,m} (T_k^{l,m} - T_0^{l,m}) + h_k^{l,m} (T_k^{l,m} - T_g^{l,m}) = 0 \quad (2.21)$$

Si la température d'une zone de gaz est inconnue, on vérifie également le bilan de chaleur de cette zone qui prend ici la forme suivante:

$$Q_c^{l,m} + \sum_{surf.\,real} A_k^{l,m} q_k^{l,m} + H_{ent}^{l,m} - H_{sor}^{l,m} + (Q^{l,m} - Q^{l-1,m}) + (Q^{*,l,m} - Q^{*,l,m-1}) - \sum_{surf.\,real} h_k^{l,m} A_k^{l,m} (T_g^{l,m} - T_k^{l,m}) = 0 \quad (2.22)$$

L'équation (2.22) donne la forme du bilan pour les zones de volume les plus usuelles, soit :

$$2 \leq m \leq M - 1$$

et

$$2 \leq l \leq L - 1$$

Des changements mineurs doivent être faits pour les zones qui sont les plus particulières, e.g. les zones qui sont limitées par des surfaces réelles.

Pour tenir compte de la convection, on a reformulé les équations de bilans de chaleur aux surfaces réelles et aux zones de gaz ( voir équations 2.21 et 2.22).

Etant donné que dans un cas général, les températures ( surfaces et gaz ) sont inconnues, il faut donc vérifier les équations (2.21) et (2.22) de ces zones qui peuvent être écrites sous la forme  $F_s(T) = 0$  et  $F_g(T) = 0$ . La convergence est assurée par la méthode de Newton-Raphson [14] qui annule par itérations la fonction F contenant les fonctions  $F_s$  et  $F_g$ .

### 2.2.5 Précision sur l'élaboration et l'utilisation des schémas d'écoulement

L'originalité de ce travail ne se limite pas à l'introduction du caractère réel des gaz dans le modèle posé par B.Strom, mais elle est due à l'incorporation d'une technique qui tient compte de la convection et des différents schémas d'écoulement à l'intérieur de la fournaise. La figure 3.f illustre schématiquement la technique que nous avons adoptée pour tenir compte des circulations, les  $DM_5$ ,  $DM_6$ ,  $DM_1$  et  $DM_3$  étant les débits massiques dans les directions X, -X, Y et -Y respectivement :

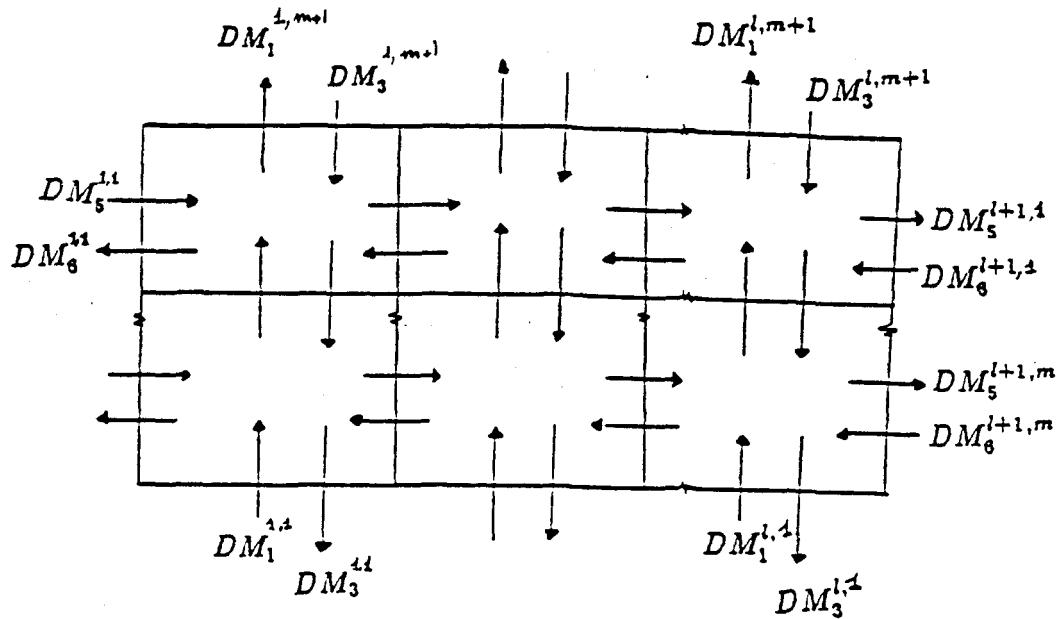


figure 3.f : Distribution des débits massiques à travers les différentes surfaces de l'enceinte

La variation de l'enthalpie  $\Delta H^{l,m}$  à travers une zone de volume  $(l, m)$  schématisée par la figure 3.g ci-dessous est :  $\Delta H^{l,m} = H_{ent}^{l,m} - H_{sor}^{l,m}$

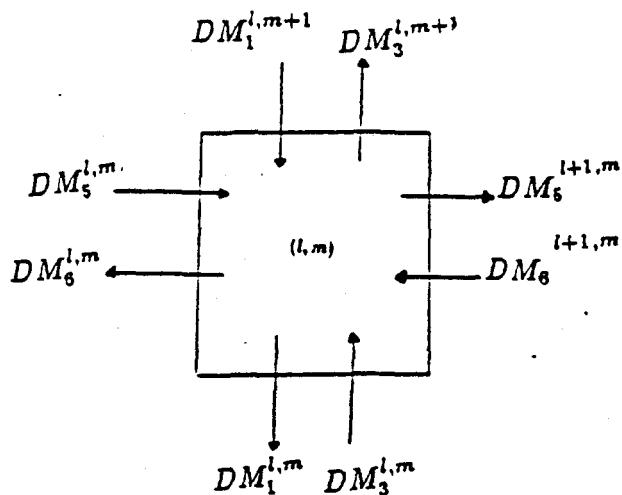


figure 3.g : Distribution des débits massiques à travers une zone de volume  $(l, m)$

où l'enthalpie d'entrée  $H_{ent}^{l,m}$  de la zone  $(l, m)$  est égale à la somme des enthalpies correspondant à chacune des entrées de cette zone de volume. Si cette zone est bornée par des surfaces imaginaires comme le montre la figure 3.h ci-dessous, alors :

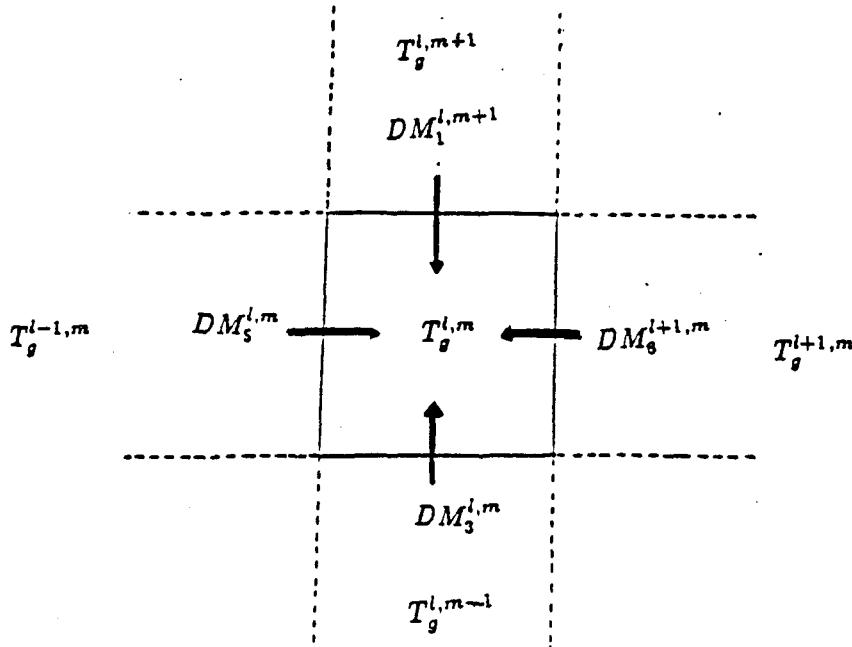


figure 3.h : Les entrées des débits massique à travers une zone de volume  $(l, m)$

$$H_{ent}^{l, m} = C_p(DM_1^{l, m+1}(T_g^{l, m+1} - T_0) + DM_3^{l, m}(T_g^{l, m-1} - T_0) + DM_5^{l, m}(T_g^{l-1, m} - T_0) + DM_6^{l+1, m}(T_g^{l+1, m} - T_0)) \quad (2.23)$$

Si une surface d'entrée du débit massique est réelle (comme c'est le cas des surfaces qui limitent la chambre de combustion), alors la contribution en enthalpie correspondante est  $DM C_p(T_{a_s}^{l, m} - T_0)$ , où  $DM$  représente le débit massique à travers cette zone.

L'enthalpie de sortie  $H_{sor}^{l, m}$  est la somme des enthalpies correspondant à chacune des sorties de la zone  $(l, m)$ , soit (voir figure 3.i ci-dessous) :

$$H_{sor}^{l, m} = (DM_1^{l, m} + DM_3^{l, m+1} + DM_5^{l+1, m} + DM_6^{l, m})C_p(T_g^{l, m} - T_0) \quad (2.24)$$

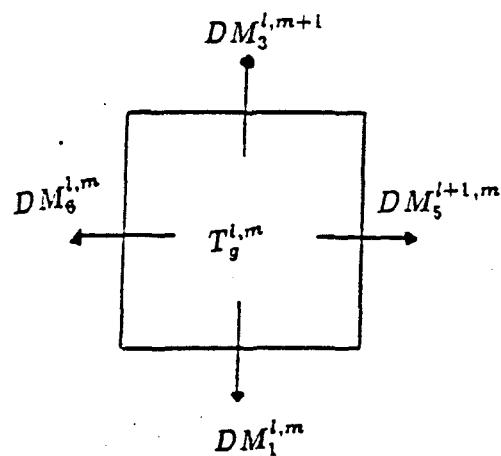


figure 3.i : Les sorties des débits massiques à travers une zone de volume  $(l, m)$

### CHAPITRE III

#### RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats de la méthode numérique furent obtenus pour deux sortes de fournaises. Tout d'abord, pour la fournaise (four 1) initialement posée par Ström et dont on a extentionné la validité à deux dimensions. Les caractéristiques de cette fournaise sont données dans le tableau 3.1. La fournaise industrielle (four 2) d'Alcan International Ltée (Jonquière, Québec), dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 3.2, a fait l'objet de l'autre étude. Tous les cas sont résumés au tableau 3.

Pour appliquer la méthode des plans imaginaires, on a subdivisé l'enceinte selon sa longueur et sa largeur. La validation de la méthode a été obtenue par comparaison avec les résultats obtenus par la méthode de zones rigoureuse telle qu'exposée dans le chapitre I de ce mémoire. Nous exposerons ici, les résultats obtenus pour trois cas de maillages ( $L, M$ ) ( $M$  divisions transversales entre l'axe de symétrie du four et sa surface latérale 1, et  $L$  divisions longitudinales) dans l'ordre suivant (l'ensemble des cas étudiés est illustré au tableau 3 (page 25)):

#### 3.1 MAILLAGE (10, 3) : cas 1-2

Il s'agit des résultats du four 1. On considère que la combustion se produit uniformément dans les premiers  $\frac{2}{5}$  de la fournaise, que les gaz sont gris avec un coefficient d'absorption constant le long de l'enceinte et qu'ils sont bien mélangés dans le premier  $\frac{1}{5}$  de la chambre et en écoulement frontal par la suite. Pour un coefficient d'absorption  $k=0.5 \text{ m}^{-1}$ , les figures 3.1.a, b et c permettent d'apprécier la très bonne concordance des résultats autant pour les températures du toit et des gaz que pour les flux de chaleur à la base. Les figures 3.2.a, b et c ont été obtenues pour  $k=0.1 \text{ m}^{-1}$ .

**TABLEAU 3**

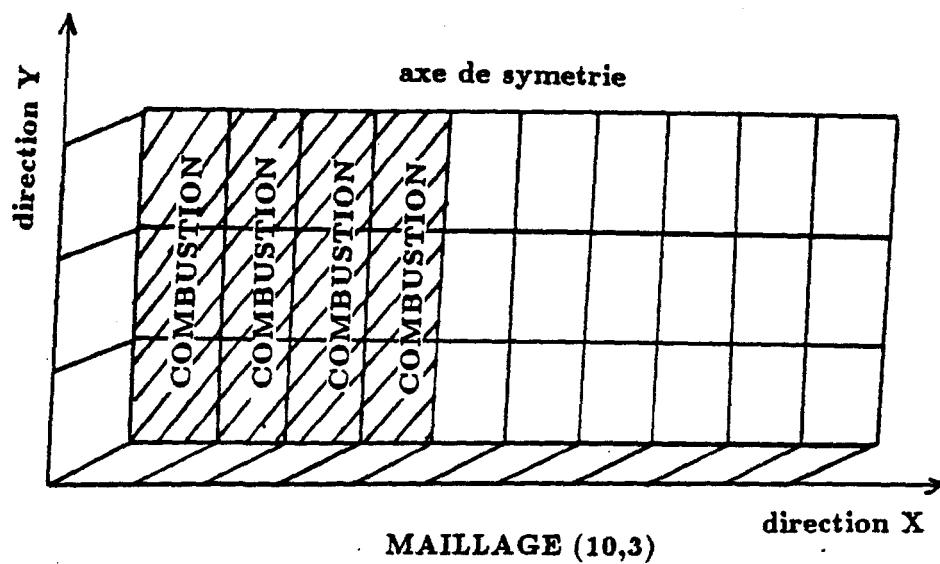
Les cas étudiés par la méthode des plans imaginaires

Cas étudiés	Type de fournaise	Gaz gris K( $m^{-4}$ )	Gaz réel	Circulation	Convection
CAS 1	1	0.5	—	—	—
CAS 2	1	0.1	—	—	—
CAS 3	2	—	modèle 1	—	—
CAS 4	2	—	modèle 2	—	—
CAS 5	2	—	modèle 3	—	—
CAS 6	2	0.175	—	oui	—
CAS 7	2	0.175	—	oui	oui
CAS 8	2	—	modèle 1	oui	oui
CAS 9	2	—	modèle 2	oui	oui
CAS 10	2	—	modèle 3	oui	oui

**TABLEAU 3.1**

Fournaise proposée par Ström (four 1)

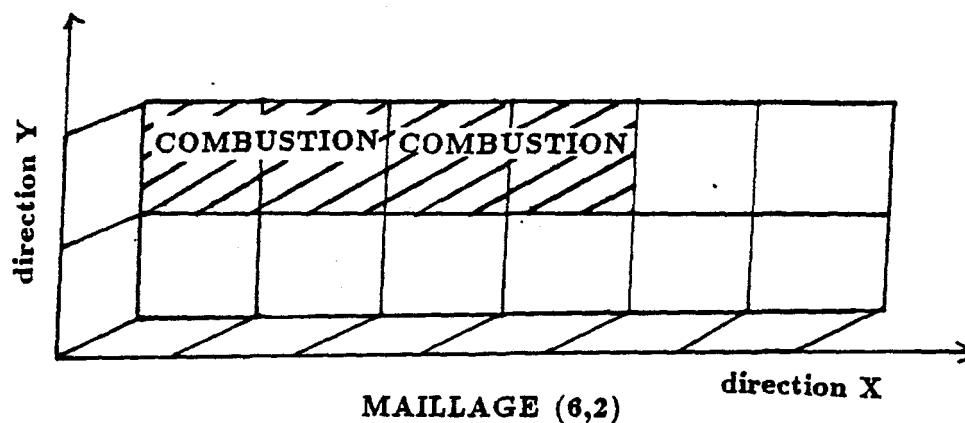
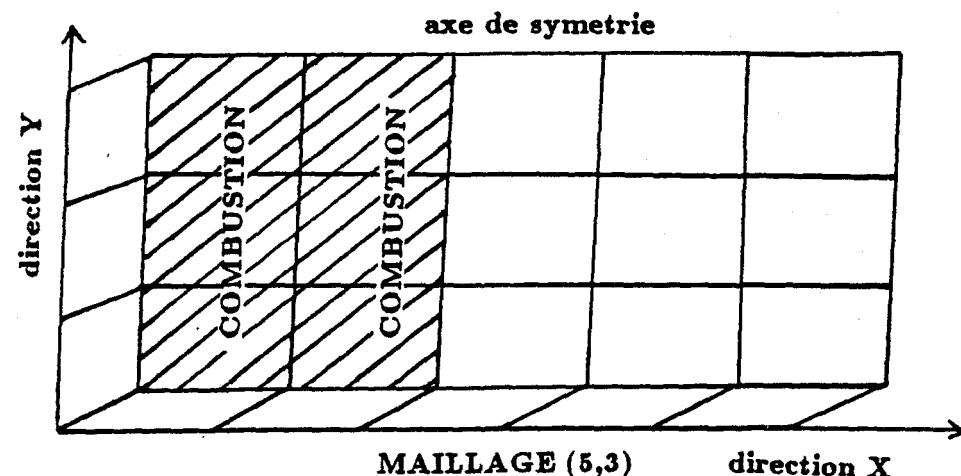
5.0, 1.0, 1.0	Dimensions de la fournaise selon les directions X, Y et Z (m)
0.5, 0.87, 0.0, 0.5	Facteurs d'émission (toit,base,bouts 5 et 6,côté)
1000.	Quantité de chaleur libérée par la combustion (kW) dans la fournaise
0.3842	Débit massique dans la direction des X (kg/s)
1798.	Température de la base (K)
1550	Température d'arrivée des gaz par la surface réelle 5 (K)
303.0	Température ambiante (K)
50.0, 0.0, 0.0	Coefficients globaux de transfert de chaleur (toit, cotés,bouts )(W/m <sup>2</sup> )
1674.	Chaleur massique des gaz ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ )



**TABLEAU 3.2**

Fournaise industrielle de l'Alcan (four 2)

10.75, 3.75, 1.2	Dimensions de la fournaise selon les directions X, Y et Z (m)
0.7, 0.5, 0.8, 0.7	Facteurs d'émission (toit,base,bouts 5 et 6,coté)
4213.	Quantité de chaleur libérée par la combustion (kW) dans la fournaise
1.75	Débit massique dans la direction des X (kg/s)
1033	Température de la base (K)
333	Température d'arrivée des gaz par la surface réelle 5 (K)
298	Température ambiante (K)
1.25, 1.25, 0.05	Coefficients globaux de transfert de chaleur (toit, cotés,bouts )(W/m <sup>2</sup> )
1300	Chaleur massique des gaz ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ )

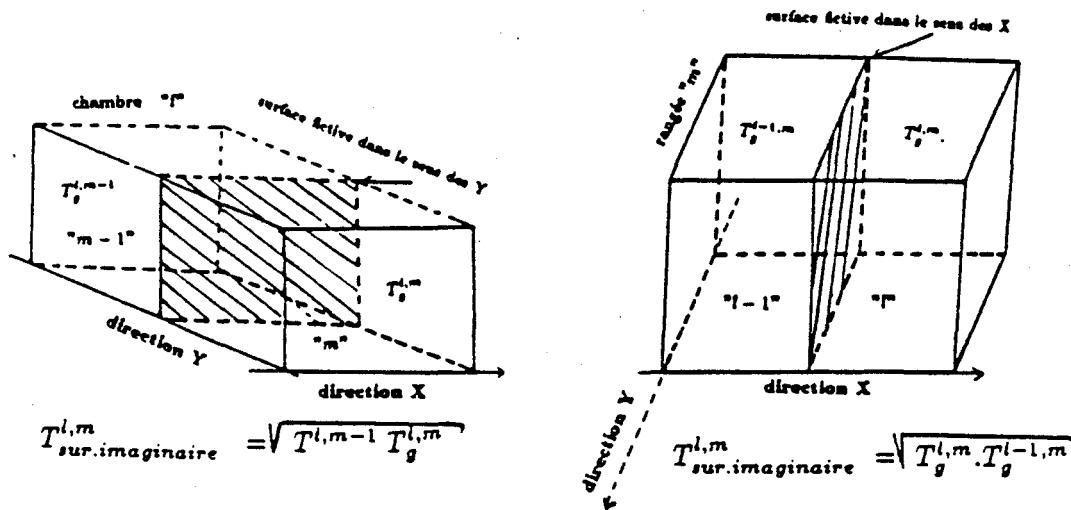


### 3.2 MAILLAGE (5,3) : cas 3-5

Il s'agit des résultats du four 2. Ici, on considère que la combustion se produit uniformément dans les premiers  $\frac{2}{5}$  de la fournaise, que les gaz de combustion, dûs à la présence de gaz carbonique et de vapeur d'eau, sont réels et qu'ils sont bien mélangés dans les premiers  $\frac{2}{5}$  de la chambre et en écoulement frontal par la suite. Comme le facteur d'absorption des gaz réels dépend de la température de la source, ceci nous amène à supposer trois modèles pour prédire la température d'une surface fictive, soit:

- MODÈLE 1 (cas 3) :

La température d'une surface fictive est égale à la moyenne géométrique entre les températures des zones de gaz adjacentes contenant cette surface

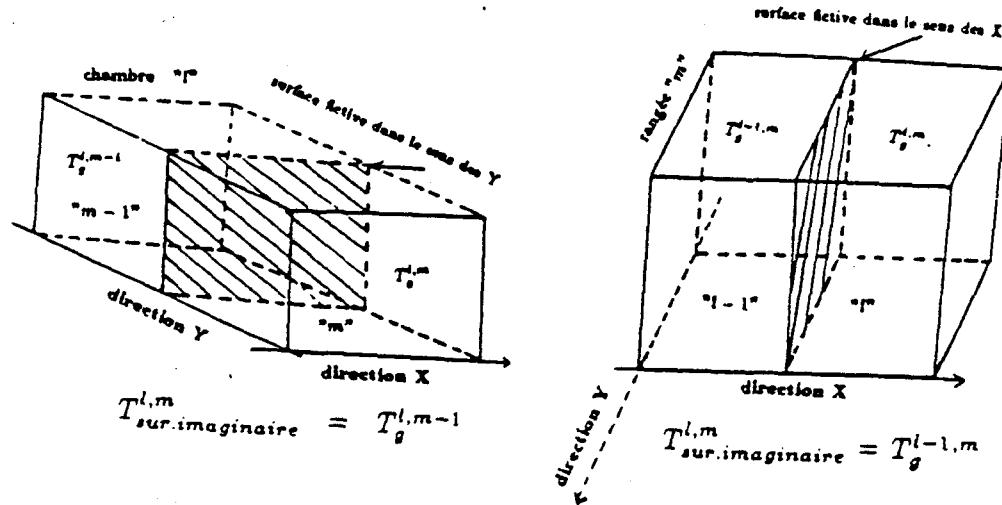


principe du modèle 1

- MODÈLE 2 (cas 4) :

La température d'une surface fictive selon X, séparant deux chambres " $l - 1$ " et " $l$ " d'une rangée " $m$ " est égale à la température de la chambre en amont " $l - 1$ ". De la même façon,

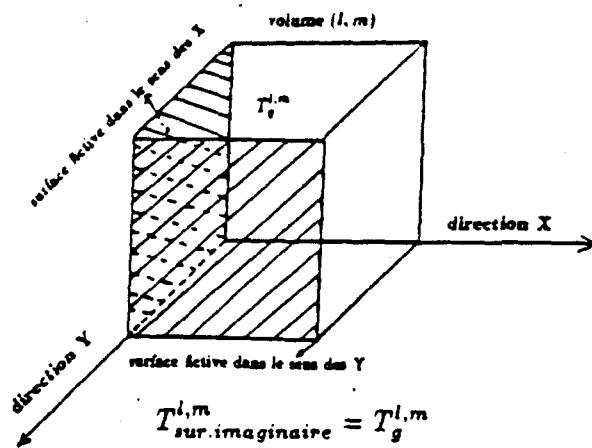
la température d'une surface fictive selon Y, séparant deux chambres " $m$ " et " $m - 1$ " d'une même position longitudinale " $l$ ", est égale à la température de la chambre en amont " $m - 1$ ".



principe du modèle 2

• MODÈLE 3 ( cas 5 ) :

Deux surfaces imaginaires délimitant un même volume de gaz ont la même température.



principe du modèle 3

Les résultats de ces trois modèles sont donnés respectivement aux figures 3.3.a, b, c, 3.4.a, b, c et 3.5.a, b, c. On peut observer encore ici que les résultats trouvés avec la méthode des plans imaginaires sont très près de ceux de la méthode de zones. On note également que l'utilisation d'un modèle ou l'autre (1, 2, 3) conduit à des résultats sensiblement identiques.

### 3.3 MAILLAGE (6, 2) : cas 6-10

Ce maillage a été fait pour le four 2, en considérant cette fois-ci qu'il y a des courants de circulation. Les résultats sont obtenus pour deux cas :

#### 3.3.1 CAS 6-7

Nous considérons d'abord un cas où la convection est négligeable. Les gaz sont gris avec un coefficient d'absorption constant ( $k=0.175 \text{ m}^{-1}$ ) le long de l'enceinte, et la combustion se produit uniformément dans les quatre premières chambres parallèles à l'axe de symétrie. Le tableau 3.3 (page 45) montre le schéma d'écoulement et les valeurs numériques obtenues pour les températures du toit, des gaz et les flux de chaleur à la base. Les figures 3.6.a, b, et c réaffirment la très bonne cohérence de ces résultats autant pour les températures du toit et des gaz que pour les flux de chaleur à la base.

Pour rendre le logiciel plus général, on a aussi tenu compte de la convection. Le tableau 3.4 (page 48) montre le schéma d'écoulement et les valeurs numériques obtenues pour les températures du toit, des gaz et chaleurs à la base. Les coefficients de convection dans ce cas sont ( $\frac{W}{m^2.K}$ ): 25 pour le toit, la base et le côté (surface latérale 1) et 50 pour les bouts. Les figures 3.7.a, b et c montrent encore la très bonne concordance des résultats.

#### 3.3.2 CAS 8-10

Les gaz de combustion sont réels, et la combustion se produit uniformément dans les quatre premières chambres parallèles à l'axe de symétrie. Les coefficients de convection sont les mêmes que dans le premier cas mentionné ci-dessus. Le tableau 3.5 (page 51) et les figures 3.8.a, b et c montrent les valeurs numériques obtenues pour les températures du toit des gaz de combustion et des flux de chaleurs à la base. Ces résultats sont obtenus en tenant compte

du modèle 1 concernant la température d'une surface imaginaire. Des résultats presque identiques sont obtenus aussi pour les modèles 2 et 3. Ceux-ci ont été reportés à l'annexe 2.

Soulignons que les valeurs numériques obtenues aux différentes positions transversales " $m$ " pour un " $l$ " donné sont très voisines les unes des autres et que nous n'avons indiqué aux figures 3.1 à 3.8 que les valeurs moyennes. Néanmoins, les valeurs locales ont été indiquée aux tableaux 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7

### **3.4 Discussion**

#### **3.4.1 Influence de l'opacité du milieu**

Les résultats obtenus par les deux méthodes restent très voisins autant pour les gaz gris que pour les gaz réels. L'approche utilisée ( isolement partiel des volumes de gaz ) doit entraîner en principe des inexactitudes sur les valeurs obtenues pour les régions de l'enceinte les plus en aval, en particulier si l'opacité du milieu est faible . Or, on constate que, pour une opacité aussi faible que  $k=0.1 \text{ m}^{-1}$  pour le cas des gaz gris ( figures 3.2.a, b et c ), les résultats obtenus restent très proches. Ce voisinage des résultats numériques obtenus avec les deux techniques est dû au fait que, pour une zone donnée de l'enceinte, la contribution en rayonnement des zones voisines est beaucoup plus importante que celle des zones éloignées puisque les aires d'échange total de ces régions sont assez faibles . De ce point de vue la méthode des plans imaginaires devient une très bonne approximation de la méthode de zones.

#### **3.4.2 Le temps de calcul**

L'importance de cette méthode, réside dans sa capacité de réduire le temps de calcul comparativement à la méthode de zones rigoureuse. La figure 3.9 représente le temps d'exécution en secondes ( VAX.11/780 ) du programme principal IMA1.FOR en fonction du nombre de cubes de gaz utilisés. Pour un maillage  $(l, m)$  donné, le temps d'exécution pour le cas des gaz réels est plus important que celui des gaz gris. Cet écart est dû aux calculs des aires d'échange. Pour les gaz réels, on calcule des aires d'échanges correspondant à quatre facteurs

d'échange. Pour les gaz réels, on calcule des aires d'échanges correspondant à quatre facteurs d'absorption [9] comparativement à un pour le cas des gaz gris. La figure 3.10 montre le rapport de réduction  $R$  de temps entre les deux méthodes en fonction du nombre de cubes de gaz utilisés pour un cas où 10000 faisceaux sont utilisés dans la technique de Monte-Carlo pour le calcul des aires d'échange direct ( ou total ). On constate que l'écart est très important pour un nombre de 25 cubes de gaz; le temps de calcul est réduit d'un facteur  $R = 14$  pour le cas des gaz gris et 21 pour le cas des gaz réels. Pour un nombre de 30 cubes de gaz alors ce nombre  $R$  vaut 13 pour le cas des gaz gris et 23 pour le cas des gaz réels. Ce grand écart entre la méthode des plans imaginaires et la méthode de zones, pour un maillage  $(l, m)$  donné, est imputable principalement à la méthode de Monte-Carlo qui, lorsque utilisée avec la méthode de zones, doit être appelée pour calculer un nombre très important d'aires d'échange total. Puisque il y a " $ml$ " zones-volumes de gaz, " $ml$ " zones-surfaces de toit, " $ml$ " zones-surfaces de la base, " $l$ " zones-surfaces latérales et " $2m$ " zones-surfaces des deux côtés de la fournaise, alors le nombre total des paires d'aires d'échange total calculées pour le cas des gaz gris est  $(3ml + 2m + l)^2$ , et s'il s'agit des gaz réels, on doit multiplier ce nombre par 4. Contrairement à la méthode de zones, et quel que soit le maillage utilisé, la méthode des plans imaginaires n'a besoin que de 42 aires d'échange pour le cas des gaz gris ( on considère un seul facteur d'absorption ) dont 36 ( $= 6^2$ ) proviennent des aires d'échanges surface -surface et 6 des aires d'échange gaz-surface. Pour le cas des gaz réels il faut multiplier ce nombre par 4, soit 168. Par exemple, si on prend un maillage  $(5, 4)$  la méthode de zones aura besoin de  $(60 + 8 + 5)^2 = 5329$  aires d'échanges totales, comparativement à 42 pour la méthode des plans imaginaires.

Si on augmente significativement le nombre de faisceaux utilisés pour un maillage  $(l, m)$  donné, alors le nombre de réduction  $R$  prend une valeur très grande et le temps consacré aux calculs des aires d'échange direct ( ou total ) devient la partie dominante pour l'exécution du programme ( autant pour la méthode de zones que pour la méthode des plans imaginaires ) et par suite, le facteur de réduction  $R$  tend vers la limite  $\frac{(3ml+2m+l)^2}{42}$ .

### 3.4.3 Influence de la longueur d'une fournaise

La méthode des plans imaginaires présente la particularité de fournir les flux nets de

radiatifs axiaux et transversaux par rapport aux flux radiatifs utiles reçus par la base peut ainsi être évaluée en tout point de la fournaise. Cette technique est donc toute désignée pour vérifier le concept de la "fournaise longue" de Hottel [10, p.453] selon lequel, dans une fournaise mince où la combustion est complète à l'entrée, le flux de chaleur axial est négligeable vis-à-vis des flux de chaleur perpendiculaires à la direction de l'écoulement. Sous ces conditions, chaque subdivision axiale n'a à la limite aucune interaction avec ses voisines immédiates ( subdivision adiabatique ). Les cas traités dans le présent mémoire ne sont pas tout à fait adaptés à une confirmation de ce modèle puisque toute la combustion se produit dans la chambre. Néanmoins, pour montrer l'intérêt de la méthode, nous montrons aux figures 3.13 et 3.14 l'évolution du flux radiatif axial moyen lorsque la longueur de la fournaise croît. Pour la fournaise 2, on constate à partir de la figure 3.13 qu'au fur et à mesure qu'on fait augmenter la longueur du système dans la direction X, le flux de chaleur moyen aux surfaces fictives, vis-à-vis de la base, dans cette direction, diminue très rapidement. Il faut souligner ici que, lorsque la fournaise est allongée (  $X/Z$  croît ), le nombre de subdivisions reste le même (6,3) mais leur volume augmente de sorte que la combustion est alors distribuée dans des volumes plus grands. Cette décroissance rapide observée s'explique aisément par l'augmentation de la surface de la base par rapport à celle de la surface imaginaire selon X qui, elle, reste constante. On peut constater que, pour le cas étudié ici, la quantité de chaleur moyenne aux surfaces imaginaires rapportée à celle que reçoit la base n'est que de 0.1 lorsque  $\frac{X}{Z} = 20$ .

Par ailleurs, nous avons évalué l'influence combinée de la largeur et de la longueur de la fournaise (dimensions Y et X) sur son rendement mesuré par la quantité de chaleur récupérée à la base rapportée à la chaleur libérée par la combustion. Les abaques 3.14 a, b et c sont des abaques obtenus par la méthode des plans imaginaires lorsque la chaleur de combustion est libérée respectivement dans le  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{2}{3}$  et toute la fournaise. Ces résultats ont été trouvés pour le cas de la fournaise 2 avec une puissance totale libérée de 4213kW et la présence de gaz gris. Le rendement augmente avec le rapport X/Z i.e. avec l'aire couverte par la base. Mais à mesure que X/Z augmente, les aires des surfaces imaginaires selon Y et du toit augmentent aussi, provoquant ainsi des pertes de chaleur accrues et contribuant à infléchir les courbes. Lorsque Y/Z est très élevé ( e.g. 25 ) et que X/Z dépasse la valeur de 10, les

les courbes. Lorsque  $Y/Z$  est très élevé ( e.g. 25 ) et que  $X/Z$  dépasse la valeur de 10, les pertes de chaleur deviennent très importantes, les températures du toit et du gaz s'abaissent, alors que la température de la base reste constante à  $1033K$  avec un facteur de réflexion élevé (  $\rho = 0.5$  ). Il s'ensuit que le rendement chute rapidement. Pour les cas étudiés, le rendement passe par un maximum lorsque le produit  $X Y Z$  ( volume ) vaut  $160m^3$ , ce maximum dépend de la portion de l'enceinte où la chaleur de combustion est libérée ( 57 %, 54 % et 46 % respectivement sur les figures 3.14 a, b et c ). Selon ces trois figures, le four 2 a des rendements respectifs de 46 %, 38 % et 30 %.

Fig.3.1 : Profils obtenus pour le four 1 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gaz gris ( $K = 0.5 \text{ m}^{-1}$ )  
 - Les gaz sont bien mélangés dans le  $\frac{1}{5}$  de l'enceinte et en écoulement frontal par la suite

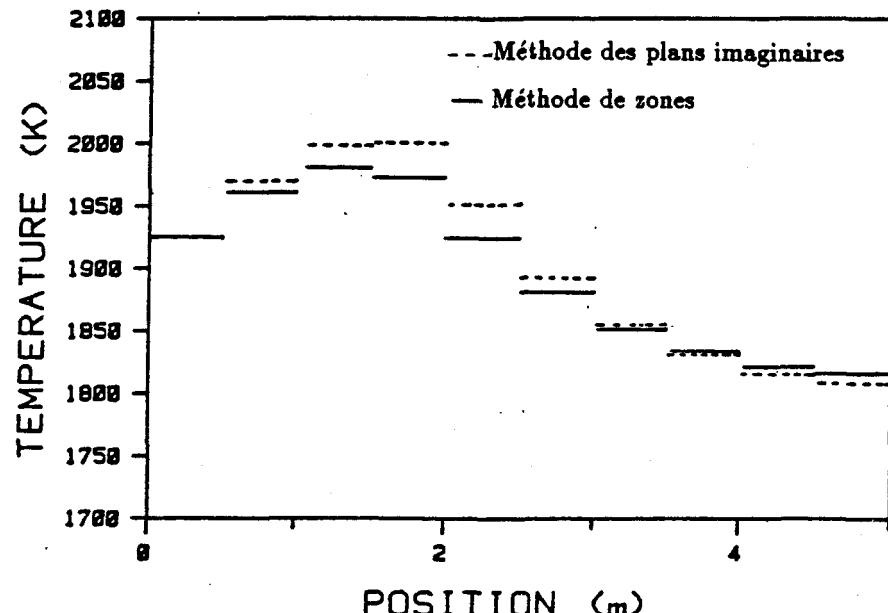


Fig 3.1.a TEMPERATURE DU TOIT

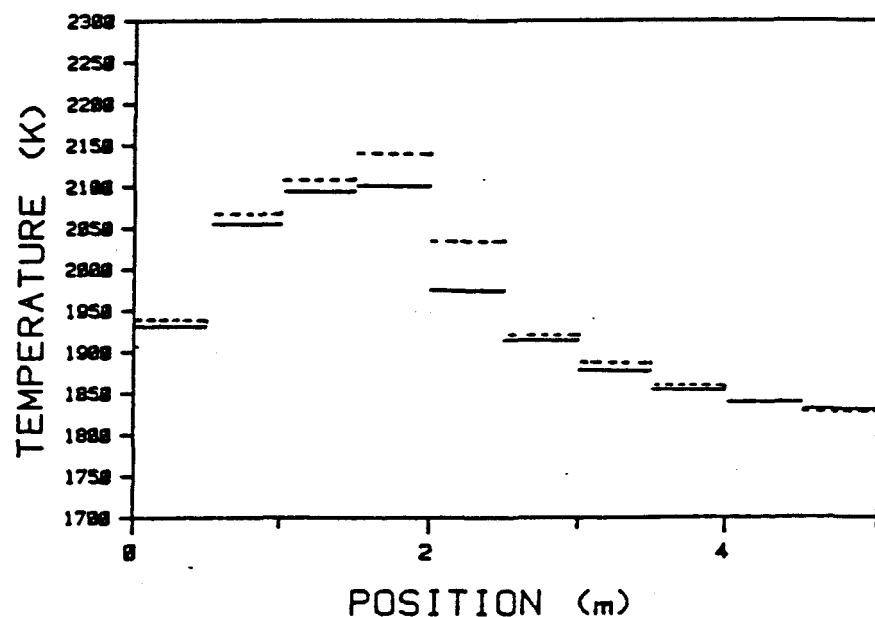


Fig 3.1.b TEMPERATURE DES GAZ

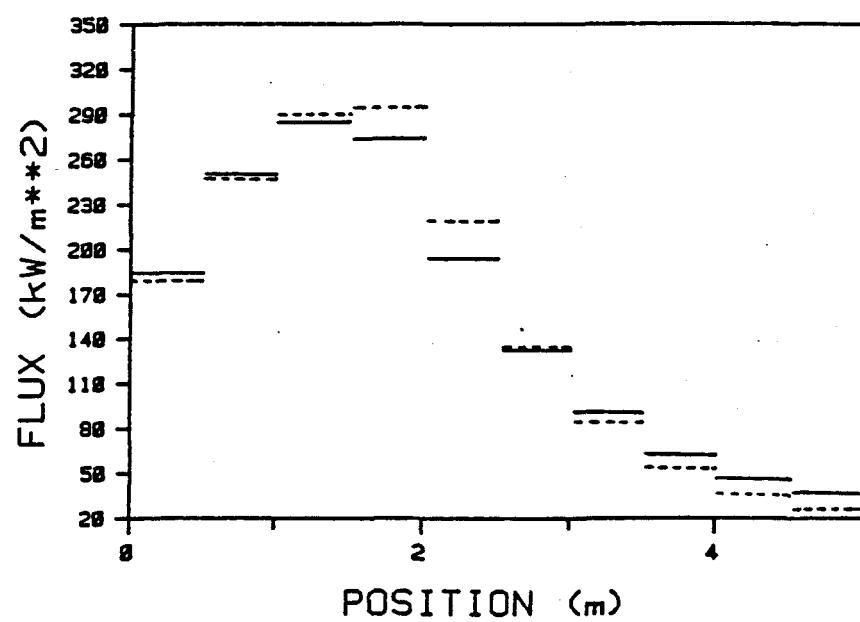
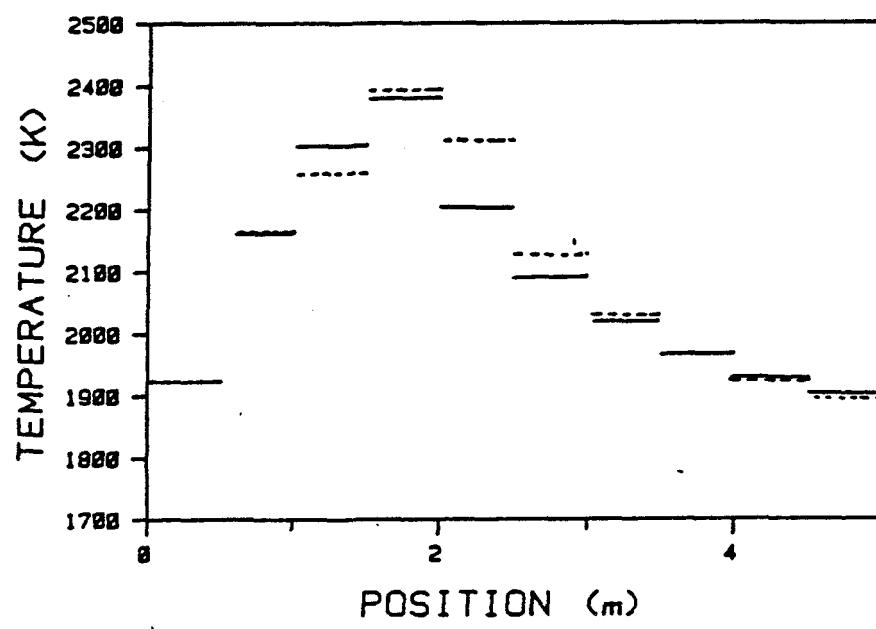
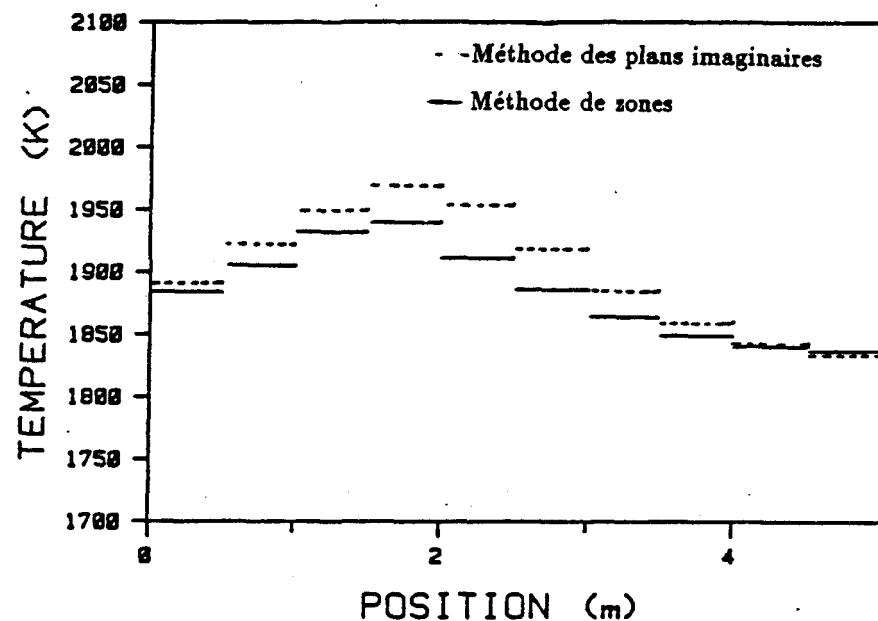


fig 3.1.e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

Fig.3.2 : Profils obtenus pour le four 1 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gaz gris ( $K = 0.1 \text{ m}^{-1}$ )  
 - Les gaz sont bien mélangés dans le  $\frac{1}{5}$  de l'enceinte et en écoulement frontal par la suite



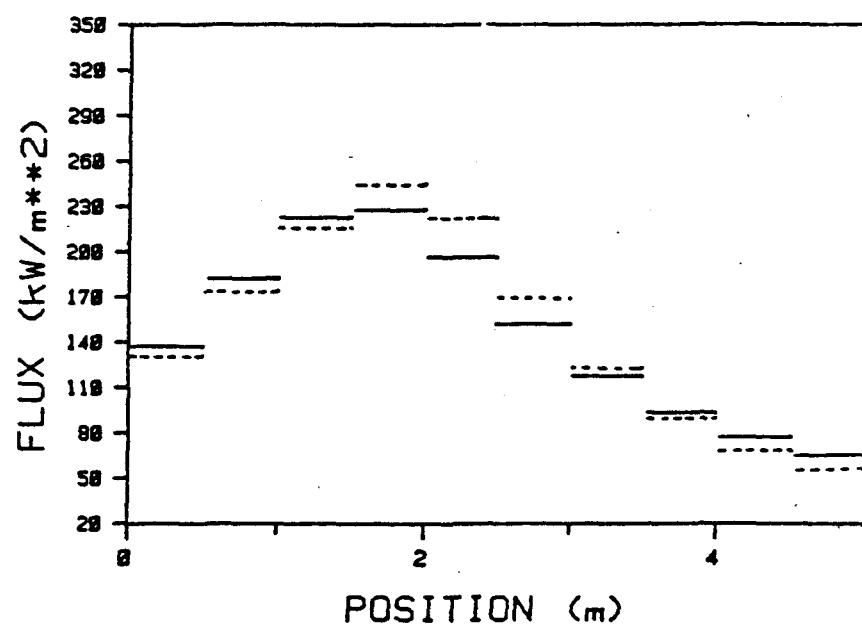


Fig 3.2. e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

• MODÈLE 1 :

Fig.3.3 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gas réel (modèle 1)  
 - Les gaz sont bien mélangés dans le  $\frac{2}{3}$  de l'enceinte et en écoulement frontal par la suite

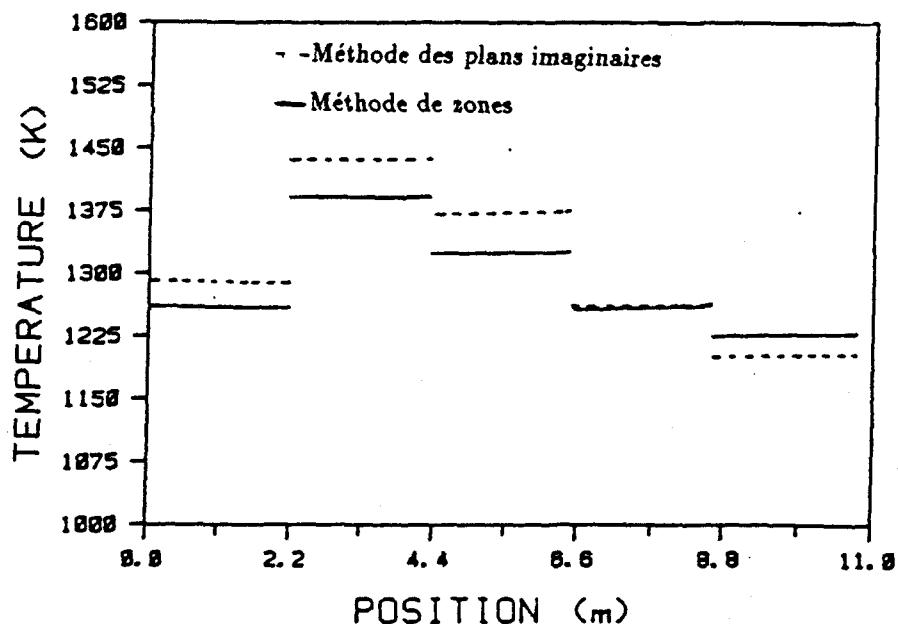


Fig. 3.3.a TEMPERATURE DU TOIT

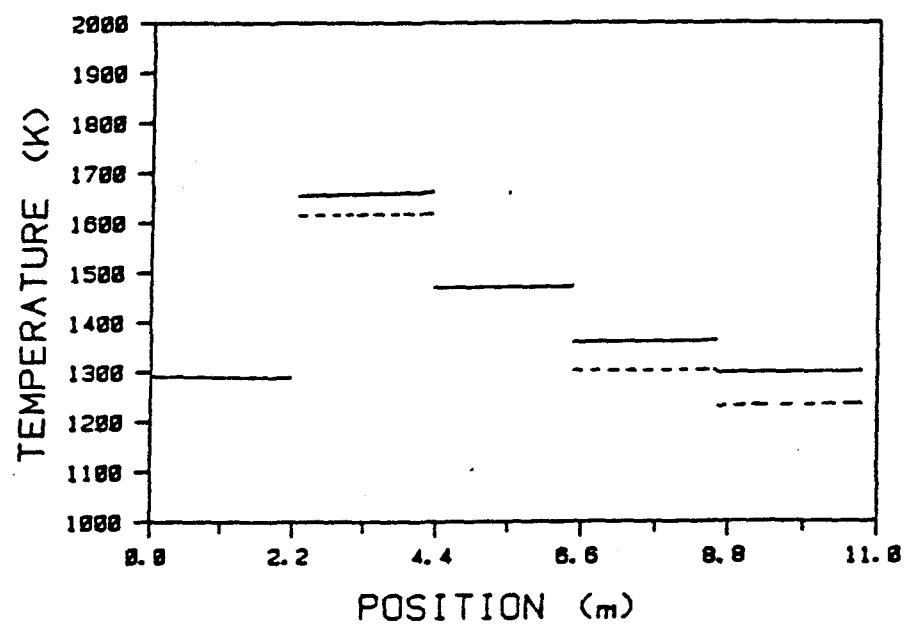


Fig. 3.3.b TEMPERATURE DES GAZ

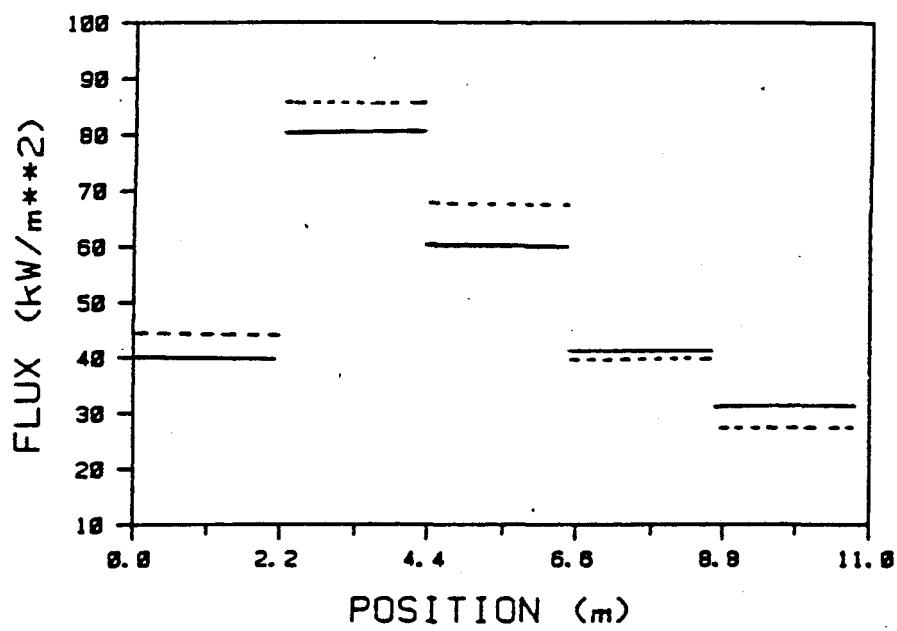


Fig 3.3. e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

• MODÈLE 2 :

Fig.3.4 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gas réel (modèle 2)  
 - Les gaz sont bien mélangés dans le  $\frac{2}{3}$  de l'enceinte et en écoulement frontal par la suite

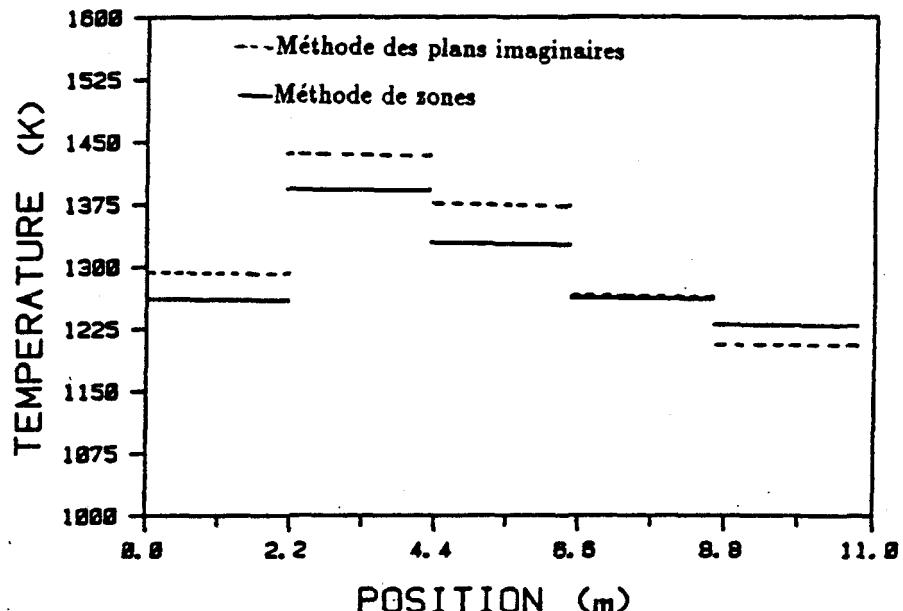


fig 3.4. a TEMPERATURE DU TOIT

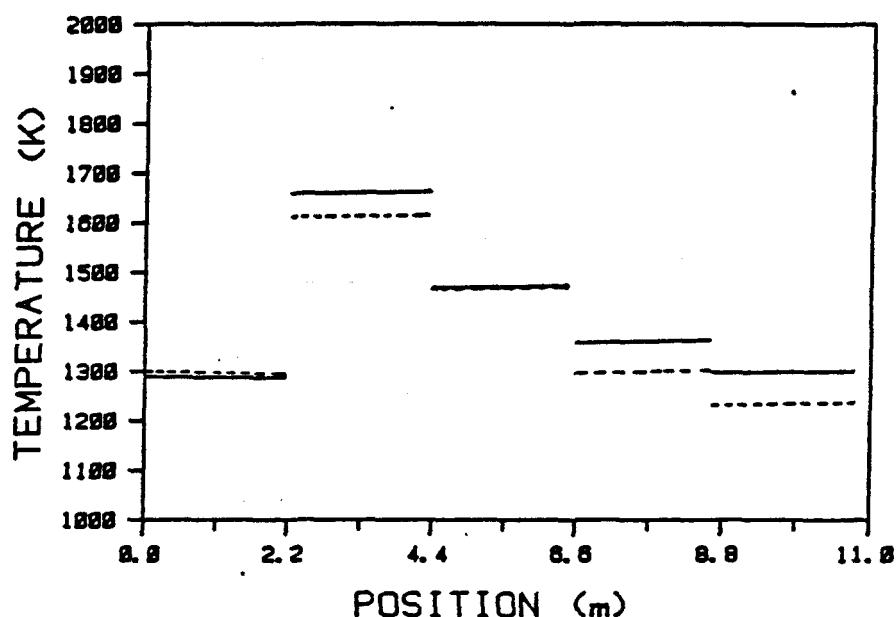


fig 3.4. b TEMPERATURE DES GAZ

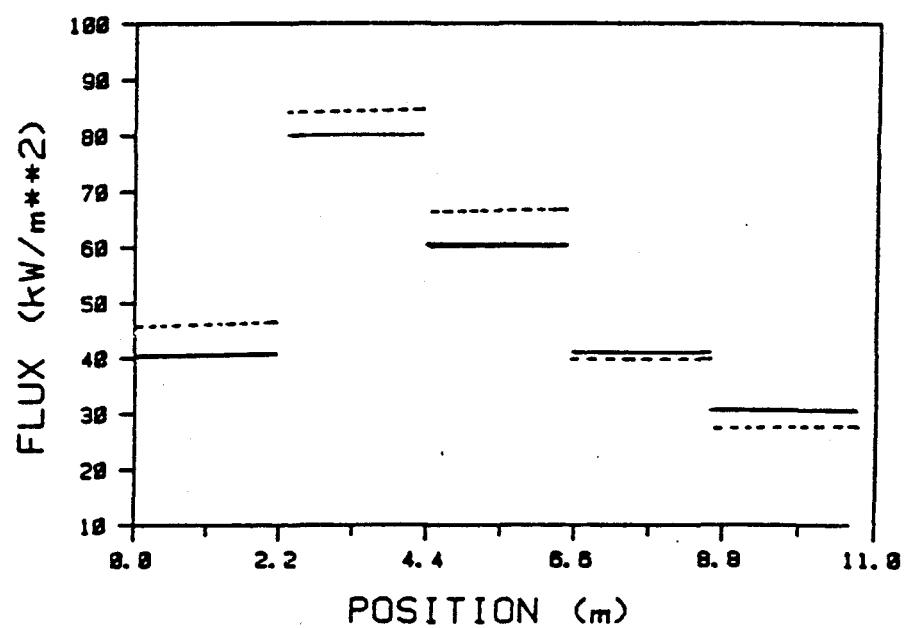


fig 3.4. e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

• MODÈLE 3 :

Fig.3.5 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:

- Gaz réel (modèle 3)
- Les gaz sont bien mélangés dans le  $\frac{2}{3}$  de l'enceinte et en écoulement frontal par la suite

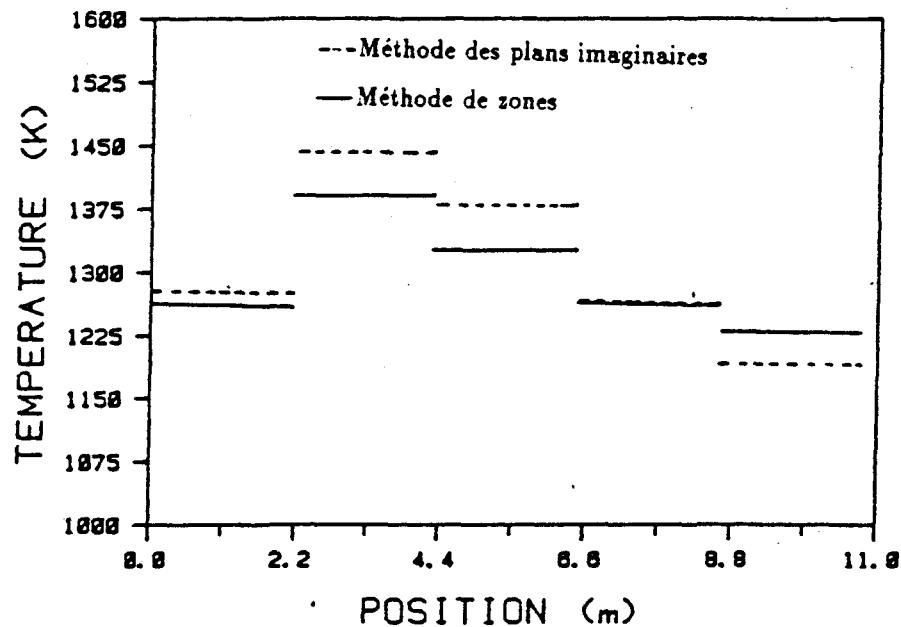


Fig. 3.5. a TEMPERATURE DU TOIT

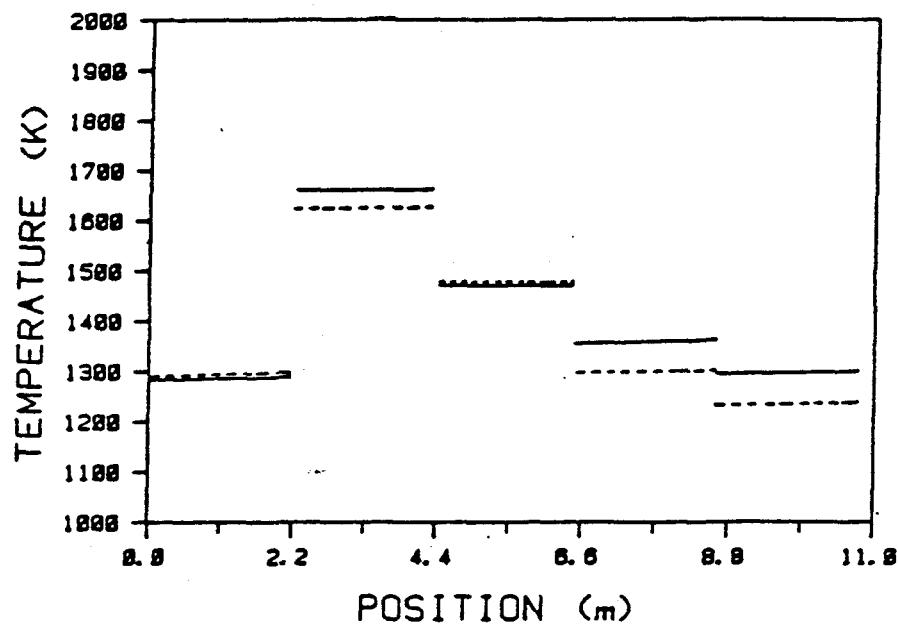


Fig. 3.5. b TEMPERATURE DES GAZ

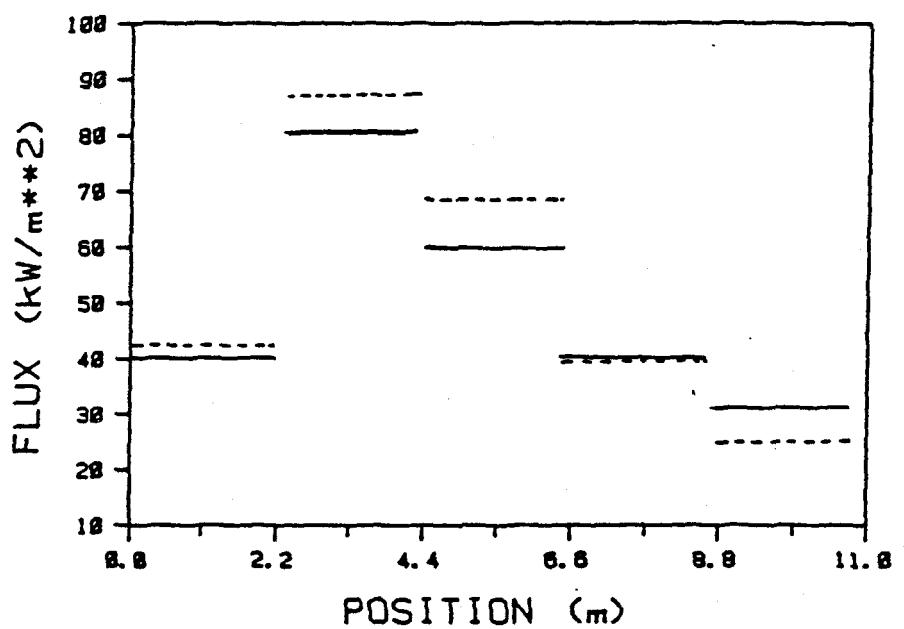
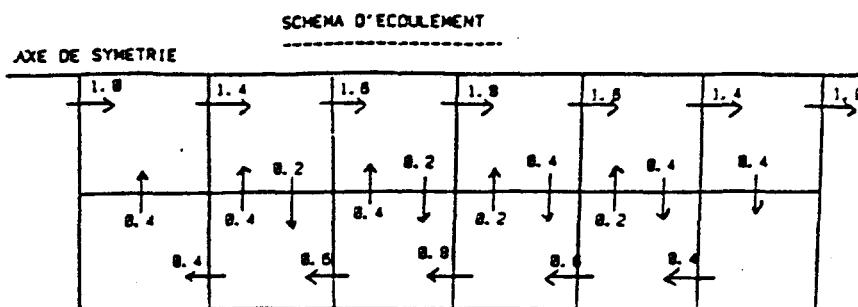


fig 3.5. e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

tableau 3.3

(couplé à la figure 3.6):

Comparaison des valeurs calculées par la présente méthode et la méthode de zones (valeurs entre parenthèses) pour  $K = 0.175 m^{-1}$  (sans convection).



## TEMÉRATURE DU TOIT (K)

RANGEE #1	1096. (1089.)	1189. (1178.)	1281. (1268.)	1335. (1318.)	1312. (1299.)	1287. (1269.)
RANGEE #2	1128. (1125.)	1193. (1178.)	1262. (1243.)	1382. (1298.)	1289. (1283.)	1272. (1251.)

## TEMÉRATURE DES CUBES DE GAZ (K)

RANGEE #1	949. (945.)	1263. (1255.)	1458. (1442.)	1577. (1563.)	1483. (1467.)	1421. (1404.)
RANGEE #2	1287. (1197.)	1282. (1265.)	1356. (1337.)	1393. (1374.)	1381. (1341.)	1337 (1317.)

FLUX DE CHALEUR A LA BASE  $\frac{KW}{m^2}$ 

RANGEE #1	18.8 (18.7)	27.1 (27.7)	48.4 (49.0)	63.4 (63.8)	58.8 (57.1)	58.3 (49.4)
RANGEE #2	15.5 (16.8)	29.8 (27.6)	43.8 (42.7)	53.9 (52.8)	58.5 (49.1)	48.2 (43.9)

Fig.3.6 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gas gris ( $K = 0.175\text{m}^{-1}$ )  
 - Circulation dans la fournaise

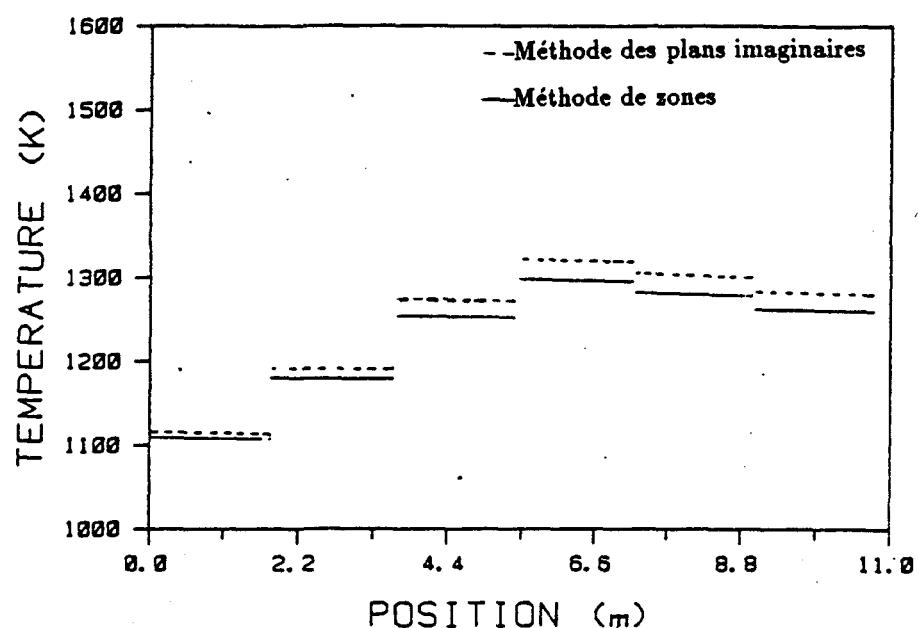


Fig. 3.6. a TEMPERATURE DU TOIT

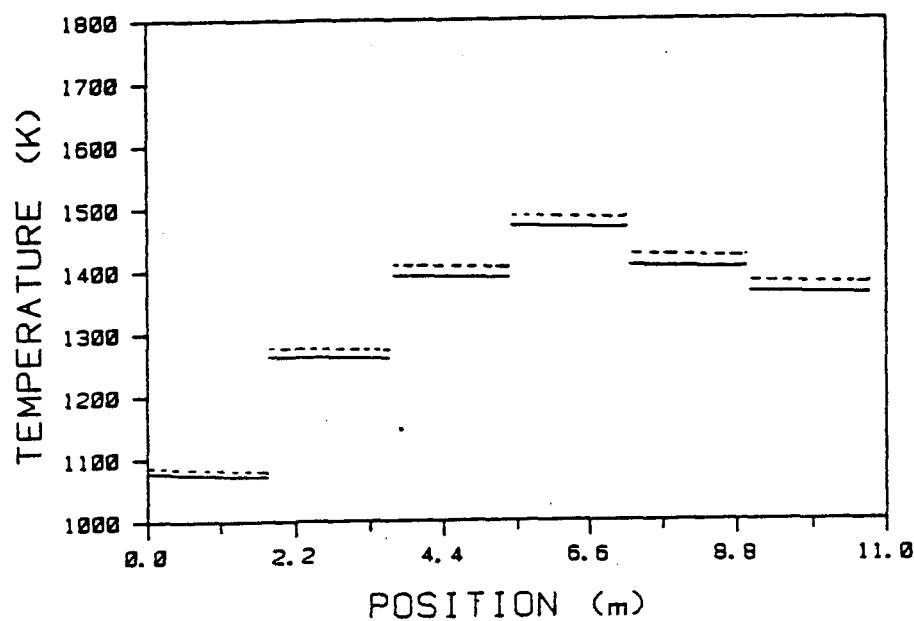


Fig. 3.6. b TEMPERATURE DES GAZ

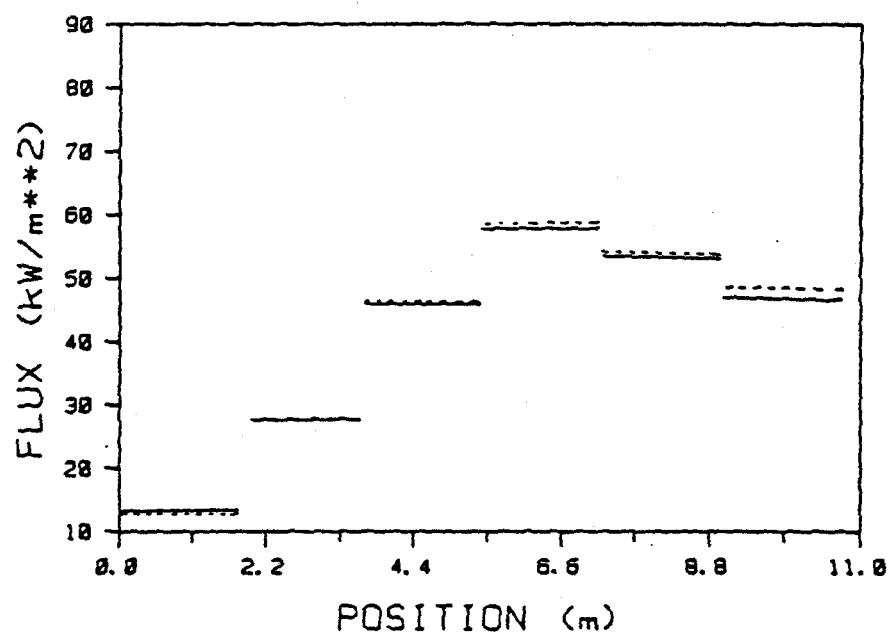
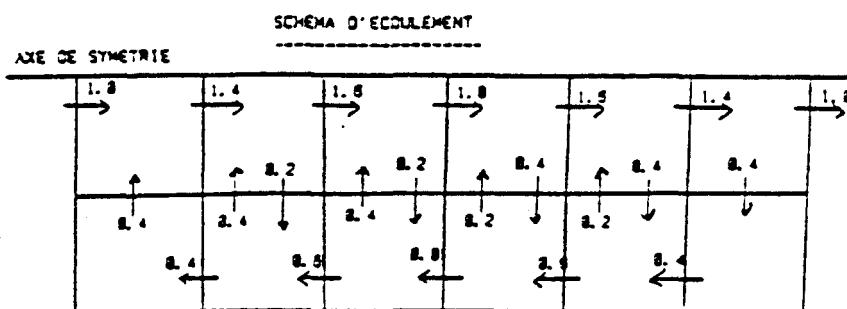


Fig 3. 6. c FLUX DE CHALEUR A LA BASE

tableau 3.4

(couplé à la figure 3.7):

Comparaison des valeurs calculées par la présente méthode et la méthode de zones (valeurs entre parenthèses) pour  $K = 0.175 \text{ m}^{-1}$  ( avec convection ).



## TEMÉRATURE DU TOIT (K)

RANGÉE #1	1064 (1058)	1179 (1170)	1274 (1256)	1328 (1306)	1299 (1279)	1273 (1257)
RANGÉE #2	1116 (1113)	1181 (1169)	1248 (1230)	1285 (1265)	1269 (1250)	1252 (1233)

## TEMÉRATURE DES CUBES DE GAZ (K)

RANGÉE #1	944 (941)	1247 (1239)	1429 (1417)	1547 (1534)	1449 (1434)	1383 (1368)
RANGÉE #2	1169 (1161)	1247 (1232)	1318 (1300)	1355 (1337)	1321 (1303)	1296 (1277)

FLUX DE CHALEUR A LA BASE  $\frac{\text{KW}}{\text{m}^2}$ 

RANGÉE #1	4.8 (5.3)	29.3 (30.0)	53.9 (54.5)	70.5 (70.3)	61.2 (61.4)	53.4 (52.5)
RANGÉE #2	15.9 (16.2)	29.8 (29.2)	46.2 (45.0)	56.3 (55.2)	51.8 (50.5)	47.1 (44.8)

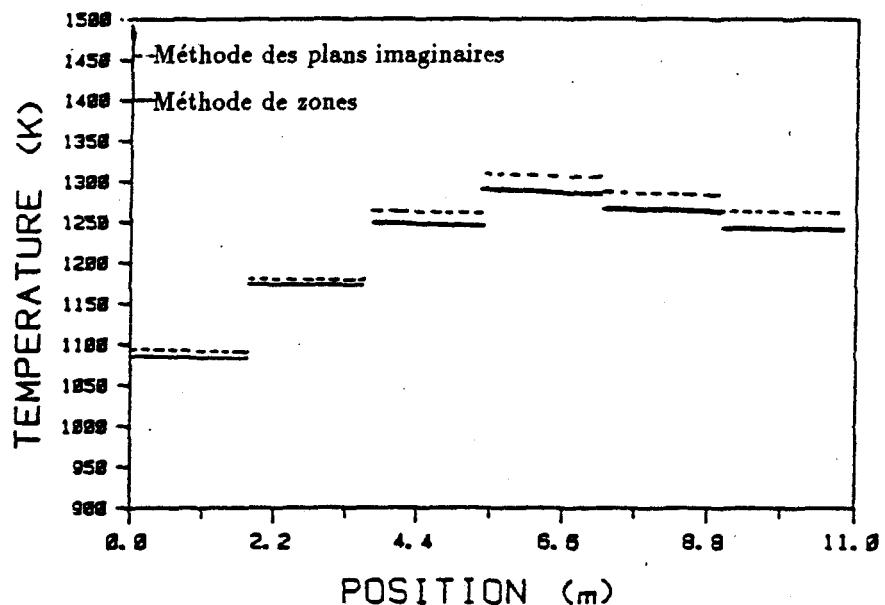


Fig 3.7. a TEMPERATURE DU TOIT

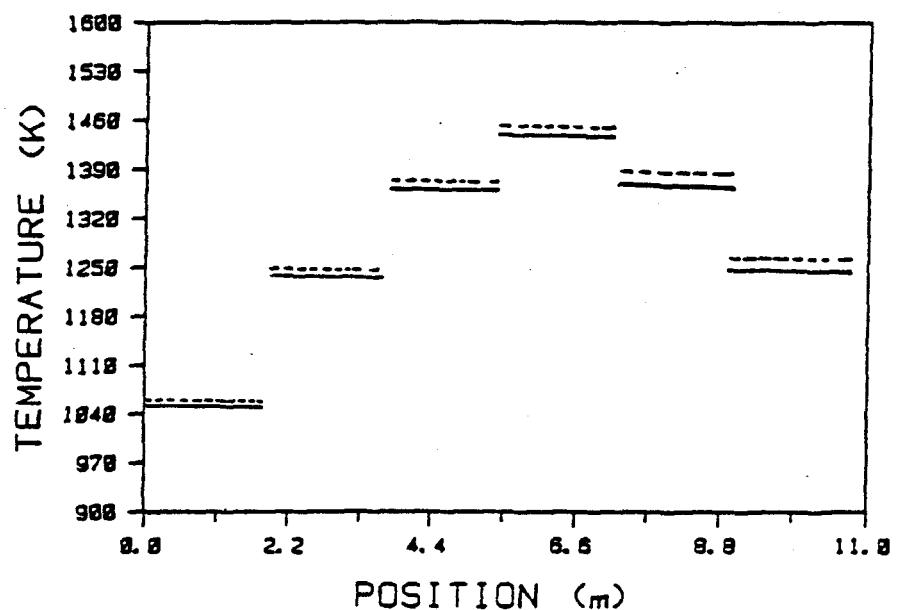


Fig 3.7. b TEMPERATURE DES GAZ

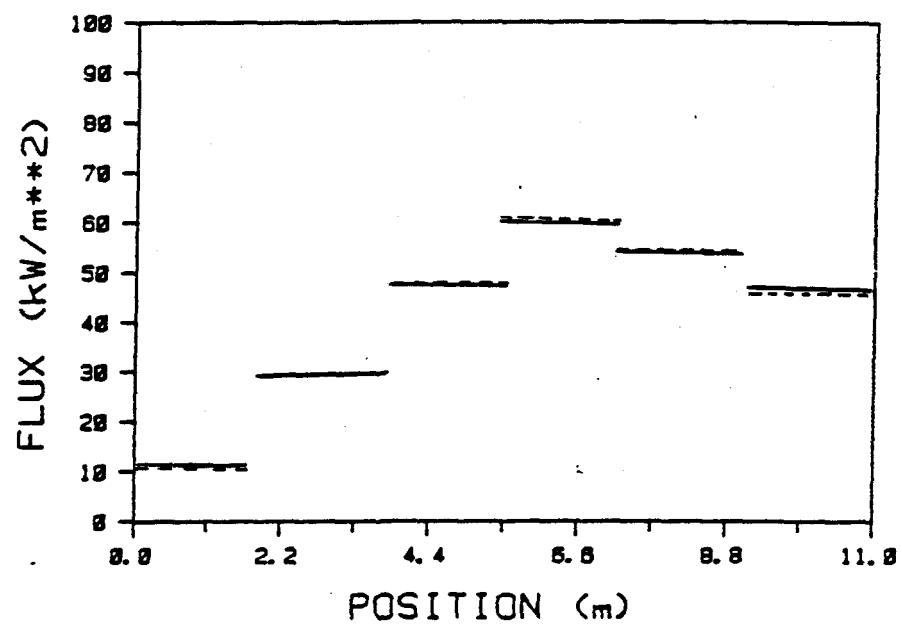
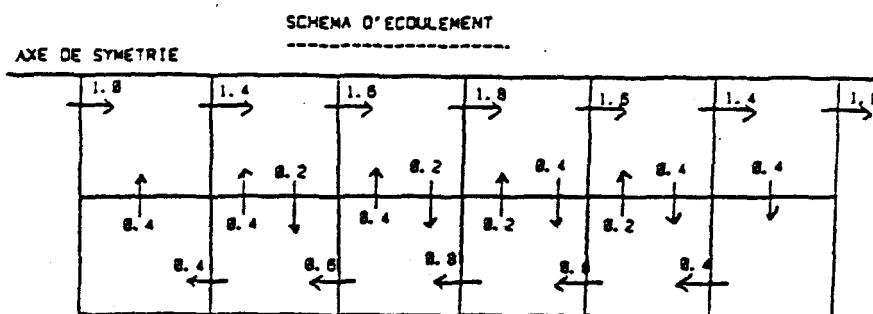


Fig 3.7. e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

tableau 3.5

(couplé à la figure 3.8):

Comparaison des valeurs calculées par la présente méthode et la méthode de zones (valeurs entre parenthèses) pour le modèle 1 du gaz réel ( avec convection ).



TEMÉRATURE DU TOIT (K)

RANGEE #1	1020 (1037)	1170 (1169)	1276 (1264)	1336 (1316)	1306 (1283)	1278 (1262)
RANGEE #2	1092 (1111)	1175 (1172)	1249 (1230)	1290 (1263)	1275 (1248)	1257 (1234)

TEMÉRATURE DES CUBES DE GAZ (K)

RANGEE #1	958 (955)	1262 (1254)	1449 (1439)	1573 (1560)	1485 (1461)	1429 (1390)
RANGEE #2	1131 (1159)	1223 (1250)	1301 (1328)	1346 (1367)	1318 (1330)	1297 (1297)

FLUX DE CHALEUR A LA BASE  $\frac{KW}{m^2}$ 

RANGEE #1	1.4 (2.2)	26.5 (30.2)	51.8 (56.3)	68.5 (73.3)	59.6 (63.3)	52.2 (54.5)
RANGEE #2	11.2 (15.3)	27.0 (29.9)	43.8 (45.9)	54.1 (54.9)	50.1 (50.6)	45.5 (45.3)

• MODÈLE 1 :

Fig.3.8 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gaz réel (modèle 1)  
 - Circulation et convection dans la fournaise

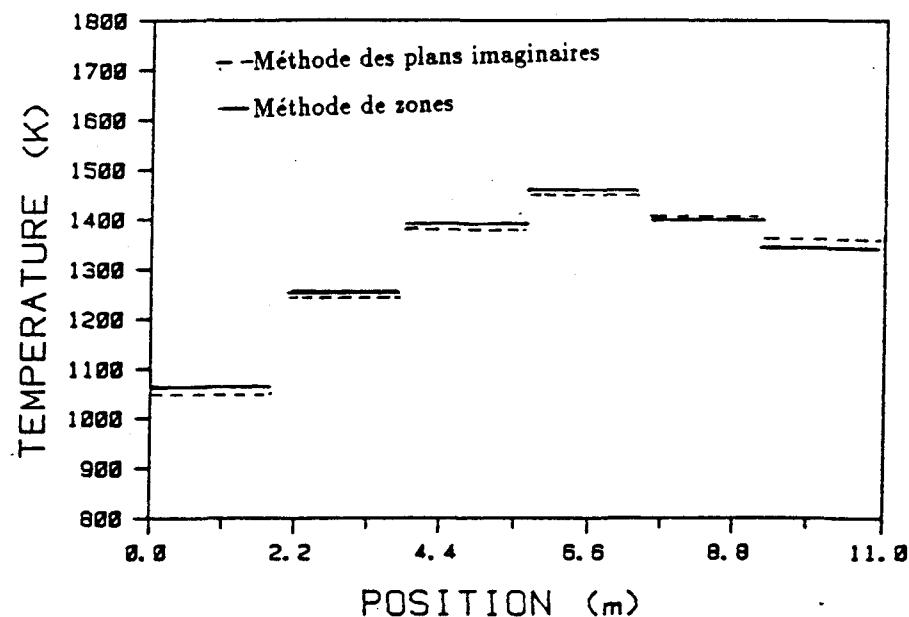


Fig 3.8.b TEMPERATURE DES GAZ ( GAZ REEL )

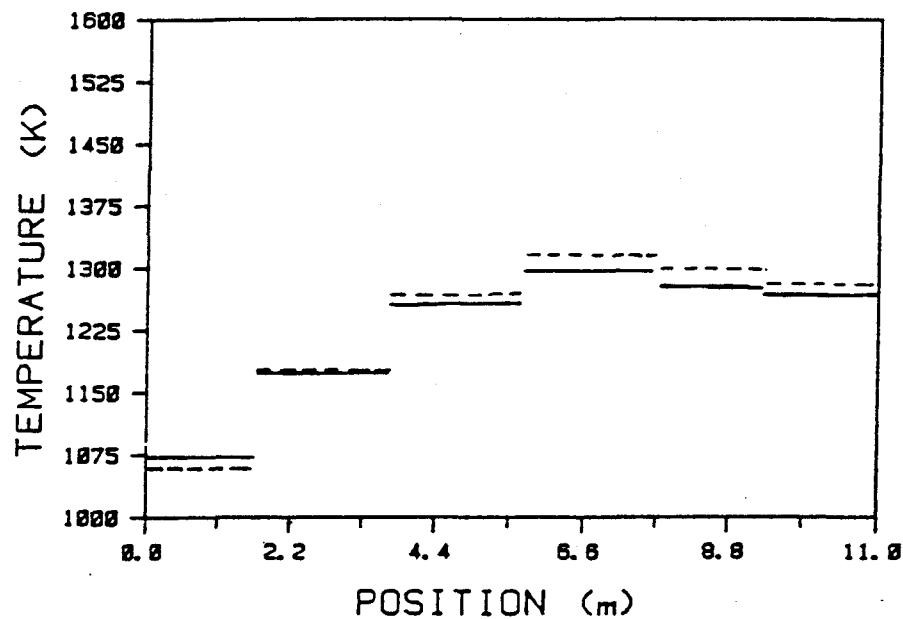


Fig 3.8.c TEMPERATURE DU TOIT

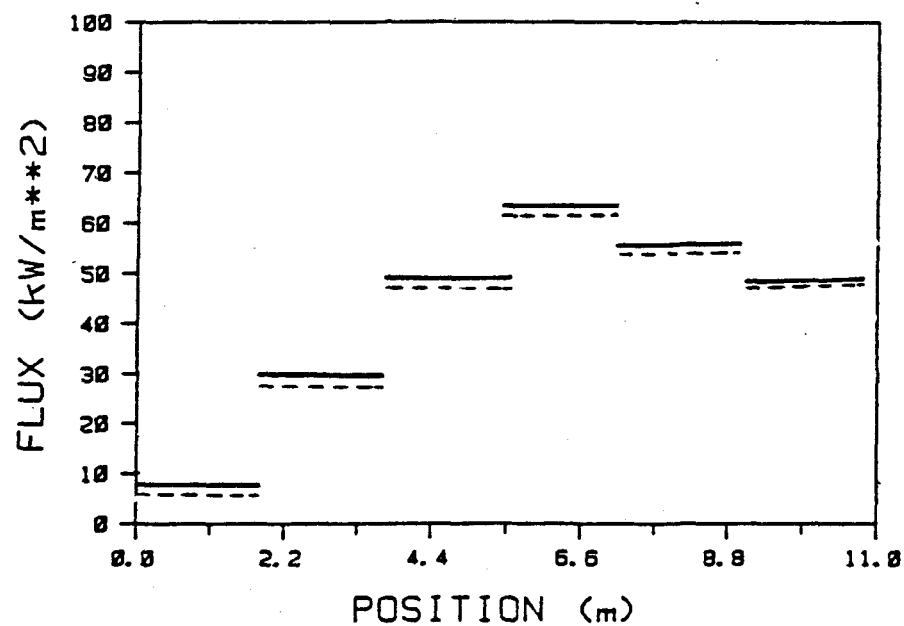


Fig 3.8.e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

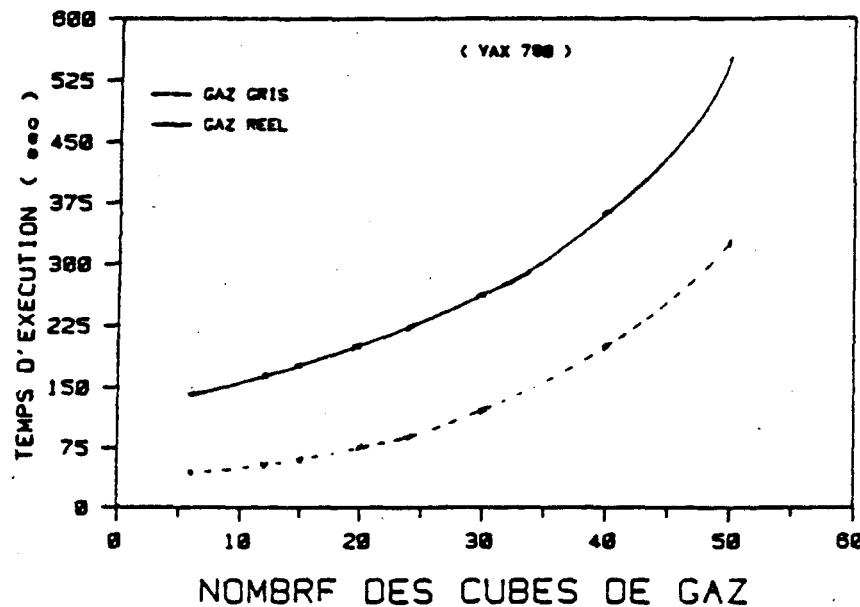


Figure 3.9 Temps d'exécution du programme IMA1.for en fonction du nombre de cubes de gaz

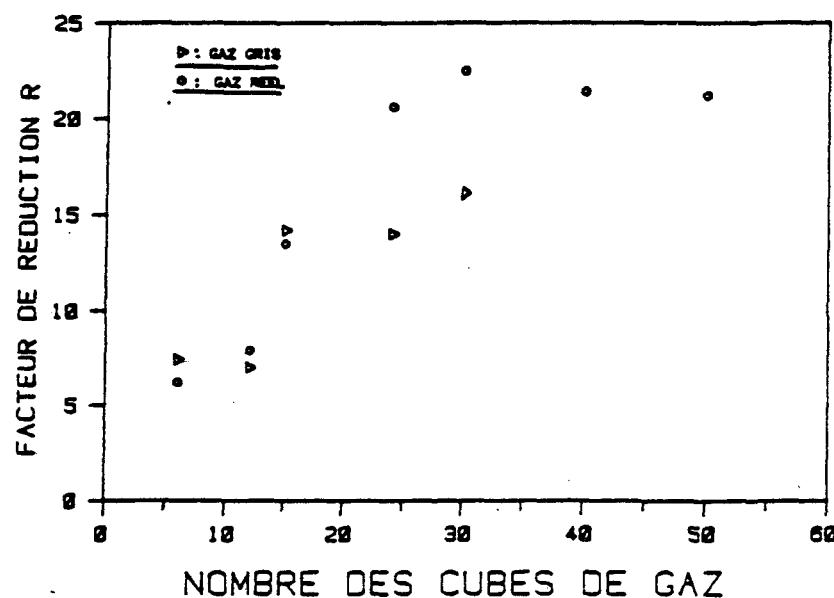


Figure 3.10 Rapport de reduction R de temps entre la méthode des plans imaginaires et la méthode de zones en fonction des cubes de gaz utilisés

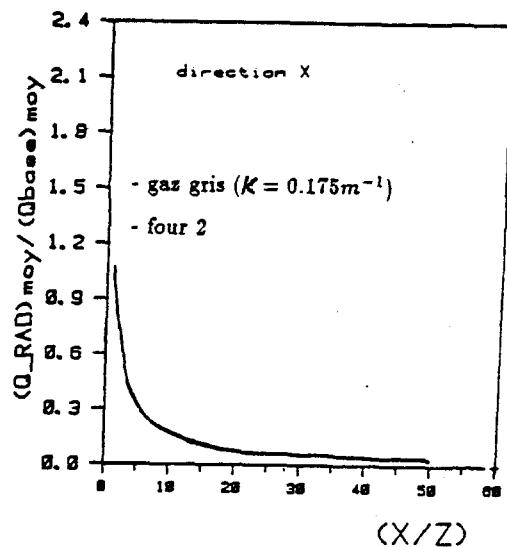
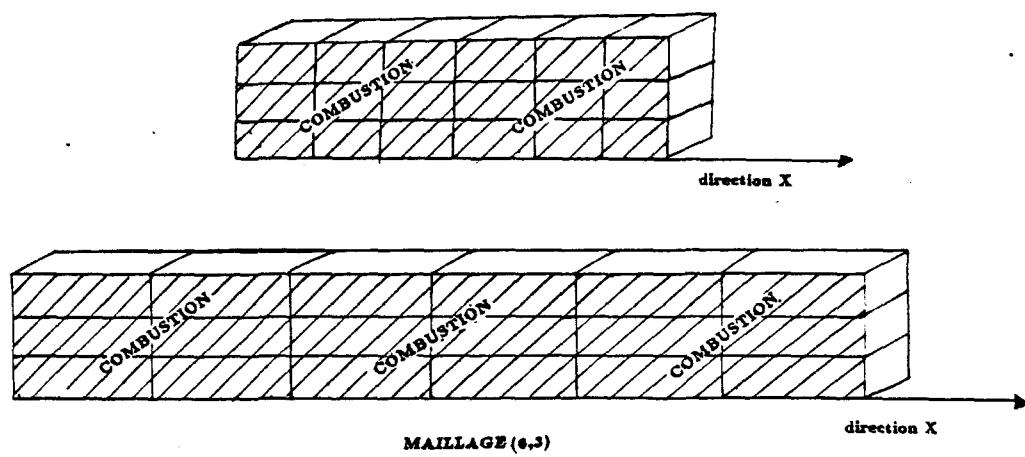


Fig 3.13 : Distribution de la radiation  
aux surfaces imaginaires 5 et 6



augmentation de la fournaise 2 selon sa longueur X

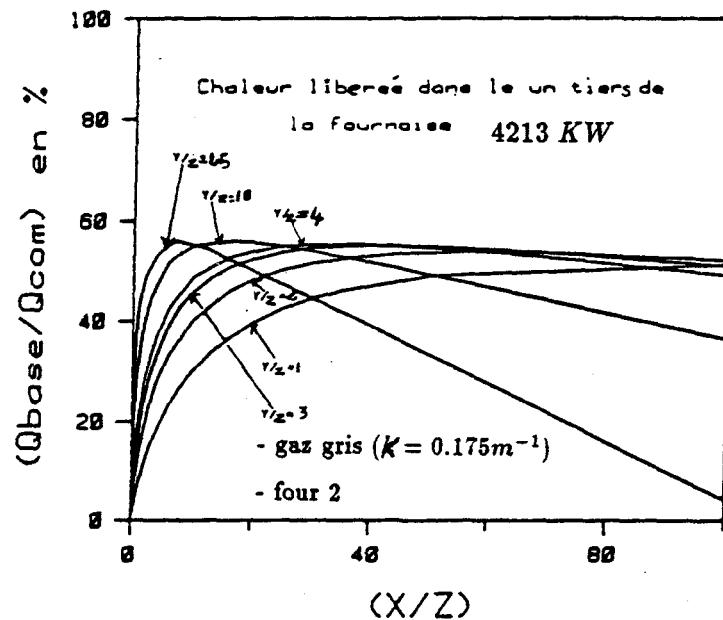
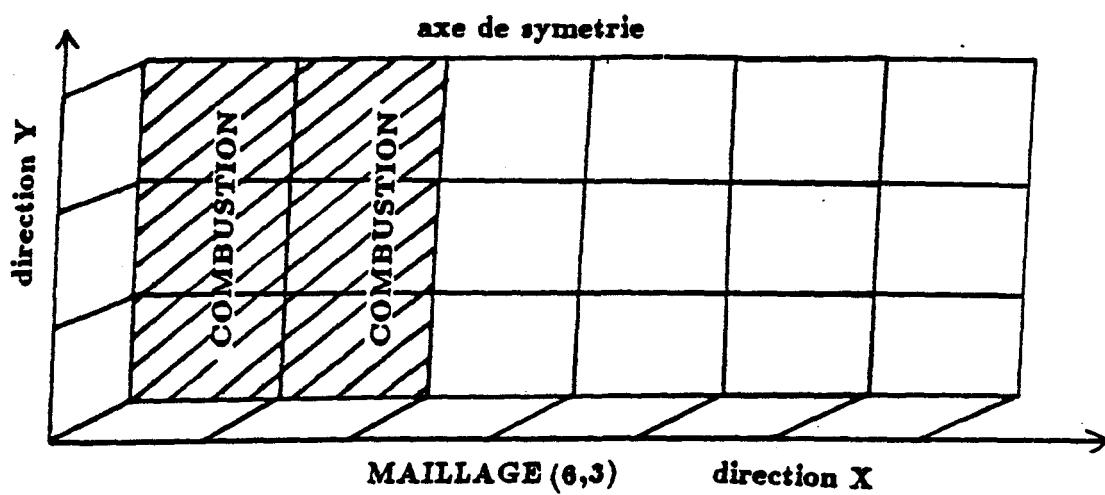


Fig 3.14 a : Fraction d'énergie reçue par la base  
en fonction de la dimension de la fournaise



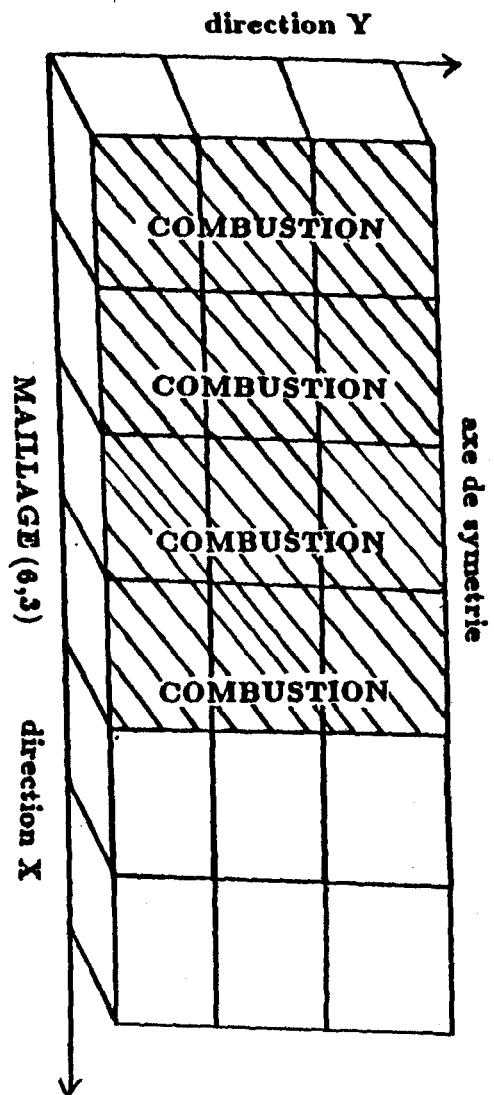
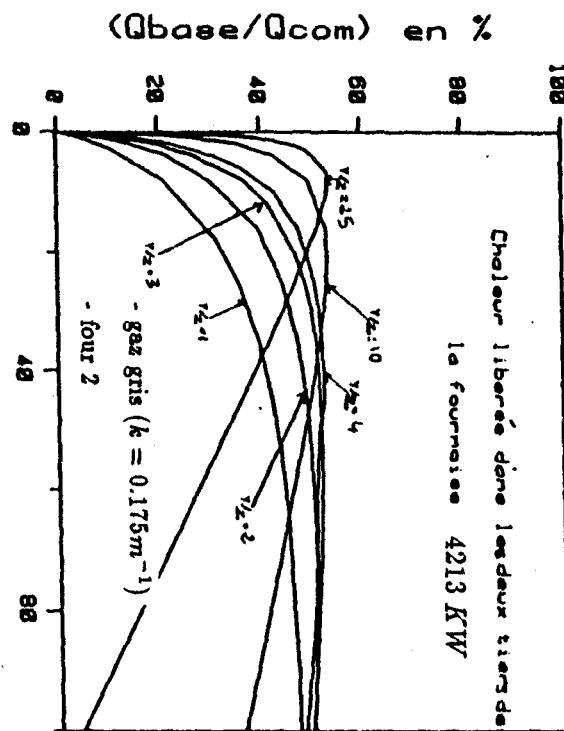


Fig 3.14.b : Fraction d'énergie reçue par la base  
en fonction de la dimension de la fournaise



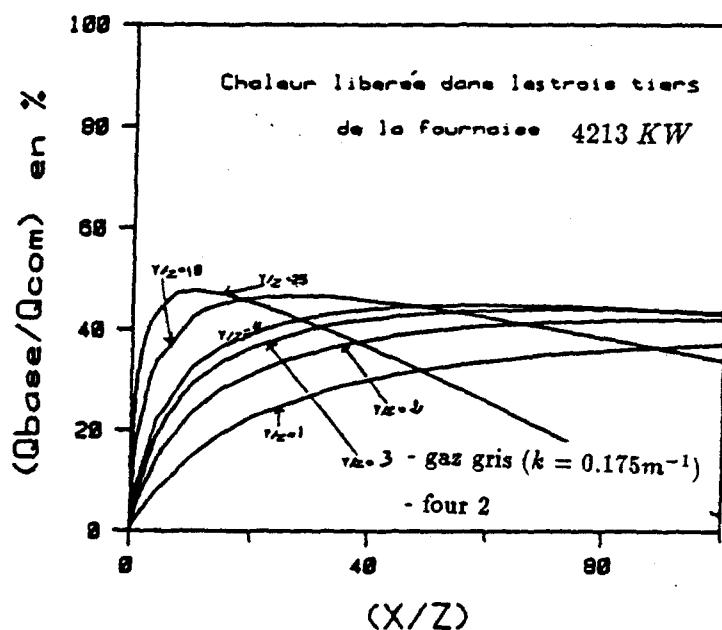
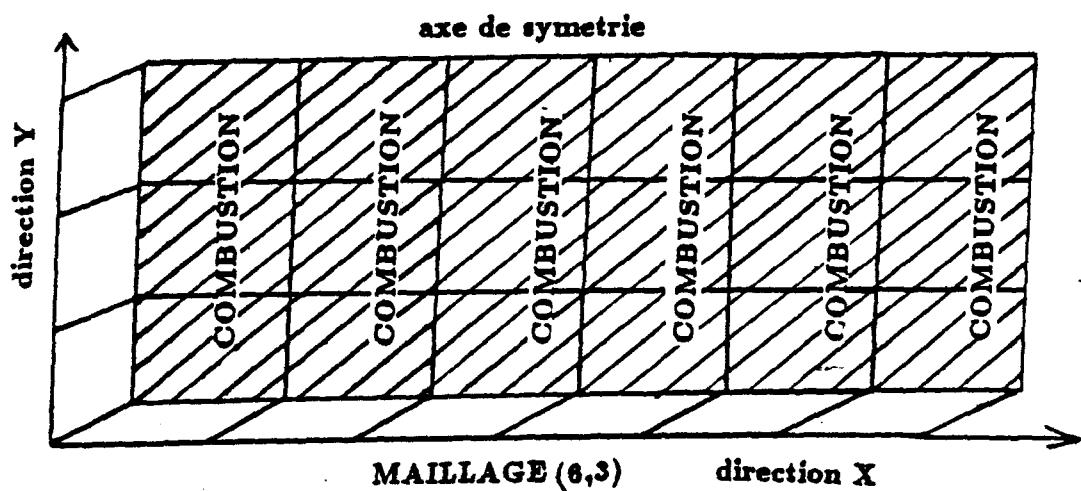


Fig 3.14.c : Fraction d'énergie reçue par la base  
en fonction de la dimension de la fournaise



#### IV CONCLUSION

La méthode des plans imaginaires, telle que présentée dans ce travail et appliquée à des problèmes à deux dimensions, nous semble très prometteuse. L'utilisation de la méthode permet de réduire considérablement le temps de calcul, caractéristique intéressante en soi, mais qui trouvera toute son utilité lorsque la résolution du transfert par rayonnement sera couplée à la solution des équations de Navier-Stokes pour permettre une modélisation plus complète d'une chambre de combustion. Le faible temps de calcul associé à cette méthode permettra d'aborder des problèmes plus complexes.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Shah, N.G, " The computation of radiation heat transfer ", Ph.D. Thesis, Dept.of Mech.Eng., Imperial college of science and technology, London, 1979.
- [2] Hottel, H.C.and Cohen, E.S "Radiant heat exchange in a gas filled enclosure :Allowance for non-uniformity of gas temperature".A.I.Ch.E.J., vol.4, N 1, 1958, pp.3-14.
- [3] Ström, B. " A simple heat transfer model for furnaces based on the zoning method ". Wärme und stoffübertragung, vol. 13, 1980, pp 47-52.
- [4] Cannon, P. " The calculation of radiative heat flux in furnace enclosures using the Monte-Carlo method ". Thèse de maîtrise, University of New-Brunswick, Chem.Eng. Dept, 1967.
- [5] Charette.A, 6MRS 921- " Complements de transfert de chaleur " (notes de cours), Université du Québec à Chicoutimi, 1986.
- [6] Jenkins, B.G. and Moles, F.D. " Modelling of heat transfer from a large enclosed flame in a rotary kiln", Trans.Ins. Chem.Eng. vol.59, 1981, pp. 17-25
- [7] Steward, F.R. and Guruz, H.K. " Mathematical simulation of an industrial boiler by the zone method of analysis ", in " Heat transfer in flames ", ed. Afgan, N.H. and Beer, J.M., Scripta Book Company, Washington, D.C. 1974, p.47.
- [8] Evans, W.J.and Piercecchi, C.D " Development of a mathematical model of the steel slab reheating process ". Iss Transactions, vol. 4, 1984, pp.33-46.

- [9] Smith, T.F, Shen, Z.F. and Friedman, J.N., " Evaluation of coefficients for the weighted sum of Gray Gases Model ", *J. Heat transfer*, 104, 602-608, 1982.
- [10] Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., " Radiative Transfer ", McGraw-Hill, New-york, 1967
- [11] Steward, F.R. and Tennankore, K.N. "Towards a finite difference solution coupled with the zone method for radiative transfer for a cylindrical combustion chamber ". *J. of Ins. of Energy*, 52, 107, 1979
- [12] James, M.C., Smith, G.M. Wolford, J.C., *Applied numerical methods for digital computation with Fortran and CSMP*, Harper and Row, New-York. 1977
- [13] Erchiqui. F., *Rapport interne, "Méthode des plans imaginaires en deux dimensions "*, Equipe de l'Ingénierie des systèmes, Université du Québec à Chicoutimi, 1986
- [14] Shoup, T, E.A, *Practical guide to computer methods for Engineers*, Prentice-Hall, New-Jersey 1979, 255p.
- [15] Munger. M., *Rapport interne, " Calcul des facteurs de réception par la technique de Monte-Carlo"*, Equipe de l'Ingénierie des systèmes, Université du Québec à Chicoutimi, 1985

## APPENDICE 1

### PROGRAMMES UTILISÉS

Pour la modélisation mathématique d'une fournaise rectangulaire en deux dimensions par la méthode des plans imaginaires, un programme principal IMA1.FOR, trois sous programmes FACF.FOR, BILA.FOR, RAYA.FOR et trois entrées ( DONNE.DAT, DEBIT.DAT et IDENT.DAT ) sont nécessaires.

A l'exception du sous-programme FACF.FOR [15], chaque étape de programmation est expliquée dans [13]. Le sous-programme FACF.FOR calcule les aires d'échange direct par la méthode de Monte-Carlo.

Figure A : Organigramme du programme IMA1.FOR

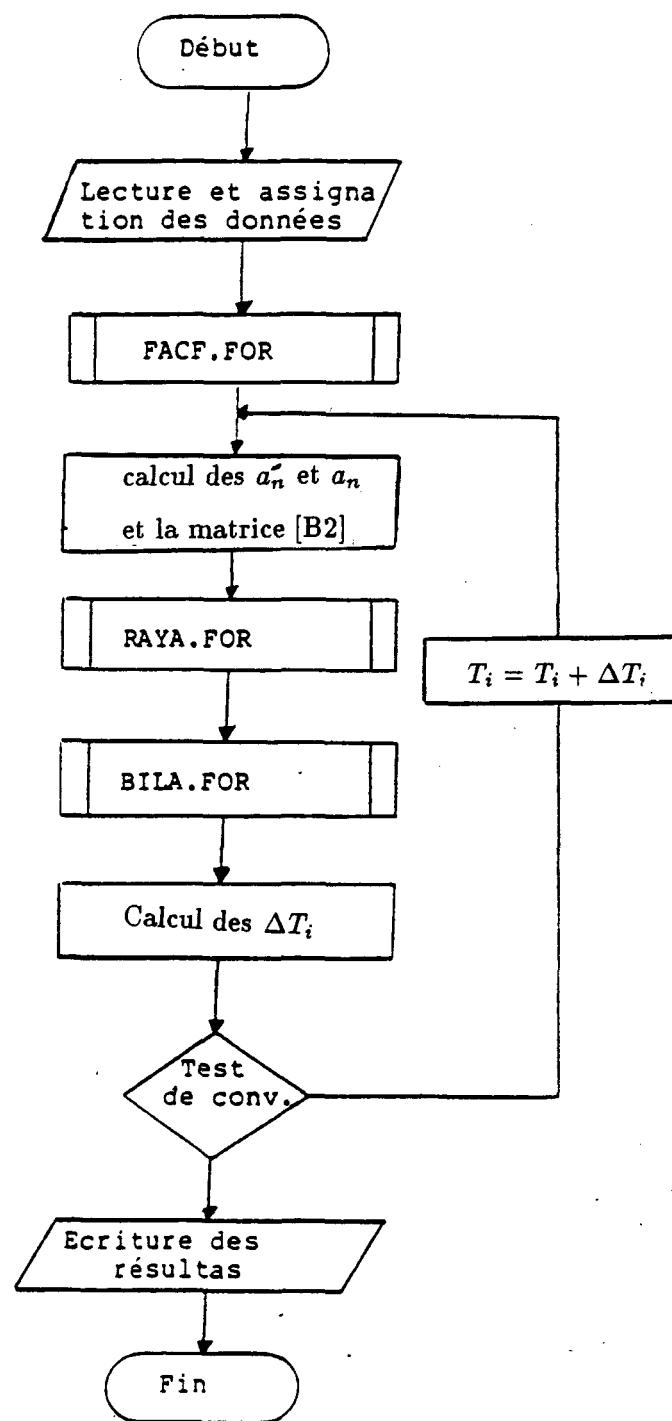


Figure A

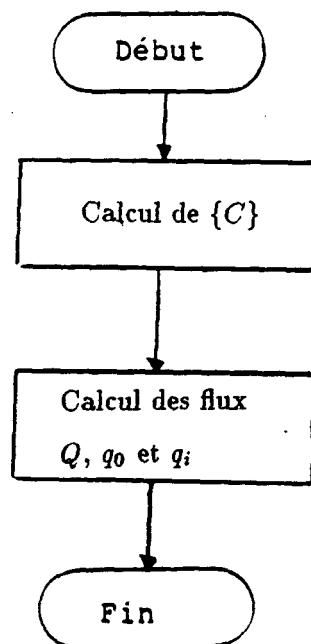


Figure B : Organigramme du sous-programme RAYA.FOR

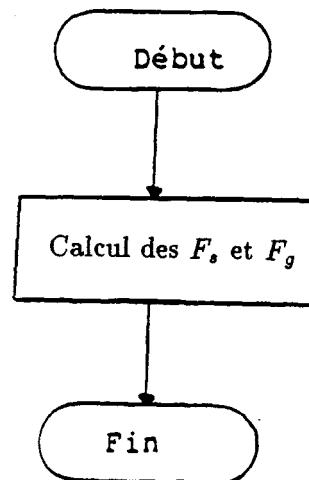


Figure C : Organigramme du sous-programme BILA.FOR

## APPENDICE 2

### FONCTIONNEMENT DES PROGRAMMES

#### ASSIGNATION

AS DEBIT.DAT FOR004

AS DONNE.DAT FOR010

AS IDENT.DAT FOR009

#### EXECUTION DU PROGRAMME PRINCIPAL IMA1.FOR

a) On désire simuler une fournaise pour la première fois:

Le programme demande à l'utilisateur si les aires d'échanges ont déjà été calculées.

L'utilisateur doit répondre au terminal: NON

b) On désire simuler une fournaise dont le découpage en zones de gaz, ainsi que la distribution des facteurs d'absorption est identique au cas a :

Le programme demande à l'utilisateur si les aires d'échanges ont déjà été calculées.

L'utilisateur doit répondre au terminal: OUI

#### SORTIES : FOR010.DAT et FOR015.DAT

Dans FOR010.DAT on trouve les flux  $q_k^{l,m}$  aux surfaces réelles k (1,2 et 4)

Dans FOR015.DAT on trouve les températures des surfaces réelles 1, 2 et 4

**ENTRÉE 1****DONNE.DAT:**

$L, M$	: Nombre de divisions selon les directions X et Y respectivement
$X, Y, Z$	: Dimensions de la fournaise selon les directions X , Y et Z (m)
$EM_2, EM_4, EM, EM_1$	: Facteurs d'émission (toit,base,bouts 5 et 6,côté)
$CON_2, CON_4, CON_1, CON_5, CON_6$	: Coefficients de convection (toit,base,côté,bout 5,bout 6)
$TS_0$	: Température initiale des surfaces réelles (K)
$TG_0$	: Température initiale des cubes de gaz (K)
$N_{fa}$	: Nombre de facteurs d'absorption
$Q_{ch}$	: Quantité de chaleur libérée par la combustion (W) dans les différentes cubes de la fournaise
$T_{base}$	: Température de la base (K)
$U_1, U_2$	: Coefficients globaux de transfert de chaleur (toit( $U_1$ ),coté( $U_1$ ),bouts( $U_2$ ))(W/m <sup>2</sup> .K)
$C_p$	: Chaleur massique ( $\frac{J}{kg.K}$ )
$T_{amb}$	: Température ambiante (K)
$Epsi$	: Indice de convergence
$Indc(1)$	: Indice 1
$TK(K_0)$	: Facteur d'absorption du gaz transparent (m <sup>-1</sup> )
$Indc(2)$	: Indice 2
$TK(K_1)$	: Facteur d'absorption du premier gaz gris (m <sup>-1</sup> )
$Indc(3)$	: Indice 3
$TK(K_2)$	: Facteur d'absorption du deuxième gaz gris (m <sup>-1</sup> )
$Indc(4)$	: Indice 4
$TK(K_3)$	: Facteur d'absorption du troisième gaz gris (m <sup>-1</sup> )

**EXEMPLE POUR L'ENTRÉE DONNE.DAT:**

$L, M$	: 5 , 3
$X, Y, Z$	: 10.75 , 3.75 , 1.2
$EM_2, EM_4, EM, EM_1$	: 0.7 , 0.5 , 0.8 , 0.7
$CON_2, CON_4, CON_1, CON_5, CON_6$	: 25.,25.,25.,50.,50.
$TS_0$	: 1200.
$TG_0$	: 1200.
$N_{fa}$	: 4
$Q_{ch}$	: 351083.,351083.,0.,0.,0. 351083.,351083.,0.,0.,0. 351083.,351083.,0.,0.,0.
$T_{base}$	: 1033.
$U_1, U_2$	: 1.25,0.005
$C_p$	: 1300.
$T_{amb}$	: 298.
$Epsi$	: 0.5
$Indc(1)$	: 1
$TK(K_0)$	: 0.0000001
$Indc(2)$	: 2
$TK(K_1)$	: 0.1117466
$Indc(3)$	: 3
$TK(K_2)$	: 1.7332560
$Indc(4)$	: 4
$TK(K_3)$	: 35.08540

**ENTRÉE 2****IDENT.DAT :**

*Rep* : Identification du gaz (Gris ou Réel)  
*Indicat* : Identification de la distribution des facteurs d'absorption dans chacune des zone-volume de la fournaise (pour gaz gris seulement)  
*Indi* : Nombre de facteurs d'absorption différents  
*Indica(2)* : Indice 1  
*TKA(1)* : premier facteur d'absorption (1/m)  
*Indica(2)* : Indice 2  
*TKA(2)* : deuxième facteur d'absorption (1/m)  
*Indica(3)* : Indice 3  
*TKA(3)* : Troisième facteur d'absorption (1/m)  
 . . .  
 . . .  
 . . .  
*etc* : etc (On répète autant qu'il y a de facteurs d'absorptions différents)

**EXEMPLE POUR L'ENTRÉE IDENT.DAT :**

*Rep* : Gris  
*Indicat* : 1 , 2 , 3 , 1 , 1 (première rangée)  
 1 , 3 , 2 , 1 , 2 (deuxième rangée)  
 3 , 2 , 1 , 3 , 2 (troisième rangée)  
*Indi* : 3  
*Indica(1)* : 1  
*TKA(1)* : 0.5  
*Indica(2)* : 2  
*TKA(2)* : 0.3  
*Indica(3)* : 3  
*TKA(3)* : 0.7

**ENTRÉE 3****DEBIT.DAT :**

- $DM_5$  : Identification des débits massiques à travers les surfaces de la direction X positive (Kg/s)  
 $DM_6$  : Identification des débits massiques à travers les surfaces de la direction X négative ( Kg/s)  
 $DM_1$  : Identification des débits massiques à travers les surfaces de la direction Y positive (Kg/s)  
 $DM_3$  : Identification des débits massiques à travers les surfaces de la direction Y négative ( Kg/s)  
 $T_{ag_5}$  : Identification de la Température d'entrée des gaz à travers les surfaces réelles 5 (K)  
 $T_{ag_6}$  : Identification de la Température d'entrée des gaz à travers les surfaces réelles 6 (K)  
 $T_{ag_1}$  : Identification de la Température d'entrée des gaz à travers les surfaces réelles 1 (K)

**EXEMPLE POUR L'ENTRÉE DEBIT.DAT avec (l,m)=(6,2):**

- $DM_5$  : 1.0 , 1.4, 1.6, 1.8, 1.6, 1.4, 1.0  
 $DM_5$  : 0.0 , 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0  
 $DM_6$  : 0.0 , 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0  
 $DM_6$  : 0.0 , 0.4, 0.6, 0.8, 0.6, 0.4, 0.0  
 $DM_1$  : 0.0 , 0.2, 0.0  
 $DM_1$  : 0.0 , 0.2, 0.0  
 $DM_1$  : 0.0 , 0.0, 0.0  
 $DM_3$  : 0.0 , 0.0, 0.0  
 $DM_3$  : 0.0 , 0.2, 0.0  
 $DM_3$  : 0.0 , 0.2, 0.0  
 $DM_3$  : 0.0 , 0.4, 0.0  
 $DM_3$  : 0.0 , 0.4, 0.0  
 $T_{ag_5}$  : 333 , 0.0  
 $T_{ag_6}$  : 0.0 , 0.0  
 $T_{ag_1}$  : 0.0 , 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0

**ANNEXE**

<b><u>ANNEXE 1</u></b> .....LES ÉQUATIONS FONDAMENTALES DE RAYONNEMENT	71
<b><u>ANNEXE 2</u></b> .....SUITE DES RÉSULTATS (GAZ RÉEL)	89
<b><u>ANNEXE 3</u></b> .....LISTAGE DES PROGRAMMES	96

**ANNEXE 1** .....LES ÉQUATIONS FONDAMENTALES DE RAYONNEMENT

A) DIRECTION DES X  
RANGE # 1, CUBE # 1

$$\frac{Q^{1,1}}{Ar} = q_{0,6}^{1,1} - q_{0,5}^{2,1}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,6}^{1,1} &= B_{6,2}^{1,1}D_2^{1,1} + B_{6,4}^{1,1}D_4^{1,1} + B_{6,5}^{1,1}D_5^{1,1} + B_{6,1}^{1,1}\left(\frac{Q^{*,1,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1}\right) \\ &\quad + B_{6,3}^{1,1}\left(\sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1}\right) + B_{6,6}^{1,1}\left(\frac{Q^{1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,5}^{2,1} &= B_{5,2}^{2,1}D_2^{2,1} + B_{5,4}^{2,1}D_4^{2,1} + B_{5,1}^{2,1}\left(\frac{Q^{*,2,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{2,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,1}\right) + B_{5,3}^{2,1} \\ &\quad \left(\sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{2,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,1}\right) + B_{5,5}^{2,1}\left(-\frac{Q^{1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{2,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,1}\right) \\ &\quad + B_{5,6}^{2,1}\left(\frac{Q^{2,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{2,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,1}\right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} &\frac{Q^{1,1}}{Ar}(1 - B_{6,6}^{1,1} - B_{5,5}^{2,1}) + \frac{Q^{2,1}}{Ar}B_{5,6}^{2,1} - \frac{Q^{*,1,1}}{As}B_{6,1}^{1,1} + \frac{Q^{*,2,1}}{As}B_{5,1}^{2,1} = \\ &\sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{1,1}D_j^{1,1} - B_{5,j}^{2,1}D_j^{2,1}) + B_{6,5}^{1,1}D_5^{1,1} + \frac{E_{b_g}^{1,1}}{Ar}(B_{6,1}^{1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,3}^{1,1} \\ &\quad \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,6}^{1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{2,1}}{Ar}(B_{5,1}^{2,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{2,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} \\ &\quad + B_{5,3}^{2,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{2,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{2,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{2,1,n} a_n(T_g) + B_{5,6}^{2,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{2,1,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE # 1.CUBE # L-1

$$\frac{Q^{L-1,1}}{Ar} = q_{0,6}^{L-1,1} - q_{0,5}^{L,1}$$

Comme:

$$\begin{aligned}
 q_{0,6}^{L-1,1} &= B_{6,2}^{L-1,1} D_2^{L-1,1} + B_{6,4}^{L-1,1} D_4^{L-1,1} + B_{6,1}^{L-1,1} \left( \frac{Q^{*,L-1,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L-1,1,n}}{As} \right. \\
 &\quad \left. a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,1} \right) + B_{6,3}^{L-1,1} \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L-1,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,1} \right) + B_{6,5}^{L-1,1} \left( -\frac{Q^{L-2,1}}{Ar} + \right. \\
 &\quad \left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L-1,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,1} \right) + B_{6,6}^{L-1,1} \left( \frac{Q^{L-1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{L-1,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,1} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{0,5}^{L,1} &= B_{5,2}^{L,1} D_2^{L,1} + B_{5,4}^{L,1} D_4^{L,1} + B_{5,6}^{L,1} D_6^{L,1} + B_{5,1}^{L,1} \left( \frac{Q^{*,L,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right) \\
 &\quad + B_{5,3}^{L,1} \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right) + B_{5,5}^{L,1} \left( -\frac{Q^{L-1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right)
 \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned}
 &\frac{Q^{L-2,1}}{Ar} B_{6,5}^{L-1,1} + \frac{Q^{L-1,1}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{L-1,1} - B_{5,5}^{L,1}) - \frac{Q^{*,L-1,1}}{As} B_{6,1}^{L-1,1} + \frac{Q^{*,L,1}}{As} B_{5,1}^{L,1} = \\
 &\sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{L-1,1} D_j^{L-1,1} - B_{5,j}^{L,1} D_j^{L,1}) - B_{5,6}^{L,1} D_6^{L,1} + \frac{E_{b_g}^{L-1,1}}{Ar} (B_{6,1}^{L-1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L-1,1,n} a_n(T_g) \\
 &\quad \frac{Ar}{As} + B_{6,3}^{L-1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L-1,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,5}^{L-1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L-1,1,n} a_n(T_g)) + B_{6,6}^{L-1,1} \\
 &\quad \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{L-1,1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{L,1}}{Ar} (B_{5,1}^{L,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,3}^{L,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} \\
 &\quad + B_{5,5}^{L,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,1,n} a_n(T_g))
 \end{aligned}$$

RANGEE m #2,M-1,CUBE # 1

$$\frac{Q^{1,m}}{Ar} = q_{0,6}^{1,m} - q_{0,5}^{2,m}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,6}^{1,m} &= B_{6,2}^{1,m} D_2^{1,m} + B_{6,4}^{1,m} D_4^{1,m} + B_{6,5}^{1,m} D_5^{1,m} + B_{6,1}^{1,m} \left( \frac{Q^{*,1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right) \\ &+ B_{6,3}^{1,m} \left( -\frac{Q^{*,1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right) + B_{6,6}^{1,m} \left( \frac{Q^{1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,5}^{2,m} &= B_{5,2}^{2,m} D_2^{2,m} + B_{5,4}^{2,m} D_4^{2,m} + B_{5,1}^{2,m} \left( \frac{Q^{*,2,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{2,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,m} \right) + B_{5,3}^{2,m} \\ &\left( -\frac{Q^{*,2,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{2,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,m} \right) + B_{5,5}^{2,m} \left( -\frac{Q^{1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{2,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,m} \right) \\ &+ B_{5,6}^{2,m} \left( \frac{Q^{2,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{2,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,m} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} &\frac{Q^{1,m}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{1,m} - B_{5,5}^{2,m}) + \frac{Q^{2,m}}{Ar} B_{5,6}^{2,m} + \frac{Q^{*,1,m-1}}{As} B_{6,3}^{1,m} - \frac{Q^{*,2,m-1}}{As} B_{5,3}^{2,m} \\ &- \frac{Q^{*,1,m}}{As} B_{6,1}^{1,m} + \frac{Q^{*,2,m}}{As} B_{5,1}^{2,m} = \sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{1,m} D_j^{1,m} - B_{5,j}^{2,m} D_j^{2,m}) + B_{6,5}^{1,m} D_5^{1,m} \\ &+ \frac{E_{b_g}^{1,m}}{Ar} (B_{6,1}^{1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,3}^{1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,6}^{1,m} \\ &\sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,m,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{2,m}}{Ar} (B_{5,1}^{2,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{2,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,3}^{2,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{2,m,n} \\ &a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{2,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{2,m,n} a_n(T_g) + B_{5,6}^{2,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{2,m,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE m#2,M-1,CUBE 1 # 2,L-2

$$\frac{Q^{l,m}}{Ar} = q_{0,6}^{l,m} - q_{0,5}^{l+1,m}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,6}^{l,m} &= B_{6,2}^{l,m} D_2^{l,m} + B_{6,4}^{l,m} D_4^{l,m} + B_{6,1}^{l,m} \left( \frac{Q^{*,l,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) + B_{6,3}^{l,m} \\ &\quad \left( -\frac{Q^{*,l,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) + B_{6,5}^{l,m} \left( -\frac{Q^{l-1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) \\ &\quad + B_{6,6}^{l,m} \left( \frac{Q^{l,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,5}^{l+1,m} &= B_{5,2}^{l+1,m} D_2^{l+1,m} + B_{5,4}^{l+1,m} D_4^{l+1,m} + B_{5,1}^{l+1,m} \left( \frac{Q^{*,l+1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l+1,m,n}}{As} a_n(T_g) \right. \\ &\quad \left. E_{b_g}^{l+1,m} \right) + B_{5,3}^{l+1,m} \left( -\frac{Q^{*,l+1,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l+1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,m} \right) + B_{5,5}^{l+1,m} \left( -\frac{Q^{l,m}}{Ar} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l+1,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,m} \right) + B_{5,6}^{l+1,m} \left( \frac{Q^{l+1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l+1,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,m} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} &\frac{Q^{l-1,m}}{Ar} B_{6,5}^{l,m} + \frac{Q^{l,m}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{l,m} - B_{5,5}^{l+1,m}) + \frac{Q^{l+1,m}}{Ar} B_{5,6}^{l+1,m} + \frac{Q^{*,l,m-1}}{As} B_{6,3}^{l,m} - \frac{Q^{*,l+1,m-1}}{As} \\ &B_{5,3}^{l+1,m} - \frac{Q^{*,l,m}}{As} B_{6,1}^{l,m} + \frac{Q^{*,l+1,m}}{As} B_{5,1}^{l+1,m} = \sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{l,m} D_j^{l,m} - B_{5,j}^{l+1,m} D_j^{l+1,m}) \\ &+ \frac{E_{b_g}^{l,m}}{Ar} (B_{6,1}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,3}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,5}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,m,n} \\ &a_n(T_g) + B_{6,6}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,m,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{l+1,m}}{Ar} (B_{5,1}^{l+1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l+1,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,3}^{l+1,m} \\ &\sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l+1,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{l+1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l+1,m,n} a_n(T_g) + B_{5,6}^{l+1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l+1,m,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE m# 2,M-1,CUBE # L-1

$$\frac{Q^{L-1,m}}{Ar} = q_{0,6}^{L-1,m} - q_{0,5}^{L,m}$$

Comme:

$$\begin{aligned}
 q_{0,6}^{L-1,m} &= B_{6,2}^{L-1,m} D_2^{L-1,m} + B_{6,4}^{L-1,m} D_4^{L-1,m} + B_{6,1}^{L-1,m} \left( \frac{Q^{*,L-1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L-1,m,n}}{As} \right. \\
 &\quad \left. a_n(T_g) \right) E_{b_g}^{L-1,m} + B_{6,3}^{L-1,m} \left( -\frac{Q^{*,L-1,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L-1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,m} \right) \\
 &\quad + B_{6,5}^{L-1,m} \left( -\frac{Q^{L-2,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L-1,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,m} \right) + B_{6,6}^{L-1,m} \left( \frac{Q^{L-1,m}}{Ar} + \right. \\
 &\quad \left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{L-1,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,m} \right) \\
 q_{0,5}^{L,m} &= B_{5,2}^{L,m} D_2^{L,m} + B_{5,4}^{L,m} D_4^{L,m} + B_{5,6}^{L,m} D_6^{L,m} + B_{5,1}^{L,m} \left( \frac{Q^{*,L,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,m,n}}{As} a_n(T_g) \right. \\
 &\quad \left. E_{b_g}^{L,m} \right) + B_{5,3}^{L,m} \left( -\frac{Q^{*,L,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m} \right) + B_{5,5}^{L,m} \left( -\frac{Q^{L-1,m}}{Ar} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m} \right)
 \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned}
 &\frac{Q^{L-2,m}}{Ar} B_{6,5}^{L-1,m} + \frac{Q^{L-1,m}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{L-1,m} - B_{5,5}^{L,m}) + \frac{Q^{*,L-1,m-1}}{As} B_{6,3}^{L-1,m} - \frac{Q^{*,L,m-1}}{As} B_{5,3}^{L,m} \\
 &\quad - \frac{Q^{*,L-1,m}}{As} B_{6,1}^{L-1,m} + \frac{Q^{*,L,m}}{As} B_{5,1}^{L,m} = \sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{L-1,m} D_j^{L-1,m} - B_{5,j}^{L,m} D_j^{L,m}) - \\
 &\quad B_{5,6}^{L,m} D_6^{L,m} + \frac{E_{b_g}^{L-1,m}}{Ar} (B_{6,1}^{L-1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L-1,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,3}^{L-1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L-1,m,n} \\
 &\quad a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,5}^{L-1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L-1,m,n} a_n(T_g)) + B_{6,6}^{L-1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{L-1,m,n} a_n(T_g) - \frac{E_{b_g}^{L,m}}{Ar} \\
 &\quad (B_{5,1}^{L,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,3}^{L,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{L,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,m,n} a_n(T_g))
 \end{aligned}$$

### RANGEE # M,CUBE # 1

$$\frac{Q^{1,M}}{Ar} = q_{0,6}^{1,M} - q_{0,5}^{2,M}$$

Comme:

$$q_{0,6}^{1,M} = B_{6,1}^{1,M} D_1^{1,M} + B_{6,2}^{1,M} D_2^{1,M} + B_{6,4}^{1,M} D_4^{1,M} + B_{6,5}^{1,M} D_5^{1,M} + B_{6,3}^{1,M} \left( -\frac{Q^{*,1,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M} \right) + B_{6,6}^{1,M} \left( \frac{Q^{1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M} \right)$$

$$q_{0,5}^{2,M} = B_{5,1}^{2,M} D_1^{2,M} + B_{5,2}^{2,M} D_2^{2,M} + B_{5,4}^{2,M} D_4^{2,M} + B_{5,3}^{2,M} \left( -\frac{Q^{*,2,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{2,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,M} \right) + a_n(T_g) E_{b_g}^{2,M} B_{5,5}^{2,M} \left( -\frac{Q^{1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{2,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,M} \right) + B_{5,6}^{2,M} \left( \frac{Q^{2,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{2,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{2,M} \right)$$

Alors:

$$\begin{aligned} & \frac{Q^{1,M}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{1,M} - B_{5,5}^{2,M}) + \frac{Q^{2,M}}{Ar} B_{5,6}^{2,M} + \frac{Q^{*,1,M-1}}{As} B_{6,3}^{1,M} - \frac{Q^{*,2,M-1}}{As} B_{5,3}^{2,M} = \\ & \sum_{j=1, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{1,M} D_j^{1,M} - B_{5,j}^{2,M} D_j^{2,M}) + B_{6,5}^{1,M} D_5^{1,M} + \frac{E_{b_g}^{1,M}}{Ar} (B_{6,3}^{1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + \\ & B_{6,6}^{1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,M,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{2,M}}{Ar} (B_{5,3}^{2,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{2,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{2,M} \\ & \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{2,M,n} a_n(T_g) + B_{5,6}^{2,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{2,M,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE # M CUBE 1# 2 , L-2

$$\frac{Q^{l,M}}{Ar} = q_{0,6}^{l,M} - q_{0,5}^{l+1,M}$$

Comme:

$$\begin{aligned}
 q_{0,6}^{l,M} &= B_{6,1}^{l,M} D_1^{l,M} + B_{6,2}^{l,M} D_2^{l,M} + B_{6,4}^{l,M} D_4^{l,M} + B_{6,3}^{l,M} \left( -\frac{Q^{*,l,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,M,n}}{As} \right. \\
 &\quad \left. a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M} \right) + B_{6,5}^{l,M} \left( -\frac{Q^{l-1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M} \right) + B_{6,6}^{l,M} \left( -\frac{Q^{*,l-1,1}}{Ar} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{0,5}^{l+1,M} &= B_{5,1}^{l+1,M} D_1^{l+1,M} + B_{5,2}^{l+1,M} D_2^{l+1,M} + B_{5,4}^{l+1,M} D_4^{l+1,M} + B_{5,3}^{l+1,M} \left( -\frac{Q^{*,l+1,M-1}}{As} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l+1,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,M} \right) + B_{5,5}^{l+1,M} \left( -\frac{Q^{l,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l+1,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,M} \right) \\
 &\quad + B_{5,6}^{l+1,M} \left( \frac{Q^{l+1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l+1,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l+1,M} \right)
 \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned}
 &\frac{Q^{l-1,M}}{Ar} B_{6,5}^{l,M} + \frac{Q^{l,M}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{l,M} - B_{5,5}^{l+1,M}) + \frac{Q^{l+1,M}}{Ar} B_{5,6}^{l+1,M} + \frac{Q^{*,l,M-1}}{As} B_{6,3}^{l,M} - \\
 &\frac{Q^{*,l+1,M-1}}{As} B_{5,3}^{l+1,M} = \sum_{j=1, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{l,M} D_j^{l,M} - B_{5,j}^{l+1,M} D_j^{l+1,M}) + \frac{E_{b_g}^{l,M}}{Ar} (B_{6,3}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,M,n} \\
 &a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,5}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,M,n} a_n(T_g) + B_{6,6}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,M,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{l+1,M}}{Ar} (B_{5,3}^{l+1,M} \\
 &\sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l+1,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{l+1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l+1,M,n} a_n(T_g) + B_{5,6}^{l+1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l+1,M,n} a_n(T_g))
 \end{aligned}$$

RANGEE # M,CUBE #L-1

$$\frac{Q^{L-1,M}}{Ar} = q_{0,6}^{L-1,M} - q_{0,5}^{L,M}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,6}^{L-1,M} &= B_{6,1}^{L-1,M} D_1^{L-1,M} + B_{6,2}^{L-1,M} D_2^{L-1,M} + B_{6,4}^{L-1,M} D_4^{L-1,M} + \\ &B_{6,3}^{L-1,M} \left( -\frac{Q^{L-1,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L-1,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,M} \right) + B_{6,5}^{L-1,M} \left( -\frac{Q^{L-2,M}}{Ar} + \right. \\ &\left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L-1,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,M} \right) + B_{6,6}^{L-1,M} \left( \frac{Q^{L-1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{L-1,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L-1,M} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,5}^{L,M} &= B_{5,1}^{L,M} D_1^{L,M} + B_{5,2}^{L,M} D_2^{L,M} + B_{5,4}^{L,M} D_4^{L,M} + B_{5,6}^{L,M} D_6^{L,M} + B_{5,3}^{L,M} \left( -\frac{Q^{L,M-1}}{As} + \right. \\ &\left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M} \right) + B_{5,5}^{L,M} \left( -\frac{Q^{L-1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} &\frac{Q^{L-2,M}}{Ar} B_{6,5}^{L-1,M} + \frac{Q^{L-1,M}}{Ar} (1 - B_{6,6}^{L-1,M} - B_{5,5}^{L,M}) + \frac{Q^{*,L-1,M-1}}{As} B_{6,3}^{L-1,M} - \frac{Q^{*,L,M-1}}{As} \\ &B_{5,3}^{L,M} = \sum_{j=1, j \neq 3}^4 (B_{6,j}^{L-1,M} D_j^{L-1,M} - B_{5,j}^{L,M} D_j^{L,M}) - B_{5,6}^{L,M} D_6^{L,M} + \frac{E_{b_g}^{L-1,M}}{Ar} (B_{6,3}^{L-1,M} \\ &\sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L-1,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{6,5}^{L-1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L-1,M,n} a_n(T_g) + B_{6,6}^{L-1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{L-1,M,n} \\ &a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{L,M}}{Ar} (B_{5,3}^{L,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{5,5}^{L,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,M,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

**B) DIRECTION DES Y**  
**RANGEES #1 CUBE # 1**

$$\frac{Q^{*,1,1}}{As} = q_{0,1}^{1,1} - q_{0,3}^{1,2}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,1}^{1,1} &= B_{1,2}^{1,1} D_2^{1,1} + B_{1,4}^{1,1} D_4^{1,1} + B_{1,5}^{1,1} D_5^{1,1} + B_{1,1}^{1,1} \left( \frac{Q^{*,1,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1} \right) \\ &\quad + B_{1,3}^{1,1} \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1} \right) + B_{1,6}^{1,1} \left( \frac{Q^{1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,3}^{1,2} &= B_{3,2}^{1,2} D_2^{1,2} + B_{3,4}^{1,2} D_4^{1,2} + B_{3,5}^{1,2} D_5^{1,2} + B_{3,1}^{1,2} \left( \frac{Q^{*,1,2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,2} \right) + \\ &\quad B_{3,3}^{1,2} \left( -\frac{Q^{*,1,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,2} \right) + B_{3,6}^{1,2} \left( \frac{Q^{1,2}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,2,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,2} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} \frac{-Q^{1,1}}{Ar} B_{1,6}^{1,1} + \frac{Q^{1,2}}{Ar} B_{3,6}^{1,2} + \frac{Q^{*,1,1}}{As} (1 - B_{1,1}^{1,1} - B_{3,3}^{1,2}) + \frac{Q^{*,1,2}}{As} B_{3,1}^{1,2} = \\ \sum_{j=2, j \neq 3}^5 (B_{1,j}^{1,1} D_j^{1,1} - B_{3,j}^{1,2} D_j^{1,2}) + \frac{E_{b_g}^{1,1}}{Ar} (B_{1,1}^{1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,1,n} \\ a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,6}^{1,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{1,2}}{Ar} (B_{3,1}^{1,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,3}^{1,2} \\ \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,6}^{1,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,2,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE # 1 CUBE 1# 2 , L-1

$$\frac{Q^{*,l,1}}{As} = q_{0,1}^{l,1} - q_{0,3}^{l,2}$$

Comme:

$$\begin{aligned}
 q_{0,1}^{l,1} &= B_{1,2}^{l,1} D_2^{l,1} + B_{1,4}^{l,1} D_4^{l,1} + B_{1,1}^{l,1} \left( \frac{Q^{*,l,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,1} \right) + B_{1,3}^{l,1} \\
 &\quad \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,1} \right) + B_{1,5}^{l,1} \left( -\frac{Q^{l-1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,1} \right) + B_{1,6}^{l,1} \\
 &\quad \left( \frac{Q^{l,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,1} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{0,3}^{l,2} &= B_{3,2}^{l,2} D_2^{l,2} + B_{3,4}^{l,2} D_4^{l,2} + B_{3,1}^{l,2} \left( \frac{Q^{*,l,2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,2} \right) + B_{3,3}^{l,2} \left( -\frac{Q^{*,l,1}}{As} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,2} \right) + B_{3,5}^{l,2} \left( -\frac{Q^{l-1,2}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,2,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,2} \right) + B_{3,6}^{l,2} \left( \frac{Q^{l,2}}{Ar} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,2,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,2} \right)
 \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned}
 &\frac{Q^{l-1,1}}{Ar} B_{1,5}^{l,1} - \frac{Q^{l-1,2}}{Ar} B_{3,5}^{l,2} - \frac{Q^{l,1}}{Ar} B_{1,6}^{l,1} + \frac{Q^{l,2}}{Ar} B_{3,6}^{l,2} + \frac{Q^{*,l,1}}{As} (1 - B_{1,1}^{l,1} - B_{3,3}^{l,2}) + \frac{Q^{*,l,2}}{As} B_{3,1}^{l,2} = \\
 &\sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{1,j}^{l,1} D_j^{l,1} - B_{3,j}^{l,2} D_j^{l,2}) + \frac{E_{b_g}^{l,1}}{Ar} (B_{1,1}^{l,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{l,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,1,n} a_n(T_g) \\
 &\quad \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{l,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,1,n} a_n(T_g) + B_{1,6}^{l,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{l,2}}{Ar} (B_{3,1}^{l,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} \\
 &\quad + B_{3,3}^{l,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,5}^{l,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,2,n} a_n(T_g) + B_{3,6}^{l,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,2,n} a_n(T_g))
 \end{aligned}$$

RANGEE m#2,M-2,CUBE 1 # 2,L-1

$$\frac{Q^{*,l,m}}{As} = q_{0,1}^{l,m} - q_{0,3}^{l,m+1}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,1}^{l,m} &= B_{1,2}^{l,m} D_2^{l,m} + B_{1,4}^{l,m} D_4^{l,m} + B_{1,1}^{l,m} \left( \frac{Q^{*,l,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) + B_{1,3}^{l,m} \\ &\quad \left( -\frac{Q^{l,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) + B_{1,5}^{l,m} \left( -\frac{Q^{l-1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) \\ &\quad + B_{1,6}^{l,m} \left( \frac{Q^{l,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,m,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,3}^{l,m+1} &= B_{3,2}^{l,m+1} D_2^{l,m+1} + B_{3,4}^{l,m+1} D_4^{l,m+1} + B_{3,1}^{l,m+1} \left( \frac{Q^{*,l,m+1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,m+1,n}}{As} a_n(T_g) \right. \\ &\quad \left. E_{b_g}^{l,m+1} \right) + B_{3,3}^{l,m+1} \left( -\frac{Q^{*,l,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,m+1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m+1} \right) + B_{3,5}^{l,m+1} \left( -\frac{Q^{l-1,m+1}}{Ar} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,m+1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m+1} \right) + B_{3,6}^{l,m+1} \left( \frac{Q^{l,m+1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,m+1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,m+1} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} &\frac{Q^{l-1,m}}{Ar} B_{1,5}^{l,m} - \frac{Q^{l-1,m+1}}{Ar} B_{3,5}^{l,m+1} - \frac{Q^{l,m}}{Ar} B_{1,6}^{l,m} + \frac{Q^{l,m+1}}{Ar} B_{3,6}^{l,m+1} + \frac{Q^{*,l,m-1}}{As} B_{1,3}^{l,m} + \\ &\frac{Q^{*,l,m}}{As} (1 - B_{1,1}^{l,m} - B_{3,3}^{l,m+1}) + \frac{Q^{*,l,m+1}}{As} B_{3,1}^{l,m+1} = \sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{1,j}^{l,m} D_j^{l,m} - B_{3,j}^{l,m+1} D_j^{l,m+1}) \\ &+ \frac{E_{b_g}^{l,m}}{Ar} (B_{1,1}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,m,n} \\ &a_n(T_g) + B_{1,6}^{l,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,m,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{l,m+1}}{Ar} (B_{3,1}^{l,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,3}^{l,m+1} \\ &\sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,5}^{l,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,m+1,n} a_n(T_g) + B_{3,6}^{l,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,m+1,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE m# 2 .M-2 CUBE # L

$$\frac{Q^{*,L,m}}{As} = q_{0,1}^{L,m} - q_{0,3}^{L,m+1}$$

Comme:

$$\begin{aligned} q_{0,1}^{L,m} &= B_{1,2}^{L,m} D_2^{L,m} + B_{1,4}^{L,m} D_4^{L,m} + B_{1,6}^{L,m} D_6^{L,m} + B_{1,1}^{L,m} \left( \frac{Q^{*,L,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,m,n}}{As} \right. \\ &\quad \left. a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m} \right) + B_{1,3}^{L,m} \left( -\frac{Q^{*,L,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m} \right) + B_{1,5}^{L,m} \\ &\quad \left( -\frac{Q^{L-1,m}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{0,3}^{L,m+1} &= B_{3,2}^{L,m+1} D_2^{L,m+1} + B_{3,4}^{L,m+1} D_4^{L,m+1} + B_{3,6}^{L,m+1} D_6^{L,m+1} + B_{3,1}^{L,m+1} \left( \frac{Q^{*,L,m+1}}{As} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,m+1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m+1} \right) + B_{3,3}^{L,m+1} \left( -\frac{Q^{*,L,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,m+1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m+1} \right) \\ &\quad + B_{3,5}^{L,m+1} \left( -\frac{Q^{L-1,m+1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,m+1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,m+1} \right) \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned} \frac{Q^{L-1,m}}{Ar} B_{1,5}^{L,m} - \frac{Q^{L-1,m+1}}{Ar} B_{3,5}^{L,m+1} + \frac{Q^{*,L,m-1}}{As} B_{1,3}^{L,m} + \frac{Q^{*,L,m}}{As} (1 - B_{1,1}^{L,m} - B_{3,3}^{L,m+1}) \\ + \frac{Q^{*,L,m+1}}{As} B_{3,1}^{L,m+1} = \sum_{j=2, j \neq 3, 5}^6 (B_{1,j}^{L,m} D_j^{L,m} - B_{3,j}^{L,m+1} D_j^{L,m+1}) + \frac{E_{b_g}^{L,m}}{Ar} (B_{1,1}^{L,m} \\ \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + \cancel{B_{1,3}^{L,m}} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,m,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{L,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,m,n} a_n(T_g)) \\ - \frac{E_{b_g}^{L,m+1}}{Ar} (B_{3,1}^{L,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,3}^{L,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} \\ + B_{3,5}^{L,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,m+1,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE # M-1,CUBE #1

$$\frac{Q^{1,M-1}}{As} = q_{0,1}^{1,M-1} - q_{0,3}^{1,M}$$

Comme:

$$q_{0,1}^{1,M-1} = B_{1,2}^{1,M-1} D_2^{1,M-1} + B_{1,4}^{1,M-1} D_4^{1,M-1} + B_{1,5}^{1,M-1} D_5^{1,M-1} + B_{1,1}^{1,M-1} \left( \frac{Q^{*,1,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,M-1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M-1} \right) + B_{1,3}^{1,M-1} \left( -\frac{Q^{*,1,M-2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,M-1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M-1} \right) + B_{1,6}^{1,M-1} \left( \frac{Q^{1,M-1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,M-1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M-1} \right)$$

$$q_{0,3}^{1,M} = B_{3,1}^{1,M} D_1^{1,M} + B_{3,2}^{1,M} D_2^{1,M} + B_{3,4}^{1,M} D_4^{1,M} + B_{3,5}^{1,M} D_5^{1,M} + B_{3,3}^{1,M} \left( -\frac{Q^{*,1,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M} \right) + B_{3,6}^{1,M} \left( \frac{Q^{1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,M} \right)$$

Alors:

$$\begin{aligned} -\frac{Q^{1,M-1}}{Ar} B_{1,6}^{1,M-1} + \frac{Q^{1,M}}{Ar} B_{3,6}^{1,M} + \frac{Q^{*,1,M-2}}{As} B_{1,3}^{1,M-1} + \frac{Q^{*,1,M-1}}{As} (1 - B_{1,1}^{1,M-1} - B_{3,3}^{1,M}) = \\ \sum_{j=2, j \neq 3}^5 (B_{1,j}^{1,M-1} D_j^{1,M-1} - B_{3,j}^{1,M} D_j^{1,M}) - B_{3,1}^{1,M} D_1^{1,M} + \frac{E_{b_g}^{1,M-1}}{Ar} (B_{1,1}^{1,M-1} \\ \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,M-1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{1,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,M-1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,6}^{1,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,M-1,n} \\ a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{1,M}}{Ar} (B_{3,3}^{1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,6}^{1,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,M,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE #1 CUBE # L

$$\frac{Q^{*,L,1}}{As} = q_{0,1}^{L,1} - q_{0,3}^{L,2}$$

Comme:

$$q_{0,1}^{L,1} = B_{1,2}^{L,1} D_2^{L,1} + B_{1,4}^{L,1} D_4^{L,1} + B_{1,6}^{L,1} D_6^{L,1} + B_{1,1}^{L,1} \left( \frac{Q^{*,L,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right) + B_{1,3}^{L,1} \left( \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right) + B_{1,5}^{L,1} \left( -\frac{Q^{L-1,1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,1} \right)$$

$$q_{0,3}^{L,2} = B_{3,2}^{L,2} D_2^{L,2} + B_{3,4}^{L,2} D_4^{L,2} + B_{3,6}^{L,2} D_6^{L,2} + B_{3,1}^{L,2} \left( \frac{Q^{*,L,2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,2} \right) + B_{3,3}^{L,2} \left( -\frac{Q^{L,1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,2,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,2} \right) + B_{3,5}^{L,2} \left( -\frac{Q^{L-1,2}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,2,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,2} \right)$$

Alors:

$$\begin{aligned} \frac{Q^{L-1,1}}{Ar} B_{1,5}^{L,1} - \frac{Q^{L-1,2}}{Ar} B_{3,5}^{L,2} + \frac{Q^{*,L,1}}{As} (1 - B_{1,1}^{L,1} - B_{3,3}^{L,2}) + \frac{Q^{*,L,2}}{As} B_{3,1}^{L,2} = \\ \sum_{j=2, j \neq 3, 5}^6 (B_{1,j}^{L,1} D_j^{L,1} - B_{3,j}^{L,2} D_j^{L,2}) + \frac{E_{b_g}^{L,1}}{Ar} (B_{1,1}^{L,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{L,1} \\ \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{L,1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{L,2}}{Ar} (B_{3,1}^{L,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} \\ + B_{3,3}^{L,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,2,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,5}^{L,2} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,2,n} a_n(T_g)) \end{aligned}$$

RANGEE m# 2 M-2 CUBE # 1

$$\frac{Q^{*,1,m}}{As} = q_{0,1}^{1,m} - q_{0,3}^{1,m+1}$$

Comme:

$$q_{0,1}^{1,m} = B_{1,2}^{1,m} D_2^{1,m} + B_{1,4}^{1,m} D_4^{1,m} + B_{1,5}^{1,m} D_5^{1,m} + B_{1,1}^{1,m} \left( \frac{Q^{*,1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right) + B_{1,3}^{1,m} \left( -\frac{Q^{*,1,m-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right) + B_{1,6}^{1,m} \left( \frac{Q^{1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,m,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} \right)$$

$$q_{0,3}^{1,m+1} = B_{3,2}^{1,m+1} D_2^{1,m+1} + B_{3,4}^{1,m+1} D_4^{1,m+1} + B_{3,5}^{1,m+1} D_5^{1,m+1} + B_{3,1}^{1,m+1} \left( \frac{Q^{*,1,m+1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{1,m+1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m+1} \right) + B_{3,3}^{1,m+1} \left( -\frac{Q^{*,1,m}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{1,m+1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m+1} \right) + B_{3,6}^{1,m+1} \left( \frac{Q^{1,m+1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{1,m+1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m+1} \right)$$

Alors:

$$\begin{aligned} -\frac{Q^{1,m}}{Ar} B_{1,6}^{1,m} + \frac{Q^{1,m+1}}{Ar} B_{3,6}^{1,m+1} + \frac{Q^{*,1,m-1}}{As} B_{1,3}^{1,m} + \frac{Q^{*,1,m}}{As} (1 - B_{1,1}^{1,m} - B_{3,3}^{1,m+1}) + \frac{Q^{*,1,m+1}}{As} B_{3,1}^{1,m+1} = \sum_{j=2, j \neq 3}^5 (B_{1,j}^{1,m} D_j^{1,m} - B_{3,j}^{1,m+1} D_j^{1,m+1}) + \frac{E_{b_g}^{1,m}}{Ar} (B_{1,1}^{1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,m,n} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m} + B_{1,3}^{1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,m,n} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m+1} - \frac{E_{b_g}^{1,m+1}}{Ar} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,6}^{1,m} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,m,n} a_n(T_g) E_{b_g}^{1,m+1} - \frac{E_{b_g}^{1,m+1}}{Ar} a_n(T_g) \frac{Ar}{As}) + (B_{3,1}^{1,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{1,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,3}^{1,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{1,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,6}^{1,m+1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{1,m+1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As}) \end{aligned}$$

RANGEE # M-1,CUBE # 2,L-1

$$\frac{Q^{*,l,M-1}}{As} = q_{0,1}^{l,M-1} - q_{0,3}^{l,M}$$

Comme:

$$\begin{aligned}
 q_{0,1}^{l,M-1} &= B_{1,2}^{l,M-1} D_2^{l,M-1} + B_{1,4}^{l,M-1} D_4^{l,M-1} + B_{1,1}^{l,M-1} \left( \frac{Q^{*,l,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{l,M-1,n}}{As} \right. \\
 &\quad \left. a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M-1} + B_{1,3}^{l,M-1} \left( -\frac{Q^{*,l,M-2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,M-1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M-1} \right) \right. \\
 &\quad \left. + B_{1,5}^{l,M-1} \left( -\frac{Q^{l-1,M-1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,M-1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M-1} \right) + B_{1,6}^{l,M-1} \left( \frac{Q^{l,M-1}}{Ar} + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,M-1,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M-1} \right) \right. \\
 q_{0,3}^{l,M} &= B_{3,1}^{l,M} D_1^{l,M} + B_{3,2}^{l,M} D_2^{l,M} + B_{3,4}^{l,M} D_4^{l,M} + B_{3,3}^{l,M} \left( -\frac{Q^{*,l,M}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{l,M,n}}{As} a_n(T_g) \right. \\
 &\quad \left. E_{b_g}^{l,M} \right) + B_{3,5}^{l,M} \left( -\frac{Q^{*,l-1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{l,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M} \right) + B_{3,6}^{l,M} \left( \frac{Q^{l,M}}{Ar} + \right. \\
 &\quad \left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_6^{l,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{l,M} \right)
 \end{aligned}$$

Alors:

$$\begin{aligned}
 &\frac{Q^{l-1,M-1}}{Ar} B_{1,5}^{l,M-1} - \frac{Q^{l-1,M}}{Ar} B_{3,5}^{l,M} - \frac{Q^{l,M-1}}{Ar} B_{1,6}^{l,M-1} + \frac{Q^{l,M}}{Ar} B_{3,6}^{l,M} + \frac{Q^{*,l,M-2}}{As} B_{1,3}^{l,M-1} \\
 &\quad + \frac{Q^{*,l,M-1}}{As} (1 - B_{1,1}^{l,M-1} - B_{3,3}^{l,M}) = \sum_{j=2, j \neq 3}^4 (B_{1,j}^{l,M-1} D_j^{l,M-1} - B_{3,j}^{l,M} D_j^{l,M}) - \\
 &\quad B_{3,1}^{l,M} D_1^{l,M} + \frac{E_{b_g}^{l,M-1}}{Ar} (B_{1,1}^{l,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{l,M-1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{l,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,M-1,n} \\
 &\quad a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{l,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,M-1,n} a_n(T_g) + B_{1,6}^{l,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,M-1,n} a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{l,M}}{Ar} \\
 &\quad (B_{3,3}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{l,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,5}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{l,M,n} a_n(T_g) + B_{3,6}^{l,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_6^{l,M,n} a_n(T_g))
 \end{aligned}$$

RANGEE # M-1,CUBE #L

$$\frac{Q^{L,M-1}}{As} = q_{0,1}^{L,M-1} - q_{0,3}^{L,M}$$

Comme:

$$q_{0,1}^{L,M-1} = B_{1,2}^{L,M-1} D_2^{L,M-1} + B_{1,4}^{L,M-1} D_4^{L,M-1} + B_{1,6}^{L,M-1} D_6^{L,M-1} + B_{1,1}^{L,M-1} \\ \left( -\frac{Q^{*,L,M-1}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_1^{L,M-1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M-1} \right) + B_{1,3}^{L,M-1} \left( -\frac{Q^{L,M-2}}{As} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,M-1,n}}{As} \right. \\ \left. a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M-1} \right) + B_{1,5}^{L,M-1} \left( -\frac{Q^{L-1,M-1}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,M-1,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M-1} \right)$$

$$q_{0,3}^{L,M} = B_{3,1}^{L,M} D_1^{L,M} + B_{3,2}^{L,M} D_2^{L,M} + B_{3,4}^{L,M} D_4^{L,M} + B_{3,6}^{L,M} D_6^{L,M} + B_{3,3}^{L,M} \left( -\frac{Q^{L,M-1}}{As} + \right. \\ \left. \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_3^{L,M,n}}{As} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M} \right) + B_{3,5}^{L,M} \left( -\frac{Q^{L-1,M}}{Ar} + \sum_{n=1}^3 \frac{\bar{g}s_5^{L,M,n}}{Ar} a_n(T_g) E_{b_g}^{L,M} \right)$$

Alors:

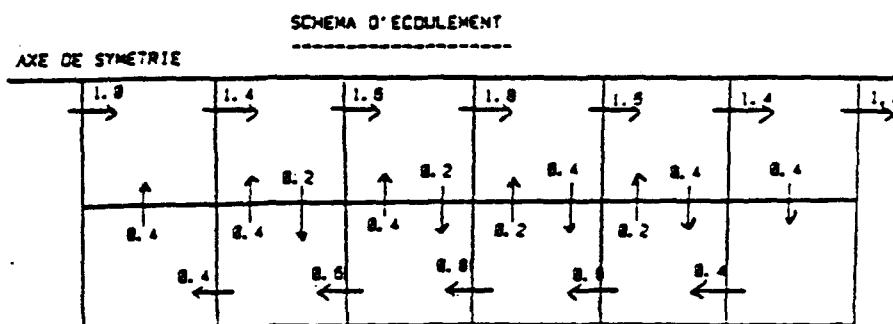
$$\frac{Q^{L-1,M-1}}{Ar} B_{1,5}^{L,M-1} - \frac{Q^{L-1,M}}{Ar} B_{3,5}^{L,M} + \frac{Q^{*,L,M-2}}{As} B_{1,3}^{L,M-1} + \frac{Q^{*,L,M-1}}{As} (1 - B_{1,1}^{L,M-1} - \\ B_{3,3}^{L,M}) = \sum_{j=2, j \neq 3, 5}^6 (B_{1,j}^{L,M-1} D_j^{L,M-1} - B_{3,j}^{L,M} D_j^{L,M}) - B_{3,1}^{L,M} D_1^{L,M} + \frac{E_{b_g}^{L,M-1}}{Ar} (B_{1,1}^{L,M-1} - \\ \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_1^{L,M-1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,3}^{L,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,M-1,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{1,5}^{L,M-1} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,M-1,n} \\ a_n(T_g)) - \frac{E_{b_g}^{L,M}}{Ar} (B_{3,3}^{L,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_3^{L,M,n} a_n(T_g) \frac{Ar}{As} + B_{3,5}^{L,M} \sum_{n=1}^3 \bar{g}s_5^{L,M,n} a_n(T_g))$$

ANNEXE 2:.....SUITE DES FIGURES OBTENUES (GAZ RÉEL)

tableau 3.6

(couplé à la figure 3.9):

Comparaison des valeurs calculées par la présente méthode et la méthode de zones (valeurs entre parenthèses) pour le modèle 2 du gaz réel ( avec convection ).



## TEMÉRATURE DU TOIT (K)

RANGÉE 01	1014. (1037)	1168 (1169)	1276 (1264)	1338 (1316)	1308 (1283)	1281 (1262)
RANGÉE 02	1091 (1111)	1172 (1172)	1246 (1230)	1288 (1263)	1273 (1248)	1255 (1234)

## TEMÉRATURE DES CUBES DE GAZ (K)

RANGÉE 01	953 (955)	1260 (1254)	1448 (1439)	1577 (1560)	1489 (1461)	1434 (1390)
RANGÉE 02	1131 (1159)	1220 (1250)	1296 (1328)	1342 (1367)	1315 (1330)	1294 (1297)

FLUX DE CHALEUR A LA BASE ( $\frac{KW}{m^2}$ )

RANGÉE 01	0,6 (2.2)	26.9 (30.2)	51.7 (56.3)	67.8 (73.7)	59.0 (63.3)	51.6 (54.5)
RANGÉE 02	11.4 (15.3)	27.6 (29.9)	44.6 (45.9)	54.7 (54.9)	50.6 (50.6)	46.0 (45.3)

Fig.3.9 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:

• MODÈLE 2 :

- Gaz réel (modèle 2)
- Circulation et convection dans la fournaise

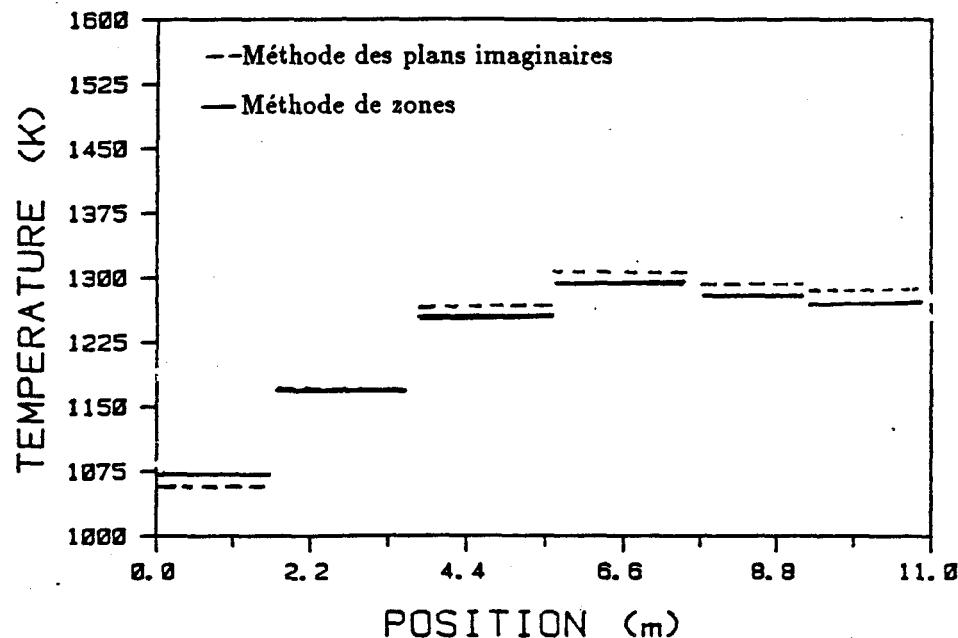


Fig 3.9. a TEMPERATURE OU TOIT

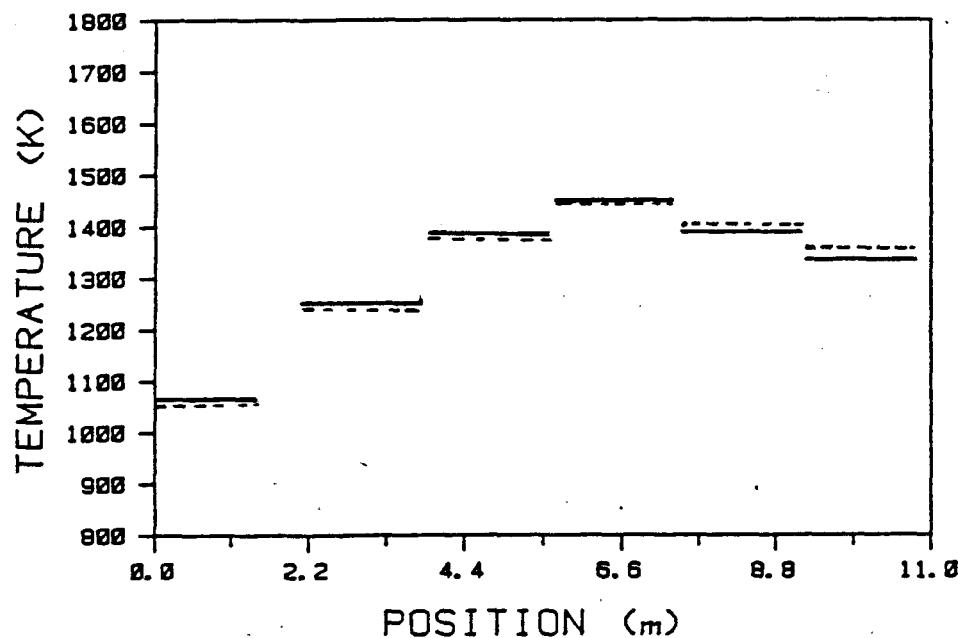


Fig 3.9. b TEMPERATURE DES GAZ

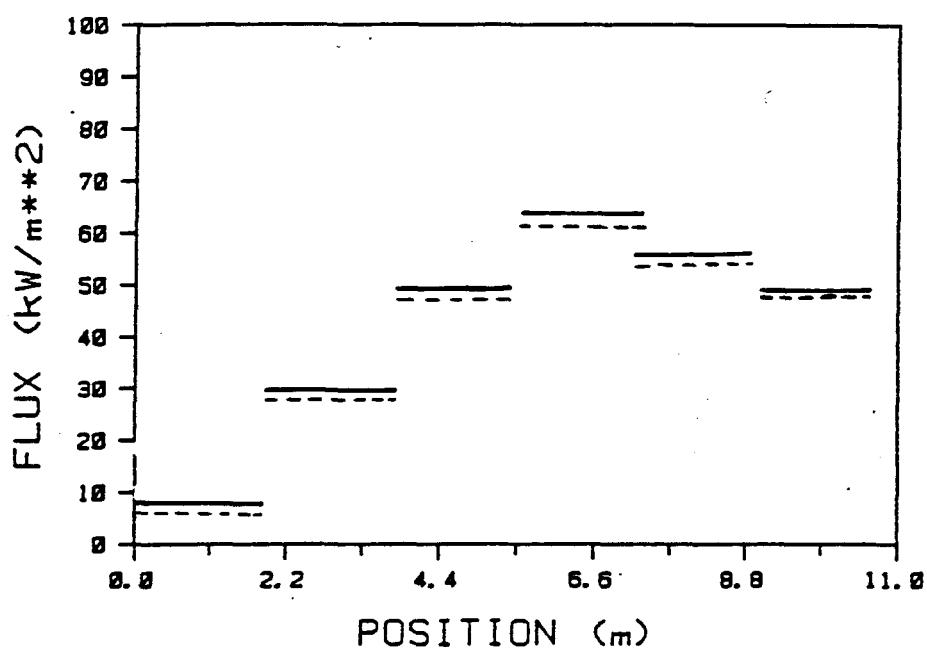
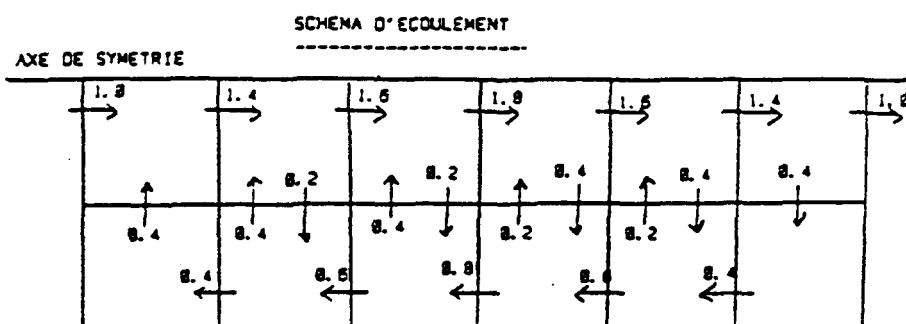


Fig 3.9. c FLUX DE CHALEUR A LA BASE

tableau 3.7

(couplé à la figure 3.10):

Comparaison des valeurs calculées par la présente méthode et la méthode de zones (valeurs entre parenthèses) pour le modèle 3 du gaz réel ( avec convection ).



## TEMÉRATURE DU TOIT (K)

RANGÉE#1	1026 (1037)	1172 (1169)	1276 (1264)	1333 (1316)	1304 (1283)	1277 (1262)
RANGÉE#2	1093 (1111)	1177 (1172)	1253 (1230)	1293 (1263)	1277 (1248)	1259 (1234)

## TEMÉRATURE DES CUBES DE GAZ (K)

RANGÉE#1	962 (955)	1265 (1254)	1449 (1439)	1570 (1560)	1482 (1461)	1426 (1390)
RANGÉE#2	1131 (1159)	1226 (1250)	1305 (1328)	1349 (1367)	1321 (1330)	1299 (1297)

FLUX DE CHALEUR A LA BASE  $\frac{KW}{m^2}$ 

RANGÉE#1	2.3 (2.2)	26.1 (30.2)	51.8 (56.3)	69.3 (73.3)	60.3 (63.3)	52.8 (54.5)
RANGÉE#2	11.0 15.3	26.5 (29.9)	42.9 (45.9)	53.4 (54.9)	49.5 (50.6)	45.1 (45.3)

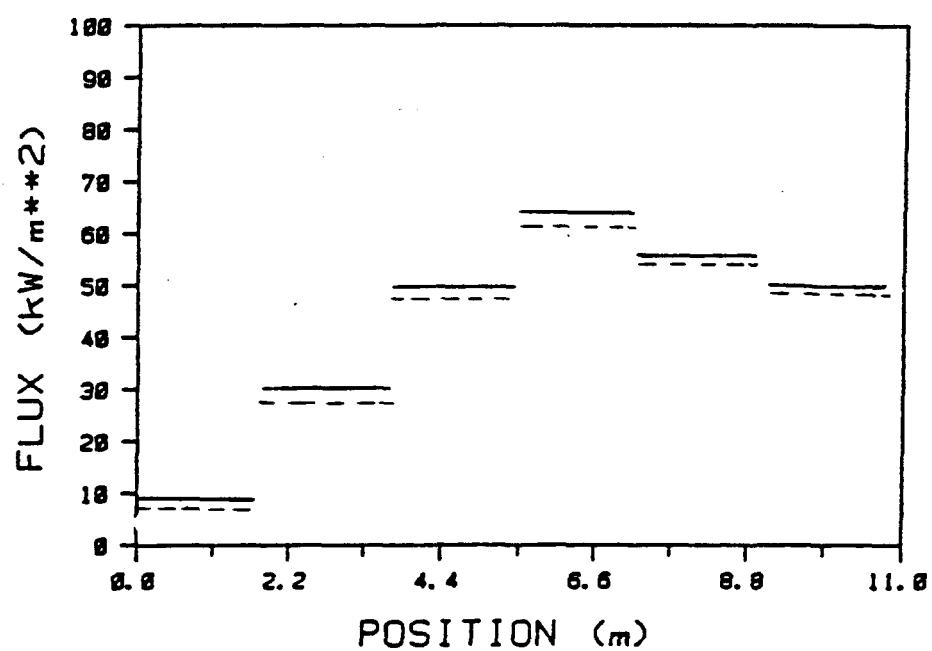


Fig 3.10.e FLUX DE CHALEUR A LA BASE

• MODÈLE 3 :

Fig.3.8 : Profils obtenus pour le four 2 dont les caractéristiques principales sont:  
 - Gaz réel (modèle 3)  
 - Circulation et convection dans la fournaise

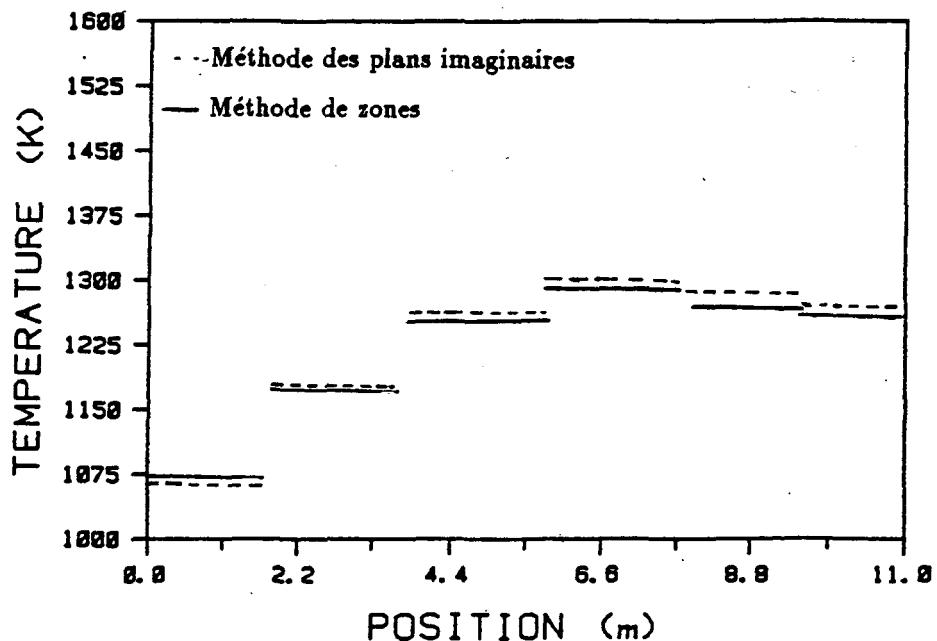


Fig 3.10. a TEMPERATURE DU TOIT

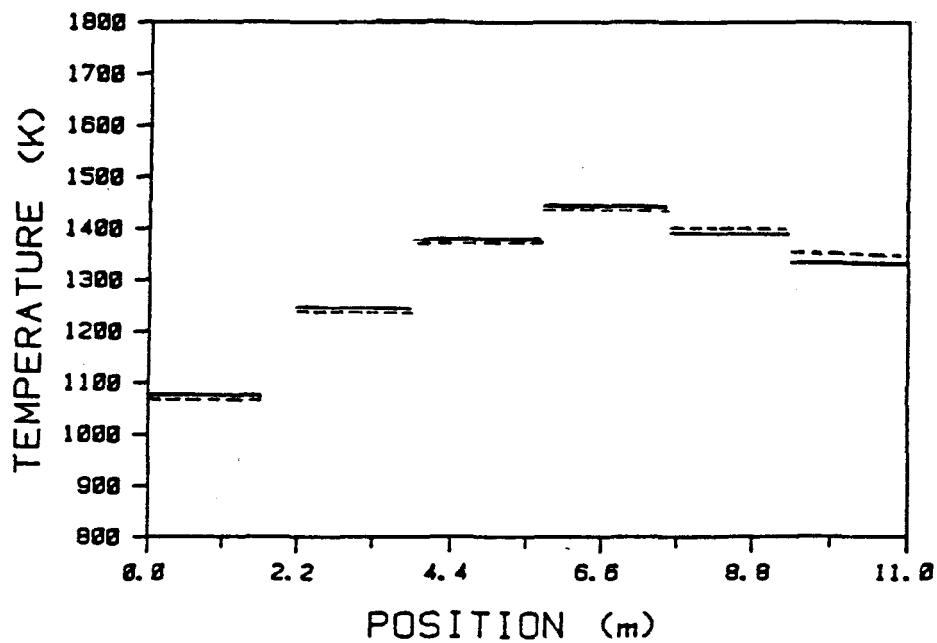


Fig 3.10. b TEMPERATURE DES GAZ

**ANNEXE 3:.....LISTAGE DES PROGRAMMES**

\$ TX IMA1.FOR

.c

## LISTE DES VARIABLES

\*\*\*\*\*

EG	:EMITANCE DU GAZ (W/m <sup>2</sup> )
Es	:EMITANCE DES SURFACES (W/m <sup>2</sup> )
TS	:TEMPERATURE DES SURFACES (K)
IG	:TEMPERATURE DES GAZ (K)
TAMB	:TEMPERATURE AMBIANTE (K)
TAG1	:TEMPERATURE D'ARRIVE DES GAZ PAR LA SURFACE 1 (K)
TAG5	:TEMPERATURE D'ARRIVE DES GAZ PAR LA SURFACE 5 (K)
TAG6	:TEMPERATURE D'ARRIVE DES GAZ PAR LA SURFACE 6 (K)
Tbase	:TEMPERATURE DE LA BASE DU FOUR (K)
QA	:FLUX DE CHALEUR DANS LA DIRECTION DES X (W)
QB	:FLUX DE CHALEUR DANS LA DIRECTION DES Y (W)
QR	:VECTEUR CONTENANT QA ET QB
Q0	:RADIOSITE (W/m <sup>2</sup> )
QNet	:FLUX DE CHALEUR NET (W/m <sup>2</sup> )
QC	:CHALEUR DE REACTION (W)
Ag0	:FACTEUR DE PONDERATION DU GAZ TRANSPARENT
K0,K1,K2,K3	:FACTEURS D'ABSORPTION DES GAZ GRIS (m-1)
E	:FACTEUR D'EMISSION DES SURFACES REELES
Frec	:FACTEUR DE RECEPTION
gs1,gs2,gs3	:FACTEURS D'ECHANGE DIRECT DES GAZ GRIS
Frec0, Frec1,Frec2,Frec3	:FACTEURS DE RECEPTIONS DES GAZ GRIS
FAC0,FAC1,FAC2,FAC3	:MATRICES TOMPON CONTENANT LES FACTEURS DE RECEPTION
GSS0,GSS1,GSS2,GSS3	:VECTEURS TOMPON CONTENANT LES FACTEURS D'ECHANGE DIRECT
Ag1,Ag2,AG3	:FACTEURS DE PONDERATIONS DES GAZ GRIS
As0,As1,AS2,AS3,AGO	:FACTEURS DE PONDERATION DES GSZ GRIS
AR	:AIR DES SURFACES DANS LE SENS DES X
AS	:AIR DES SURFACES DANS LE SENS DES Y
A	:AIR DES SURFACE (m <sup>2</sup> )
M	:NOMBRE DE DIVISION SELON Y (PAR SYMETRIE)
L	:NOMBRE DE DIVISION SELON X
X	:DIMENSION DU FOUR SELON X
Y	:DIMENSION DU FOUR SELON Y
Z	:DIMENSION DU FOUR SELON Z
U	:TAUX DE TRANSFERT DE CHALEUR AUX PAROIS (W/m <sup>2</sup> )
DM1	:DEBIT MASSIQUE DANS LA DIRECTION +Y (Kg/s)
DM3	:DEBIT MASSIQUE DANS LA DIRECTION -Y (Kg/s)
DM5	:DEBIT MASSIQUE DANS LA DIRECTION +X (Kg/s)
DM6	:DEBIT MASSIQUE DANS LA DIRECTION -X (Kg/s)
CP	:CHALEUR SPECIFIQUE (KJ/Kg*K)
HE	:COEFFICIENT DE CONVECTION (KJ/Kg*K)
HEN	:ENTHALPIE D'ENTREE DES GAZ DANS UNE ZONE
HS	:ENTHALPIE DE SORTIE DES GAZ DANS UNE ZONE
B	:VOIR L'EQUATION DU RAPPORT [13]

C D :VOIR L'EQUATION B DU RAPPORT [13]  
C B2 :VOIR L'EQUATION B2 DU RAPPORT //  
C C :VOIR L'EQUATION C DU RAPPORT //  
C Fs :MATRICE CONTENANT LES EQUATIONS DU BILAN  
C D'ENERGIE POUR LES SURFACES SREEELES 1,2,5 ET 6  
C Fg :MATRICE CONTENANT LES EQUATIONS DU BILAN  
C D'ENERGIE POUR LES CUBES DE GAZ  
C F :MATRICE CONTENANT Fs ET Fg

```
*****  
LOGICAL CONV  
CHARACTER*3 REP  
CHARACTER*3 REF  
CHARACTER*4 REPO  
DIMENSION QA(175,175),QB(175,175),QR(150),QNET(20,6,6)  
DIMENSION QO(20,6,6),Fs(20,6,6)  
DIMENSION QC(20,20),FA(100,100)  
DIMENSION Fg(20,6),TAMB(20,6,6),INDICAT(50,20)  
DIMENSION E(20,6,6),Ts(20,6,6),Tg(20,6),EG(20,6)  
DIMENSION Es(20,6,6),A(20,6,6),Frec1(20,10,6,6)  
DIMENSION Frec2(20,10,6,6),Frec3(20,10,6,6)  
DIMENSION As0(20,6,6),AS1(20,6,6),AS2(20,6,6)  
DIMENSION AS3(20,6,6),IS_C(20,6,6),GSS2(6),GSS3(6)  
DIMENSION AG0(20,10),Ag1(20,10),AG2(20,10),AG3(20,10)  
DIMENSION Freq0(20,10,6,6),FAC0(6,6),FAC1(6,6)  
DIMENSION FAC2(6,6),FAC3(6,6),GSS0(6),GSS1(6)  
DIMENSION B2(150,150),C(150),U(20,6,6)  
DIMENSION gs1(20,6,6),gs2(20,6,6),gs3(20,6,6)  
DIMENSION gs0(20,6,6),F(6,40,6,40),DM5(50,50),DM6(50,50)  
DIMENSION DELF(175,175),DM1(50,50),DM3(50,50)  
DIMENSION b(20,6,6,6),D(20,6,6),Q(20,6,6)  
DIMENSION F1(6,40,6,40),F2(6,40,6,40),HE(50,50,6)  
DIMENSION DELI(175),FACT(10,6,6),GST(10,6)  
DIMENSION TAG5(50),TAG6(50),TAG1(50)  
INTEGER R,H,G1,INDI,INDCA
```

\*\*\*\*\*  
C-----C  
C LECTURE DE L (NOMBRE DE DIVISION SELON LA C  
C LONGEUR) ET M (NOMBRE DE DIVISION SELON C  
C LA LARGEURE) ET LA DIMENSION SELON X,Y ET Z C  
C DU FOUR C  
C-----C

```
      READ(10,*)L,M
      READ(10,*)X,Y,Z
C-----C
C      LECTURE DES FACTEURS D'EMISSION DES SURFACES
C-----C
```

```
READ(10,*)EM2,EM4,EM,EM1
DO I=1,M
  DO J=1,L
    DO K=1,6
      E(I,I,5)=EM
      E(L,I,6)=EM
    END DO
    IF (I.EQ.M) E(J,I,1)=EM1
    E(J,I,2)=EM2
    E(J,I,4)=EM4
  END DO
```

```
END DO
```

```
C-----C
C      LECTURE DES COEFFICIENTS DE CONVECTION      C
C      ET LEURS ASSIGNATION                         C
C-----C
```

```
READ(10,*)CON2,CON4,CON1,CON5,CON6
DO I=1,L
  DO J=1,M
    HE(I,J,2)=CON2
    HE(I,J,4)=CON4
    HE(I,J,5)=CON5
    HE(L,J,6)=CON6
  END DO
  HE(I,M,1)=CON1
END DO
```

```
C-----C
C      LECTURE DES TEMPERATURES INITIALES          C
C      POUR TOUTE LES SURFACES ET GAZ ET LEUR      C
C      INITIALISATION                            C
C-----C
```

```
READ(10,*) TSO
READ(10,*) TGO
```

```
DO I=1,M
  DO J=1,L
    IF(I.EQ.M) THEN
      TS(J,I,1)=TS0
    END IF
    TS(I,I,5)=TS0
    TS(L,I,6)=TS0
    TS(J,I,2)=TS0
    TG(J,I)=TGO
  END DO
END DO
```

```
C-----C
C      LECTURE DU NOMBRE DES FACTEURS D'ABSORBTION  C
C      DES GAZ GRIS                                C
C-----C
```

C-----C

READ(10,\*) NEA

C-----C  
C LECTURE DE LA CHALEUR CHIMIQUE DE REACTION C  
C ET SA DISTRIBUTION DANS LES DIFFERENTES C  
C CHAMBRES DU FOUR C  
C-----C

DO I=1,M  
READ(10,\*) (QC(J,I),J=1,L)  
END DO

C-----C  
C LECTURE DE LA TEMPERATURE DE LA BASE C  
C DU FOUR ET SON ASSIGNATION C  
C-----C

READ(10,\*) TBASE

DO I=1,M  
DO J=1,L  
TS(J,I,4)=TBASE  
END DO  
END DO

C-----C  
C LECTURE DU COEFFICIENT GLOBALE C  
C DE TRANSFERT DE CHALEUR ET SON ASSIGNATION C  
C-----C

READ(10,\*) U1,U2

DO I=1,M  
DO J=1,L  
IF(I.EQ.M) THEN  
U(J,I,1)=U1  
END IF  
U(J,I,2)=U1  
U(I,I,5)=U2  
U(L,I,6)=U2  
END DO  
END DO

C-----C  
C LECTURE DE LA CHALEUR SPECIFIQUE GLOBALE C  
C-----C

READ(10,\*) CP

C-----C  
C LECTURE DU DEBIT MASSIQUE ET SON C  
C ASSIGNATION C  
C-----C

```
C-----C
C-----C
C      LECTURE DE LA TEMPERATURE AMBIANTE      C
C          ET SON ASSIGNATION                  C
C-----C
```

```
READ(10,*) TAMBI
```

```
DO I=1,M
  DO J=1,L
    IF(I.EQ.M) THEN
      TAMBI(J,I,1)=TAMBI
    END IF
    TAMBI(J,I,2)=TAMBI
    TAMBI(1,I,5)=TAMBI
    TAMBI(L,I,6)=TAMBI
  END DO
END DO
```

```
C-----C
C      LECTURE DE EPSILON                      C
C-----C
```

```
READ(10,*) EPSI
```

```
C-----C
C      DEFINITION DES AIRES DES SURFACES       C
C          ET LEUR ASSIGNATION                 C
C-----C
```

```
AS=Z*(X/L)
AR=Z*(Y/(2*M))
DO I=1,M
  DO J=1,L
    A(J,I,2)=(Y/(2*M)*(X/L))
    A(J,I,4)=(Y/(2*M)*(X/L))
    A(J,I,1)=Z*(X/L)
    A(J,I,3)=Z*(X/L)
    A(J,I,5)=Z*(Y/(2*M))
    A(J,I,6)=Z*(Y/(2*M))
  END DO
END DO
```

```
C-----C
C      CIRCULATION (DEBIT MASSIQUE)          C
C-----C
```

```
DO J=1,M
  READ(4,*)(DM5(I,J), I=1,L+1)
END DO
```

```
DO J=1,M
READ(4,*) (DM6(I,J),I=1,L+1)
END DO
```

```
DO I=1,L
READ(4,*) (DM1(I,J),J=1,M+1)
END DO
```

```
DO I=1,L
READ(4,*) (DM3(I,J),J=1,M+1)
END DO
```

```
C-----C
C      TEMPERATURE D'ENTREE DES GAZ A TRAVERS C
C      LES SURFACES REELLES C
C-----C
```

```
READ(4,*)( TAG5(I),I=1,M)
```

```
READ(4,*)( TAG6(I),I=1,M)
```

```
READ(4,*)( TAG1(I),I=1,L)
```

```
*****
```

```
READ(9,'(A4)')REPO
IF (REPO.EQ.'GRIS') GOTO 25
```

```
PRINT*, 'EST CE QUE LES FACTEURS DE RECEPTIONS ET
+D'ECHANGE SONT CALCULES'
PRINT*
READ (5,'(A3)') REP
IF (REP .EQ. 'OUI') GOTO 20
```

```
C-----C
C      LECTURE DES FACTEURS D'ABSORBTION, ET LE C
C      FACTEUR D'EVASION , ET PAR SUITE LE C
C      CALCUL DES FACTEURS D'ECHANGE ET DE C
C      RECEPTIONS C
C-----C
```

```
DO I=1,NFA
CX=Y/(2.*M)
CY=X/L
CZ=Z
```

```
READ(10,*) INDC
READ(10,*) TK
```

```
CALL FACE(TK,CX,CY,CZ,INDC,FACT,GST)
WRITE(16,*) INDC
```

```
DO K=1,6
  DO J=1,6
    WRITE(16,*) FACT(INDC,K,J)
  END DO
END DO
END DO
```

```
DO I=1,NFA
  WRITE(16,*) I
  DO J=1,6
    WRITE(16,*) GST(I,J)
  END DO
END DO
REWIND(16)
```

```
C-----C
C      LECTURE DES FACTEURS DE RECEPTION ET      C
C      LEURS ASSIGNATION                          C
C-----C
```

```
20      CONTINUE
```

```
READ(16,*) INDC
```

```
DO I=1,6
  DO J=1,6
    READ(16,*) FAC0(I,J)
  END DO
END DO
```

```
READ(16,*) INDC
```

```
DO I=1,6
  DO J=1,6
    READ(16,*) FAC1(I,J)
  END DO
END DO
```

```
READ(16,*) INDC
```

```
DO I=1,6
  DO J=1,6
    READ(16,*) FAC2(I,J)
  END DO
END DO
```

```
READ(16,*) INDC
```

```
DO I=1,6
  DO J=1,6
    READ(16,*) FAC3(I,J)
  END DO
END DO
```

```
DO I=1,M
  DO J=1,L
    DO K=1,6
      DO JK=1,6
        Frec0(J,I,K,JK)=FAC0(K,JK)
        Frec1(J,I,K,JK)=FAC1(K,JK)
        Frec2(J,I,K,JK)=FAC2(K,JK)
        Frec3(J,I,K,JK)=FAC3(K,JK)
      END DO
    END DO
  END DO
END DO
```

C-----C  
C LECTURE DES FACTEURS D'ECHANGE DIRECT C
C ET LEURS ASSIGNATION C
C-----C

```
READ(16,*) INDC

DO I=1,6
  READ(16,*) GSS0(I)
END DO

READ(16,*) INDC

DO I=1,6
  READ(16,*) GSS1(I)
END DO

READ(16,*) INDC

DO I=1,6
  READ(16,*) GSS2(I)
END DO

READ(16,*) INDC

DO I=1,6
  READ(16,*) GSS3(I)
END DO

DO I=1,M
  DO J=1,L
    DO K=1,6
      gs0(J,I,K)=GSS0(K)
      gs1(J,I,K)=GSS1(K)
      gs2(J,I,K)=GSS2(K)
      gs3(J,I,K)=GSS3(K)
    END DO
  END DO
END DO
```

```

        IF(REQ.EQ.'REEL') GOTO 35
25    CONTINUE
C-----C
C    LECTURE DE L'INDICATEUR DES FACTEURS D'ABSORPTIONS    C
C                DANS CHAQUE CHAMBRE                            C
C-----C

DO J=1,M
  READ(9,*)(INDICAT(I,J),I=1,L)
END DO

C-----C
C    LECTURE DE NOMBRES DE FACTEURS D'APSORBTION        C
C                DIFFERENTS                                C
C-----C

READ(9,*) INDI

C-----C
PRINT*, 'EST QUE LES FACTEURS DE RECEPTIONS ET
+ AIRES D'ECHANGE SONT CALCULES'

READ(5,'(A3)') REF

IF (REF.EQ.'OUI') GOTO 30

C-----C
C    CALCUL DES FACTEURS DE RECEPTIONS ET AIRES          C
C    D'ECHANGES POUR LES FACTEURS D'APSORBTION          C
C-----C

DO I=1,INDI
  CX=Y/(2*M)
  CY=X/L
  CZ=Z
  READ (9,*) INDCA
  READ (9,*) TKA
  CALL FFACE(TKA,CX,CY,CZ,INDCA,FACT,GST)
  WRITE(18,*) INDCA
  DO J=1,6
    DO K=1,6
      WRITE(18,*) FACT(INDCA,J,K)
    END DO
  END DO
END DO

DO I=1,INDI
  WRITE(18,*) I
  DO J=1,6
    WRITE(18,*) GST(I,J)
  END DO

```

```
END DO
REWIND(18)
30    CONTINUE
```

```
C-----C
C  LECTURE DES FACTEURS DE RECEPTIONS ET LES AIRES  C
C  D'ECHANGES POUR DIFFERENTES CAS                  C
C-----C
```

```
DO I=1,INDI
  READ(18,*) INDCA
  DO J=1,6
    DO K=1,6
      READ(18,*) FACT(INDCA,J,K)
    END DO
  END DO
END DO
DO I=1,INDI
  READ(18,*) INDCA
  DO J=1,6
    READ(18,*) GST(INDCA,J)
  END DO
END DO
```

```
C-----C
C  IDENTIFICATION DES FACTEURS DE RECEPTIONS ET AIRES  C
C  D'ECHANGE POUR CHAQUE CHAMBRE                      C
C-----C
```

```
DO I=1,L
  DO J=1,M
    DO K=1,6
      GST(I,J,K)=GST(INDICAT(I,J),K)
    DO JK=1,6
      FREC1(I,J,K,JK)=FACT(INDICAT(I,J),K,JK)
    END DO
  END DO
END DO
END DO
```

```
C-----C
IF (REPO.EQ.'GRIS') GOTO 77
C-----C
```

```
35    CONTINUE
202   CONTINUE
```

```
C*****FACTEURS DE PONDERATINOS CORRESPONDANT A*****C
C      FACTEURS DE PONDERATINOS CORRESPONDANT A      C
C      L'ABSORPTION DU GAZ REEL                      C
C*****FACTEURS DE PONDERATINOS CORRESPONDANT A*****C
```

```
DO I=1,M
  DO J=1,L
```

```
DO K=1,6
```

```
C IF(J.NE.1)TS(J,I,5)=TG(J,I)
C IF(J.NE.L)TS(J,I,6)=TG(J,I)
C IF(I.NE.M)TS(J,I,1)=TG(J,I)
C IF(I.NE.1)TS(J,I,3)=TG(J,I)
```

```
C IF(J.NE.1)TS(J,I,5)=TG(J-1,I)
C IF(J.NE.L)TS(J,I,6)=TG(J+1,I)
C IF(I.NE.M)TS(J,I,1)=TG(J,I+1)
C IF(I.NE.1)TS(J,I,3)=TG(J,I-1)
```

```
IF(J.NE.1)TS(J,I,5)=(TG(J-1,I)*TG(J,I))**0.5
IF(J.NE.L)TS(J,I,6)=(TG(J+1,I)*TG(J,I))**0.5
IF(I.NE.M)TS(J,I,1)=(TG(J,I+1)*TG(J,I))**0.5
IF(I.NE.1)TS(J,I,3)=(TG(J,I-1)*TG(J,I))**0.5
```

```
TS_C(1,I,5)=TS(1,I,5)
TS_C(1,I,6)=TS(1,I,6)
```

```
IF(E(1,I,5).EQ.0.) TS(1,I,5)=(Q0(1,I,5)/(5.67E-08))**0.25
IF(E(L,I,6).EQ.0.) TS(L,I,6)=(Q0(L,I,6)/(5.67E-08))**0.25
```

```
AS1(J,I,K)=0.59324E00-0.61741E-03*TS(J,I,K)+0.29248E-06
+*(TS(J,I,K)**2)-0.45823E-10*(TS(J,I,K)**3)+(0.35739E-03+
+0.22122E-06*TS(J,I,K)-0.2638E-09*(TS(J,I,K)**2)+0.45951E
+-13*(TS(J,I,K)**3))*TG(J,I)+(-0.71313E-06+0.46181E-09*
+TS(J,I,K)-0.70858E-13*(TS(J,I,K)**2)+0.38038E-17*(TS(J,I,K)
+**3))*((TG(J,I)**2)+(0.17806E-09-0.11654E-12*TS(J,I,K)-
+0.19939E-16*(TS(J,I,K)**2)-0.13486E-20*(TS(J,I,K)**3))*(
+TG(J,I)**3)
```

```
AS2(J,I,K)=-0.35664E-01+0.21502E-03*TS(J,I,K)-0.13648E-06*
+(TS(J,I,K)**2)+0.24284E-10*(TS(J,I,K)**3)+(0.51605E
+-03-0.70037E-06*TS(J,I,K)+0.3868E-09*(TS(J,I,K)**2)
+-0.70429E-13*(TS(J,I,K)**3))*TG(J,I)+(0.12245E-06+0.99434
+E-10*TS(J,I,K)-0.15598E-12*(TS(J,I,K)**2)+0.37664E-16
+*(TS(J,I,K)**3))*((TG(J,I)**2)+(-0.57563E-10-0.10109E-13
+*TS(J,I,K)+0.3527E-16*(TS(J,I,K)**2)-0.89872E-20
+*(TS(J,I,K)**3))*((TG(J,I)**3))
```

```
AS3(J,I,K)=0.12951E-00+0.54520E-04*TS(J,I,K)-0.80049E-07
+*(TS(J,I,K)**2)+0.17813E-10*(TS(J,I,K)**3)+(0.152110E-03-
+0.37750E-06*TS(J,I,K)+0.21019E-09*(TS(J,I,K)**2)-0.36011E
+-13*(TS(J,I,K)**3))*TG(J,I)+(-0.13165E-06+0.20719E-09*TS
+(J,I,K)-0.96720E-13*(TS(J,I,K)**2)+0.14807E-16*(TS(J,I,K)
+**3))*((TG(J,I)**2)+(0.26672E-10-0.34803E-13*TS(J,I,K)
```

```

++0.14336E-16*(IS(J,I,K)**2)-0.1975E-20*(  

+IS(J,I,K)**3))*(TG(J,I)**3)

AS0(J,I,K)=1-AS1(J,I,K)-AS2(J,I,K)-AS3(J,I,K)

IS_C(1,I,5)=IS(1,I,5)  

IS_C(1,I,5)=IS(1,I,5)

END DO  

END DO  

END DO  

C*****  

C      FACTEURS DE PONDERATINOS CORRESPONDANT A      C  

C      L'EMISSION DU GAZ REEL      C  

C*****  

DO I=1,M  

DO J=1,L

AG1(J,I)=(6.508E-01)-(5.551E-04)*TG(J,I)+(3.029E-07)*  

+(TG(J,I)**2)-(5.353E-11)*(TG(J,I)**3)

AG2(J,I)=(-0.2504E-01)+(6.112E-04)*TG(J,I)-(3.882E-07)*  

+(TG(J,I)**2)+(6.528E-11)*(TG(J,I)**3)

AG3(J,I)=(2.718E-01)-(3.118E-04)*TG(J,I)+(1.221E-07)*  

+(TG(J,I)**2)-(1.6E-11)*(TG(J,I)**3)
AGO(J,I)=1-AG1(J,I)-AG2(J,I)-AG3(J,I)

END DO  

END DO

C-----  

IF (REPO.EQ.'REEL') GOTO 103
C-----  

77  CONTINUE

DO I=1,M  

DO J=1,L  

DO K=1,6  

AS0(J,I,K)=0.  

AS1(J,I,K)=1.  

AS2(J,I,K)=0.  

AS3(J,I,K)=0.  

END DO  

AGO(J,I)=0.  

AG1(J,I)=1.  

AG2(J,I)=0.  

AG3(J,I)=0.  

END DO  

END DO

```

103 CONTINUE

C-----C  
C  
C EVALUATION DE LA MATRICE '[b]' DE L'EQUATION (1) C  
C  
C-----C

DO I=1,M  
DO J=1,L  
DO K=1,6  
TERM=1.-E(J,I,K)

DO JK=1,6  
DELIAT=0.  
IF (K.EQ.JK) DELIAT=1.

B(J,I,K,JK)=DELIAT-TERM\*(FRECO(J,I,K,JK)\*AS0(J,I,K)+  
+ FREC1(J,I,K,JK)\*AS1(J,I,K)+FREC2(J,I,K,JK)\*AS2(J,I,K)+  
+ FREC3(J,I,K,JK)\*AS3(J,I,K))

END DO  
END DO  
END DO  
END DO

C-----C  
C  
C INVERSION DE LA MATRICE '[b]-1'=[B] C  
C PAR LA METHODE D'ELIMINATION GAUSS-JORDAN C  
C  
C-----C

DO JK=1,M  
DO I=1,L  
DO 600 KK=1,6  
DO 400 J=1,6  
IF(J.EQ.KK) GOTO 400  
B(I,JK,KK,J)=B(I,JK,KK,J)/B(I,JK,KK,KK)  
400 CONTINUE  
B(I,JK,KK,KK)=1./B(I,JK,KK,KK)  
DO 500 K=1,6  
IF(K.EQ.KK) GOTO 500  
DO 500 J=1,6  
IF(J.EQ.KK) GOTO 500  
B(I,JK,K,J)=B(I,JK,K,J)-B(I,JK,KK,J)\*B(I,JK,K,KK)  
500 CONTINUE  
DO 600 K=1,6  
IF(K.EQ.KK) GOTO 600  
B(I,JK,K,KK)=-B(I,JK,K,KK)\*B(I,JK,KK,KK)  
600 CONTINUE  
END DO

```
END DO
C***** INITIALISATION DE LA MATRICE B
C*****
```

```
DO I=1,2*L*M-M-L
DO J=1,2*L*M-M-L
B2(I,J)=0.
END DO
END DO
```

```
C-----
C
C      CALCUL DE LA MATRICE [B2] APPARAISSON
C      DANS L'EQUATION (4) :
C      [B2](J,I,K,JK)]*(Q(J,I,K))={C}
C
C-----
```

. DANS LA DIRECTION DES X .

```
C-----
```

```
DO K=1,M
DO 51 JK=1,L-1
I=JK+(K-1)*(L-1)
IF(JK.EQ.1) GOTO 52
B2 (I,I-1)=B(JK,K,6,5)/AR
52  CONTINUE
B2 (I,I)=(1.-B(JK,K,6,6)-B(JK+1,K,5,5))/AR
IF(JK.EQ.L-1) GOTO 53
B2 (I,I+1)=B(JK+1,K,5,6)/AR
53  CONTINUE
J=M*(L-1)+JK+(K-2)*L
IF(K.EQ.1) GOTO 54
B2 (I,J)=B(JK,K,6,3)/AS
B2 (I,J+1)=-B(JK+1,K,5,3)/AS
54  J=M*(L-1)+JK+(K-1)*L
IF(K.EQ.M) GOTO 51
B2 (I,J)=-B(JK,K,6,1)/AS
B2 (I,J+1)=B(JK,K,5,1)/AS
51  CONTINUE
END DO
```

```
C-----
C      EVALUATION DE LA MATRICE B2
C      DANS LA DIRECTION DES Y
C-----
```

```
DO K=1,M-1
DO JK=1,L
I=M*(L-1)+JK+(K-1)*L
J=JK+(K-1)*(L-1)
IF(JK.EQ.L) GOTO 62
```

```

B2 (I,J)=-B(JK,K,1,6)/AR
IF(JK.EQ.1) GOTO 63
62      B2 (I,J-1)=B(JK,K,1,5)/AR
63      J=JK+K*(L-1)
IF(JK.EQ.L) GOTO 64
B2 (I,J)=B(JK,K+1,3,6)/AR
IF(JK.EQ.1) GOTO 65
64      B2 (I,J-1)=-B(JK,K+1,3,5)/AR
65      CONTINUE
IF(K.EQ.1) GOTO 66
B2 (I,I-JK)=B(JK,K,1,3)/AS
66      CONTINUE
IF(K.EQ.M-1) GOTO 67
B2 (I,I+JK)=B(JK,K+1,3,1)
67      B2 (I,I)=(1.-B(JK,K,1,1)-B(JK,K+1,3,3))/AS
END DO
END DO

```

C-----C  
C INVERSION DE LA MATRICE B2 AVEC LA METHODE DE C  
C GAUSS-JORDAN C  
C-----C

```

NN=2*ML-M-L
DO 666 K=1,NN
DO 444 J=1,NN
IF(J.EQ.K) GOTO 444
B2(K,J)=B2(K,J)/B2(K,K)
444    CONTINUE
B2(K,K)=1./B2(K,K)
DO 555 I=1,NN
IF(I.EQ.K) GOTO 555
DO 555 J=1,NN
IF(J.EQ.K) GOTO 555
B2(I,J)=B2(I,J)-B2(K,J)*B2(I,K)
555    CONTINUE
DO 666 I=1,NN
IF(I.EQ.K) GOTO 666
B2(I,K)=-B2(I,K)*B2(K,K)
666    CONTINUE

```

C-----C  
550 CONTINUE
C-----C  
C\*\*\*\*\*CALCUL DU TERM (-E)\*\*\*\*\*
C CALCUL DU TERM (-E) \*
C\*\*\*\*\*CALCUL DU TERM (-E)\*\*\*\*\*

```

CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,Frec0
+ ,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR,
+ QA,QB,QQ, REPO,AG0,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

```

```
I1=1
J1=1
CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP,
+ Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F)
```

```
C-----C
C      MATRICE [EAJ] AUGMENTEE
C-----C
```

```
IT1=2*M*L+L+2*M
IT2=2*L*M+L+2*M+1
```

```
IND=1
DO I=1,M+1
  IF3=2*L+2
  IF (I.EQ.M+1) IF3=L
  DO J=1,IF3
    FA(IND,IT2)=F(1,1,I,J)
    IND=IND+1
  END DO
END DO
C*****
```

```
C
C      POUR LA SURFACE REELE 2 ET LE GAZ
C*****
```

```
DO I1=1,M
  DO J1=1,L
    TS(J1,I1,2)=TS(J1,I1,2)-5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,
+ QR,QA,QB,QQ, REPO,AG0,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F)
    TS(J1,I1,2)=TS(J1,I1,2)+5.
  END DO
```

```
  DO J1=L+1,2*L
    TG(J1-L,I1)=TG(J1-L,I1)-5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR,
+ QA,QB,QQ, REPO,AG0,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)
    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F)
    TG(J1-L,I1)=TG(J1-L,I1)+5.
  END DO
```

```
  DO J1=1,L
    TS(J1,I1,2)=TS(J1,I1,2)+5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET
+ ,QR,QA,QB,QQ, REPO,AG0,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)
```

```

    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F2)
    TS(J1,I1,2)=TS(J1,I1,2)-5.
    END DO

    DO J1=L+1,2*L
    TG(J1-L,I1)=TG(J1-L,I1)+5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR
+ ,QA,QB,QO, REPO,AGO,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F2)
    TG(J1-L,I1)=TG(J1-L,I1)-5.
    END DO

    END DO

```

```

*****
C          POUR LA SURFACE REELE 1      *
*****

```

```

    DO J1=1,L
    TS(J1,M,1)=TS(J1,M,1)-5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR,
+ ,QA,QB,QO, REPO,AGO,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

    I1=M+1
    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F1)
    TS(J1,M,1)=TS(J1,M,1)+10

    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR
+ ,QA,QB,QO, REPO,AGO,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

    I1=M+1
    CALL BILAN(M,L,TS,TG,TAMB,A,QA,QB,QNET,U,CP
+ ,Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F2)
    TS(J1,M,1)=TS(J1,M,1)-5.

    END DO

```

```

*****
C          POUR LA SURFACE REELE 5      *
*****

```

```

    DO I1=1,M
    TS(1,I1,5)=TS(1,I1,5)-5.
    CALL FLUX(L,M,E,TG,TS,A,AR,AS,GS0,GS1,gs2,gs3,
+ Frec0,Frec1,Frec2,Frec3,B,B2,C,QNET,QR,QA
+ ,QB,QO, REPO,AGO,AG1,AG2,AG3,AS0,AS1,AS2,AS3)

```

J1=2\*L+1



```

      INH=2*L+2
      IF(K.EQ.M+1) INH=L
      DO J1=1,INH
        DELF(H,G1)=(F1(I,J,K,J1)-F2(I,J,K,J1))/10.
        H=H+1
      END DO
      END DO
      G1=G1+1
    END DO
    END DO
  END DO

```

CC  
 C TRANSFERT DE DELF DANS FA C  
 CCC

```

  DO I=1,IT1
    DO J1=1,IT1
      FA(I,J1)=DELF(I,J1)
    END DO
  END DO

```

C-----C
 C
 C RESOLUTION DU SYSTEME [DELF]{DELT}={-F} C
 C ON TROUVE AINSI LES INCREMENTS DES TEMPERATURES C
 C ON RESOUT LE SYSTEME A L'AIDE DE LA MATRICE C
 C AUGMENTEE [FA] C
 C
 C-----C

```

  DO 303 J1=2,IT2
303  FA(1,J1)=FA(1,J1)/FA(1,1)
  DO 308 I=2,IT1
    J1=I
    DO 305 II=J1,IT1
      SUM=0.
      JM1=J1-1
      DO 304 K=1,JM1
        SUM=SUM+FA(II,K)*FA(K,J1)
        FA(II,J1)=FA(II,J1)-SUM
      305  CONTINUE
      IP1=I+1
      DO 307 JJ=IP1,IT2
        SUM=0.
        IM1=I-1
        DO 306 K=1,IM1
          SUM=SUM+FA(I,K)*FA(K,JJ)
        FA(I,JJ)=(FA(I,JJ)-SUM)/FA(I,I)
      308  CONTINUE
      DELT(IT1)=FA(IT1,IT2)
      LL=IT1-1
      DO 310 NN=1,LL
        SUM=0.
        I=IT1-NN

```

```

        IP1=I+1
        DO 309 J1=IP1,IT1
309      SUM=SUM+FA(I,J1)*DELT(J1)
310      DELT(I)=FA(I,IT2)-SUM

C-----C
C
C   TEST DE CONVERGENCE SUR LES DELT
C   SI TOUS LES DELT<EPSI LE PROCESS ITERATIF PREND FIN
C   SINON LE PROCESSUS CONTINUE
C-----C

CONV=.TRUE.
I=1
DO WHILE (CONV.AND.(I.LE.IT1))
  IF(ABS(DELT(I)).GE.EPSI) THEN
    CONV=.FALSE.
  ELSE
    I=I+1
  END IF
END DO

IF(CONV) GOTO 9999

C-----C
C
C   SI TOUS LES DELT NE SONT PAS SUFFISAMMENT PETIT
C   ON CONTINUE LE PROCESSUS ITERATIF.ON INCREMENTE
C   LES TEMPERATURES DES PAROIS ET DES GAZ.
C-----C

IND=1
DO 229 K=1,M+1
IF4=2*L+2
IF(K.EQ.M+1) IF4=L
DO 330 I=1,IF4
IF(K.EQ.M+1) GOTO 895
IF((I.GT.L).AND.(I.LE.2*L)) GOTO 331
IF(I.EQ.2*L+1) GOTO 606
IF(I.EQ.2*L+2) GOTO 607
TS(I,K,2)=TS(I,K,2)+(DELT(IND))
IND=IND+1
GOTO 330
331  CONTINUE
TG(I-L,K)=TG(I-L,K)+(DELT(IND))
IND=IND+1
GOTO 330
606  CONTINUE
TS(1,K,5)=TS(1,K,5)+(DELT(IND))
IND=IND+1
GOTO 330
607  CONTINUE
TS(L,K,6)=TS(L,K,6)+(DELT(IND))
IND=IND+1

```

```

    GOTO 330
895  TS(I,M,1)=TS(I,M,1)+(DELT(IND))
    IND=IND+1
330  CONTINUE
229  CONTINUE
C-----C
    IF(REPO.EQ.'GRIS') GOTO 550
    IF(REPO.EQ.'REEL') GOTO 202
C-----C
C-----C
C     ECRITURE DES RESULTATS FINAUX.
C-----C
C-----C
9999  CONTINUE
C-----C
    DO  K=1,M
    DO  I=1,L
        WRITE(15,737) I,K, TS(I,K,2),I,K,TG(I,K)
737  FORMAT(5X,'TS(',I4,',',I4,',2)='',F14.7,5X,
1  'TG('',I4,'',I4,'')='',F14.7)
        IF((K.EQ.M).AND.(E(I,M,1).NE.0.)) WRITE(15,885) I,K,TS(I,K,1)
        IF((K.EQ.M).AND.(E(I,M,1).EQ.0.)) THEN
            TS(I,M,1)=(Q0(I,M,1)/(5.67E-08))**0.25
            WRITE(15,885) I,K,TS(I,K,1)
        END IF

        IF((I.EQ.L).AND.(E(L,K,6).NE.0.)) WRITE(15,885)L,K,TS(L,K,6)
        IF((I.EQ.L).AND.(E(L,K,6).EQ.0.)) THEN
            TS(L,K,6)=(Q0(L,K,6)/(5.67E-08))**0.25
            WRITE(15,885)L,K,TS(L,K,6)
        END IF

        IF((I.EQ.1).AND.(E(1,M,5).NE.0.)) WRITE(15,885)I,K,TS(1,K,5)
        IF((I.EQ.1).AND.(E(1,K,5).EQ.0.)) THEN
            TS(1,K,5)=(Q0(1,K,5)/(5.67E-08))**0.25
            WRITE(15,885)I,K,TS(1,K,5)
        END IF

885  FORMAT(5X,'TS(',I4,',',I4,',1)='',F14.7)

    END DO
    END DO

    DO  K=1,M
    DO  I=1,L
        J1=2
        J2=2
        IF(K.EQ.M) J1=1
        IF(K.EQ.M) J2=1
        DO 874 J=J1,4,J2
        IF(J.EQ.3) GOTO 874
        WRITE(20,871) I,J,QNET(I,K,J)

```

```

871 FORMAT(5X,'QNET( ',I2,', ',I2,' )=',F18.5)
874 CONTINUE
      END DO
      END DO

      PRINT*, '*****'
      PRINT*, '*          GAZ ', REPO, '*'
      PRINT*, '*****'

      WRITE (6,99)
      WRITE (6,100)
      WRITE (6,99)
100  FORMAT(5X,'TEMPERATURE DE LA SURFACE 1 (K)')
99   FORMAT(5X,31('*'))
      WRITE (6,105) (I,I=1,L)
      WRITE (6,93)
      WRITE (6,106) M,(TS(I,M,1),I=1,L)
      WRITE (6,93)
      WRITE(6,98)
      WRITE (6,101)
      WRITE(6,98)
101  FORMAT(5X,'TEMPERATURE DE LA SURFACE 2 (K)')
98 . FORMAT(5X,31('*'))
      WRITE (6,105) (I,I=1,L)
      WRITE (6,93)
      DO J=1,M
      WRITE (6,112) J,(TS(I,J,2),I=1,L)
      END DO
      WRITE (6,93)

      WRITE(6,95)
      WRITE (6,104)
      WRITE(6,95)
104  FORMAT(5X,'TEMPERATURE DES GAZ (K)')
95   FORMAT(5X,23('*'))
      WRITE (6,105) (I,I=1,L)
      WRITE(6,93)
      DO J=1,M
      WRITE (6,112) J,(TG(I,J),I=1,L)
106  FORMAT (/,4X'RANGEE*',I2,<L>F9.<1>)
112  FORMAT (/,4X'RANGEE*',I2,<L>F9.<1>)
      END DO
      WRITE (6,93)
      WRITE(6,980)
      WRITE (6,110)
      WRITE(6,980)
110  FORMAT(5X,'FLUX DE CHALEUR FOURNIE A LA BASE (KW/M**2)')
980 FORMAT(5X,43('*'))
      WRITE (6,105) (I,I=1,L)
      WRITE (6,93)

```

```

DO J=1,M
  WRITE (6,112) J,((QNET(I,J,4)+HE(I,J,4)*(TS(I,J,4)-TG(I,J)))
  + /1000,I=1,L)
END DO

WRITE (6,93)
93  FORMAT(/,1X '-----',<L>('-----'))
105 FORMAT (/,5X'CUBE #',<L>(8X,I1))

SUM=0.
SUMA=0.
SUMB=0.
SUMC=0.
DO I=1,L
DO J=1,M
  SUM=SUM+A(I,J,4)*QNET(I,J,4)+HE(I,J,4)*(TS(I,J,4)-TG(I,J))
  SUMA=SUMA+TG(I,J)
  SUMB=SUMB+TS(I,J,2)
END DO
  SUMC=SUMC+TS(I,M,1)
END DO
S =SUM/1000
WRITE(6,93)
PRINT*, 'ENERGIE TOTALE FOURNIE A LA BASE (w)      =',SUM
WRITE(6,93)
PRINT*, 'ENERGIE MOYENNE FOURNIE A LA BASE (Kw/m**2) =',S/(L*M*A(1,1,4))

WRITE(6,93)
PRINT*, 'TEMPERATURE MOYENNE DU GAZ (K)      =',SUMA/(M*L)

WRITE(6,93)
PRINT*, 'TEMPERATURE MOYENNE DU TOIT (K)      =',SUMB/(M*L)

WRITE(6,93)
PRINT*, 'TEMPERATURE MOYENNE DE LA SURFACE 1 (K) =',SUMC/L
WRITE(6,93)
STOP
END

```

DO K=1,6  
DO J=1,L  
DO I=1,M

-----  
C  
C FOUR LES SURFACES REELLES  
C EVALUATION DU VECTEUR "D" DE L'EQUATION (1)  
C  
C-----  
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

END DO  
END DO  
END DO  
ES(J,I,K)=5.67E-08\*IS(J,I,K)\*AA4  
DO K=1,6  
EG(J,I)=5.67E-08\*IG(J,I)\*AA4  
DO J=1,L  
DO I=1,M  
C  
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
C CALCUL DES EMULANCES DES SURFACES  
C  
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

DIMENSION B(20,6,6,6,D(20,6,6)  
DIMENSION 951(20,6,6),952(20,6,6),953(20,6,6)  
DIMENSION B2(150,150),C(150)  
DIMENSION AG3(20,10),GS0(20,10),AG1(20,10),AG2(20,10)  
DIMENSION AS0(20,6,6),AS1(20,6,6),AS2(20,6,6)  
DIMENSION ES(20,6,6),A(20,6,6),U(20,6,6)  
DIMENSION E(20,6,6),IS(20,6,6),IG(20,6,6)  
DIMENSION ER(20,10,6,6),ER(20,10,6,6)  
DIMENSION ER(20,10,6,6),ER(20,10,6,6)  
DIMENSION FS(20,6,6),F9(20,6,6),TAMB(20,6,6)  
DIMENSION QNET(20,6,6),Q0(20,6,6)  
DIMENSION QA(175,175),QB(175,175),QR(150)  
CHARACTER4 REPO  
CHARACTER3 RED  
+ QR,QA,QB,QQ,REPO,AG0,AG1,AG2,AG3,AS1,AS2,AS3  
+ ER(20,6,6),ER(20,6,6),ER(20,6,6),B2,C,QNET,  
SUBROUTINE FLUX(I,E,TG,IS,A,AR,AS,GS0,GS1,GS2,GS3,

CC  
C  
C CHALEURS POUR LES SURFACES ET LE GAZ  
C SOUS PROGRAMME FLUX POUR CALCULER LES FLUX DE  
C  
CC

\$ TY RAYA.FOR

```

      D(J,I,K)= E(J,I,K)*ES(J,I,K)+(1.-E(J,I,K))*EG(J,I)
      + *(gs1(J,I,K)*AG1(J,I)+gs2(J,I,K)*AG2(J,I)
      + +gs3(J,I,K)*AG3(J,I))/A(J,I,K)
      END DO
      END DO
      END DO

```

```

C-----C
C
C      ECRITURE DU VECTEUR{C} DE L'EQUATION:      C
C      [B2]*{VQ}={C}                                C
C-----C
C
C      DANS LA DIRECTION DES X                  C
C
C-----C

```

```

R=AR/AS
N=1
DO I=1,M
  DO J=1,L-1
    S=0.0
    DO K=2,4,2
      S=S+B(J,I,6,K)*D(J,I,K)-B(J+1,I,5,K)*D(J+1,I,K)
    END DO

```

```

C*****C
C      I=1 ET J=1                                *
C*****C
      IF (I.EQ.1 .AND. J.EQ.1) THEN
        C(N)=S+B(1,1,6,5)*D(1,1,5)+EG(1,I)/AR*(B(1,I,6,1)*(
      + GS1(1,I,1)*AG1(1,I)+GS2(1,I,1)*AG2(1,I)+GS3(1,I,1)*
      + AG3(1,I))*R+B(1,1,6,3)*(GS1(1,I,3)*AG1(1,I)+GS2(1,I,3)
      + *AG2(1,I)+GS3(1,I,3)*AG3(1,I))*R+B(1,1,6,6)*(GS1(1,I,
      + 6)*AG1(1,I)+GS2(1,I,6)*AG2(1,I)+GS3(1,I,6)*AG3(1,I)))
      + -EG(1,I)/AR*(B(1,I,5,1)*(GS1(1,I,1)*AG1(1,I)
      + +GS2(1,I,1)*AG2(1,I)+GS3(1,I,1)*AG3(1,I))*R+
      + B(1,I,5,3)*(GS1(1,I,3)*AG1(1,I)+GS2(1,I,3)*
      + AG2(1,I)+GS3(1,I,3)*AG3(1,I))*R+B(1,I,5,5)*(
      + GS1(1,I,5)*AG1(1,I)+GS2(1,I,5)*AG2(1,I)+GS3
      + (1,I,5)*AG3(1,I))+B(1,I,5,6)*(GS1(1,I,6)*AG1
      + (1,I)+GS2(1,I,6)*AG2(1,I)+GS3(1,I,6)*AG3
      + (1,I)))
      END IF

```

```

C*****C
C      SI J=1 ET I#M ET I#1                                *
C*****C
      IF (I.NE.1 .AND. I.NE.M .AND. J.EQ.1) THEN

```

```

        C(N)=S+B(J,I,6,5)*D(J,I,5)+EG(J,I)/AR*(B(J,I,6,1)
        + *(gs1(J,I,1)*AG1(J,I)+gs2(J,I,1)*AG2(J,I)+gs3(J,I,1)*
        + AG3(J,I))*R+B(J,I,6,3)*(gs1(J,I,3)*AG1(J,I)+gs2(J,I,3)

```

```

+ *Ag2(J,I)+gs3(J,I,3)*Ag3(J,I))*R+B(J,I,6,6)*(gs1(J,I,6)
+ *AG1(J,I)+gs2(J,I,6)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,6)*Ag3(J,I)))-EG
+ (J+1,I)/AR*(B(J+1,I,5,1)*(GS1(J+1,I,1)*AG1(J+1,I)+gs2(
+ J+1,I,1)*Ag2(J+1,I)+GS3(J+1,I,1)*AG3(J+1,I))*R+B(J+1,I,5,3)
+ *(GS1(J+1,I,3)*AG1(J+1,I)+GS2(J+1,I,3)*AG2(J+1,I)
+ +GS3(J+1,I,3)*AG3(J+1,I))*R+B(J+1,I,5,5)*(GS1(J+1,I,5)*
+ AG1(J+1,I)+GS2(J+1,I,5)*AG2(J+1,I)+GS3(J+1,I,5)*AG3(J+1,I))
+ +B(J+1,I,5,6)*(GS1(J+1,I,6)*AG1(J+1,I)+gs2(J+1,I,6)
+ *Ag2(J+1,I)+GS3(J+1,I,6)*AG3(J+1,I)))
END IF

```

```

C*****SI J#1 , J#L-1 ET I#M ****
C*****SI J#1 , J#L-1 ET I#M ****

```

```
IF (J.NE.1 .AND. J.NE.L-1 .AND. I.NE.M) THEN
```

```

C(N)=S+EG(J,I)/AR*(B(J,I,6,1)*(gs1(J,I,1)*AG1(J,I)+gs
+ 2(J,I,1)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,1)*Ag3(J,I))*R+B(J,I,6,3)*(
+ gs1(J,I,3)*AG1(J,I)+gs2(J,I,3)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,3)*Ag
+ 3(J,I))*R+B(J,I,6,5)*(gs1(J,I,5)*AG1(J,I)+gs2(J,I,5)
+ *Ag2(J,I)+gs3(J,I,5)*Ag3(J,I))+B(J,I,6,6)*(gs1(J,I,6)
+ *AG1(J,I)+gs2(J,I,6)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,6)*Ag3(J,I)))-
+ EG(J+1,I)/AR*(B(J+1,I,5,1)*(GS1(J+1,I,1)*AG1(J+1,I)+
+ GS2(J+1,I,1)*AG2(J+1,I)+GS3(J+1,I,1)*AG3(J+1,I))*R
+ +B(J+1,I,5,3)*(GS1(J+1,I,3)*AG1(J+1,I)+gs2(J+1,I
+ ,3)*Ag2(J+1,I)+GS3(J+1,I,3)*AG3(J+1,I))*R+B(J+1,I,5,5)
+ *(gs1(J+1,I,5)*AG1(J+1,I)+GS2(J+1,I,5)*AG2(J+1,I)+gs3
+ (J+1,I,5)*Ag3(J+1,I))+B(J+1,I,5,6)*(gs1(J+1,I,6)*AG1
+ (J+1,I)+GS2(J+1,I,6)*AG2(J+1,I)+GS3(J+1,I,6)*AG3(J+1,I)))
END IF

```

```

C*****SI J= L-1 ET I#M ****
C*****SI J= L-1 ET I#M ****

```

```
IF (J.EQ.L-1 .AND. I.NE.M) THEN
```

```

C(N)= S-B(L,I,5,6)*D(L,I,6)+EG(L-1,I)/AR*(B(
+ L-1,I,6,3)*(gs1(L-1,I,3)*AG1(J,I)+gs2(L-1,I,3)
+ *Ag2(J,I)+gs3(L-1,I,3)*Ag3(J,I))*R+B(L-1,I,6,1)*
+ (GS1(L-1,I,1)*AG1(J,I)+GS2(L-1,I,1)*AG2(J,I)+
+ GS3(L-1,I,1)*AG3(J,I))*R+B(L-1,I,6,5)
+ *(gs1(L-1,I,5)*AG1(J,I)+gs2(L-1,I,5)*Ag2(J,I)+gs3
+ (L-1,I,5)*Ag3(J,I))+B(L-1,I,6,6)*(gs1(L-1,I,6)*AG1
+ (J,I)+gs2(L-1,I,6)*Ag2(J,I)+gs3(L-1,I,6)*Ag3(J,I
+ )))-EG(L,I)/AR*(B(L,I,5,1)*(GS1(L,I,1)*AG1(J+1,I)+
+ GS2(L,I,1)*AG2(J+1,I)+GS3(L,I,1)*AG3(J+1,I))*R
+ +B(L,I,5,3)*(gs1(L,I,3)*AG1(J+1,I)+gs2(L,I,3)*Ag2(J+1,I)
+ +gs3(L,I,3)*Ag3(J+1,I))*R+B(L,I,5,5)*(gs1(L,I,5)
+ *AG1(J+1,I)+gs2(L,I,5)*Ag2(J+1,I)+gs3(L,I,5)*Ag3(J+1,I)))
END IF

```

```

C*****SI J=1 ET I=M*****
C*****SI J=M ET I=L-1*****

```

```
IF (I.EQ.M .AND. J.EQ.1) THEN
```

```

C(N)=S+B(1,M,6,5)*D(1,M,5)+B(1,M,6,1)*D(1,M,1)-B(2,M,5,1)*
+ D(2,M,1)+EG(1,M)/AR*(B(1,M,6,3)*
+ (gs1(1,M,3)*AG1(J,I)+gs2(1,M,3)*Ag2(J,I)+gs3(1,M,3)*Ag3
+ (J,I))*R+B(1,M,6,6)*(gs1(1,M,6)*AG1(J,I)+gs2(1,M,6)*Ag2
+ (J,I)+gs3(1,M,6)*Ag3(J,I))-EG(2,M)/AR*(B(2,M,5,3)*(gs1
+ (2,M,3)*AG1(J+1,I)+gs2(2,M,3)*Ag2(J+1,I)+gs3(2,M,3)*Ag3(J+1,I
+ ))*R+B(2,M,5,5)*(gs1(2,M,5)*AG1(J+1,I)+gs2(2,M,5)*Ag2
+ 2(J+1,I)+gs3(2,M,5)*Ag3(J+1,I))+B(2,M,5,6)*(gs1(2,M,6)
+ *AG1(J+1,I)+gs2(2,M,6)*Ag2(J+1,I)+gs3(2,M,6)*Ag3(J+1,I)))
END IF
```

```

C*****SI I=M ET J=1 ET J#L-1*****
C*****SI I=M ET J=L-1*****

```

```
IF (I.EQ.M .AND. J.NE.1 .AND. J.NE.L-1) THEN
```

```

C(N)=S+B(J,I,6,1)*D(J,I,1)-B(J+1,I,6,1)*D(J+1,I,1)+
+ EG(J,M)/AR*(B(J,M,6,3)*(gs1(J,M,3)*AG1(J,I)+gs2(J,M
+ ,3)*Ag2(J,I)+gs3(J,M,3)*Ag3(J,I))*R+B(J,M,6,5)*(gs1
+ (J,M,5)*AG1(J,I)+gs2(J,M,5)*Ag2(J,I)+gs3(J,M,5)
+ *Ag3(J,I))+B(J,M,6,6)*(gs1(J,M,6)*AG1(J,I)+gs2
+ (J,M,6)*Ag2(J,I)+gs3(J,M,6)*Ag3(J,I))-EG(J+1,M)/AR
+ *(B(J+1,M,5,3)*(gs1(J+1,M,3)*AG1(J+1,I)+gs2(J+1,M,3)
+ *Ag2(J+1,I)+gs3(J+1,M,3)*Ag3(J+1,I))*R+B(J+1,M,5,5)*
+ (gs1(J+1,M,5)*AG1(J+1,I)+gs2(J+1,M,5)*Ag2(J+1,I)+
+ gs3(J+1,M,5)*Ag3(J+1,I))+B(J+1,M,5,6)*(gs1(J+1,M,6)
+ *AG1(J+1,I)+gs2(J+1,M,6)*Ag2(J+1,I)+gs3(J+1,M,6)*Ag3(J+1,I)))
END IF
```

```

C*****SI I=M ET J=L-1*****
C*****SI I=M ET J=L*****

```

```
IF (I.EQ.M .AND. J.EQ.L-1) THEN
```

```

C(N)=S-B(L,M,5,6)*D(L,M,6)+B(L-1,M,6,1)*D(L-1,M,1)
+ -B(L,M,5,1)*D(L,M,1)+EG(L-1,M)/AR*(B(L-1,M,6,3)*(gs1
+ (L-1,M,3)*AG1(J,I)+gs2(L-1,M,3)*Ag2(J,I)+gs3(L-1,M,3)*
+ Ag3(J,I))*R+B(L-1,M,6,5)*(gs1(L-1,M,5)*AG1(J,I)+gs2
+ (L-1,M,5)*Ag2(J,I)+gs3(L-1,M,5)*Ag3(J,I))+
+ B(L-1,M,6,6)*(gs1(L-1,M,6)*AG1(J,I)+gs2(L-1,M,6)*
+ Ag2(J,I)+gs3(L-1,M,6)*Ag3(J,I))-EG(L,M)/AR*(B
+ (L,M,5,3)*(gs1(L,M,3)*AG1(J+1,I)+gs2(L,M,3)*Ag2(J+1,I)
+ +gs3(L,M,3)*Ag3(J+1,I))*R+B(L,M,5,5)*(gs1(L,M,5)
+ *AG1(J+1,I)+gs2(L,M,5)*Ag2(J+1,I)+gs3(L,M,5)*Ag3(J+1,I)))

```

```
END IF
N=N+1
END DO
END DO
```

C-----  
C-----  
C-----  
C-----

CALCUL DU VECTEUR {C} DANS LA DIRECTION DES Y C

```
DO I=1,M-1
  DO J=1,L

Z2=B(J,I,1,2)*D(J,I,2)-B(J,I+1,3,2)*D(J,I+1,2)
Z4=B(J,I,1,4)*D(J,I,4)-B(J,I+1,3,4)*D(J,I+1,4)
Z5=B(J,I,1,5)*D(J,I,5)-B(J,I+1,3,5)*D(J,I+1,5)
Z6=B(J,I,1,6)*D(J,I,6)-B(J,I+1,3,6)*D(J,I+1,6)
C*****  
C      SI I=1 ET J=1      *
C*****
```

IF(I.EQ.1 .AND. J.EQ.1)THEN

```
C(N)=Z2+Z4+Z5+EG(J,I)/AR*(B(1,I,1,1)*(GS1(1,I,1)*AG1(1,I)
+  +GS2(1,I,1)*AG2(1,I)+GS3(1,I,1)*AG3(1,I))*R
+  +B(1,I,1,3)*(GS1(1,I,3)*AG1(1,I)+GS2(1,I,3)*AG2(1,I)
+  +GS3(1,I,3)*AG3(1,I))*R+B(1,I,1,6)*(GS1(1,I,6)*AG1(1,I)+
  +GS2(1,I,6)*AG2(1,I)+GS3(1,I,6)*AG3(1,I))-EG(J,I+1)/AR
+  *(B(1,I,2,1)*(GS1(1,I,2,1)*AG1(1,I)+GS2(1,I,2,1)*AG2(1,I)+
  +GS3(1,I,2,1)*AG3(1,I))*R+B(1,I,2,3)*(GS1(1,I,2,3)*AG1(1,I)+
  +GS2(1,I,2,3)*AG2(1,I)+GS3(1,I,2,3)*AG3(1,I))*R
+  +B(1,I,2,6)*(GS1(1,I,2,6)*AG1(1,I)+GS2(1,I,2,6)*AG2(1,I)+
  +GS3(1,I,2,6)*AG3(1,I)))
```

END IF

```
C*****  
C      SI J=1 I#1 ET I#M-1      *
C*****
```

IF (J.EQ.1 .AND. I.NE.1 .AND. I.NE.M-1) THEN

```
C(N)=Z2+Z4+Z5+EG(1,I)/AR*(B(1,I,1,1)*(gs1(1,I,1)*AG1(1,I)
+  +gs2(1,I,1)*AG2(1,I)+gs3(1,I,1)*AG3(1,I))*R
+  +B(1,I,1,3)*(gs1(1,I,3)*AG1(1,I)+gs2(1,I,3)*
  +  *AG2(1,I)+gs3(1,I,3)*AG3(1,I))*R+B(1,I,1,6)*(gs1(1,I,
  +  6)*AG1(1,I)+gs2(1,I,6)*AG2(1,I)+gs3(1,I,6)*AG3(1,I)))
  +-EG(1,I+1)/AR*(B(1,I+1,3,1)*(gs1(1,I+1,1)*AG1
  +  +(1,I+1)*gs2(1,I+1,1)*AG2(1,I+1)+gs3(1,I+1,1)*AG3(1,I+1))*R+B
  +  +(1,I+1,3,3)*(gs1(1,I+1,3)*AG1(1,I+1)+gs2(1,I+1,3)*AG2(1,
  +  I+1)+gs3(1,I+1,3)*AG3(1,I+1))*R+B(1,I+1,3,6)*(gs1(1,I+1,6)
  +  *AG1(1,I+1)+gs2(1,I+1,6)*AG2(1,I+1)+gs3(1,I+1,6)*AG3(1,I+1)))
```

END IF

C\*\*\*\*\*  
C SI J=1 ET I=M-1 \*  
C\*\*\*\*\*

IF (J.EQ.1 .AND. I.EQ.M-1) THEN

C(N)=Z2+Z4+Z5-B(1,M,3,1)\*D(1,M,1)+EG(1,M-1)/AR\*(  
+ B(1,M-1,1,1)\*(gs1(1,M-1,1)\*AG1(J,I)+gs2(1,M-1,1)\*Ag2(  
+ (J,I)+gs3(1,M-1,1)\*Ag3(J,I))\*R+B(1,M-1,1,3)\*(gs1(1,M-1  
+ ,3)\*AG1(J,I)+gs2(1,M-1,3)\*Ag2(J,I)+gs3(1,M-1,3)\*Ag3(J,  
+ I))\*R+B(1,M-1,1,6)\*(gs1(1,M-1,6)\*AG1(J,I)+gs2(1,M-1,6)  
+ \*Ag2(J,I)+gs3(1,M-1,6)\*Ag3(J,I)))-EG(1,M)/AR\*(B(1,M,3,  
+ 3)\*(gs1(1,M,3)\*AG1(J,I+1)+gs2(1,M,3)\*Ag2(J,I+1)+gs3(1,M,3)  
+ \*Ag3(J,I+1))\*R+B(1,M,3,6)\*(gs1(1,M,6)\*AG1(J,I+1)+gs2  
+ (1,M,6)\*Ag2(J,I+1)+gs3(1,M,6)\*Ag3(J,I+1)))  
END IF

C\*\*\*\*\*  
C SI I#M-1 , J#1 ET J=L \*  
C\*\*\*\*\*

IF (I.NE.M-1 .AND. J.NE.1 .AND. J.NE.L) THEN

C(N)= Z2+Z4+EG(J,I)/AR\*(B(J,I,1,1)\*(gs1(J,I,1)\*AG1(J,I)  
+ +gs2(J,I,1)\*Ag2(J,I)+gs3(J,I,1)\*Ag3(J,I  
+ ))\*R+B(J,I,1,3)\*(gs1(J,I,3)\*AG1(J,I)+gs2(J,I,3)\*Ag2(J,  
+ I)+gs3(J,I,3)\*Ag3(J,I))\*R+B(J,I,1,5)\*(gs1(J,I,5)\*AG1(J  
+ ,I)+gs2(J,I,5)\*Ag2(J,I)+gs3(J,I,5)\*Ag3(J,I))+B(J,I,1  
+ ,6)\*(gs1(J,I,6)\*AG1(J,I)+gs2(J,I,6)\*Ag2(J,I)+gs3(J,I,6)  
+ \*Ag3(J,I)))-EG(J,I+1)/AR\*(B(J,I+1,3,1)\*(gs1(J,I+1,1)  
+ \*AG1(J,I+1)+gs2(J,I+1,1)\*Ag2(J,I+1)+gs3(J,I+1,1)\*Ag3  
+ (J,I+1))\*R+B(J,I+1,3,3)\*(gs1(J,I+1,3)\*AG1(J,I+1)+gs2  
+ (J,I+1,3)\*Ag2(J,I+1)+gs3(J,I+1,3)\*Ag3(J,I+1))\*R+B(J,I+1  
+ ,3,5)\*(gs1(J,I+1,5)\*AG1(J,I+1)+gs2(J,I+1,5)\*Ag2(J,I+1)+  
+ gs3(J,I+1,5)\*Ag3(J,I+1))+B(J,I+1,3,6)\*(gs1(J,I+1,6)  
+ \*AG1(J,I+1)+gs2(J,I+1,6)\*Ag2(J,I+1)+gs3(J,I+1,6)\*Ag3(J,I+1)))

END IF

C\*\*\*\*\*  
C SI I#M-1 ET J=L \*  
C\*\*\*\*\*

IF (I.NE.M-1 .AND. J.EQ.L) THEN

C(N)=Z2+Z4+Z6+EG(L,I)/AR\*(B(L,I,1,1)\*(gs1(L,I,1)\*  
+ AG1(J,I)+gs2(L,I,1)\*Ag2(J,I)+gs3(L,I,1)\*Ag3(J,I))  
+ \*R+B(L,I,1,3)\*(gs1(L,I,3)\*AG1(J,I)+gs2(L,I,3)\*Ag2(J,I  
+ )+gs3(L,I,3)\*Ag3(J,I))\*R+B(L,I,1,5)\*(gs1(L,I,5)\*AG1  
+ (J,I)+gs2(L,I,5)\*Ag2(J,I)+gs3(L,I,5)\*Ag3(J,I)))-EG

```

+ (L, I+1)/AR*(B(L, I+1, 3, 1)*gs1(L, I+1, 1)*AG1(J, I+1) +
+ gs2(L, I+1, 1)*AG2(J, I+1)+gs3(L, I+1, 1)*AG3(J, I+1))*R+B(L, I+
+ 1, 3, 3)*gs1(L, I+1, 3)*AG1(J, I+1)+gs2(L, I+1, 3)*AG2(J, I+1)
+ +gs3(L, I+1, 3)*AG3(J, I+1))*R+B(L, I+1, 3, 5)*gs1(L, I+1, 5)
+ *AG1(J, I+1)+gs2(L, I+1, 5)*AG2(J, I+1)+gs3(L, I+1, 5)*AG3(J, I+1)))

```

```
END IF
```

```
C*****SI I=M-1 , J#1 ET J=L *****C
C*****
```

```
IF (I.EQ.M-1 .AND. J.NE.1 .AND. J.NE.L) THEN
```

```

C(N)=Z2+Z4-B(J, I+1, 3, 1)*D(J, I+1, 1)+EG(J, I)/AR*(B(J, I, 1, 1)*
+ gs1(J, I, 1)*AG1(J, I)+gs2(J, I, 1)*AG2(J, I)+gs3(J, I, 1)*AG3
+ (J, I))*R+B(J, I, 1, 3)*gs1(J, I, 3)*AG1(J, I)+gs2(J, I, 3)*
+ AG2(J, I)+gs3(J, I, 3)*AG3(J, I))*R+B(J, I, 1, 5)*gs1(J, I, 5)
+ *AG1(J, I)+gs2(J, I, 5)*AG2(J, I)+gs3(J, I, 5)*AG3(J, I))+
+ B(J, I, 1, 6)*gs1(J, I, 6)*AG1(J, I)+gs2(J, I, 6)*AG2(J, I)
+ +gs3(J, I, 6)*AG3(J, I))-EG(J, I+1)/AR*(B(J, I+1, 3, 3)
+ *(gs1(J, I+1, 3)*AG1(J, I+1)+gs2(J, I+1, 3)*AG2(J, I+1)
+ +gs3(J, I+1, 3)*AG3(J, I+1))*R+B(J, I+1, 3, 5)*gs1(J, I+1
+ , 5)*AG1(J, I+1)+gs2(J, I+1, 5)*AG2(J, I+1)+gs3(J, I+1, 5)
+ *AG3(J, I+1))+B(J, I+1, 3, 6)*(gs1(J, I+1, 6)*AG1(J, I+1)
+ +gs2(J, I+1, 6)*AG2(J, I+1)+gs3(J, I+1, 6)*AG3(J, I+1)))

```

```
END IF
```

```
C*****SI I=M-1 ET J=L *****C
C*****
```

```
IF (I.EQ.M-1 .AND. J.EQ.L) THEN
```

```

C(N)=Z2+Z4+Z6-B(L, I+1, 3, 1)*D(L, I+1, 1)+EG(L, I)/AR*(B(L, I, 1, 1)
+ *(gs1(L, I, 1)*AG1(J, I)+gs2(L, I, 1)*AG2(J, I)+gs3(L, I, 1)
+ *AG3(J, I))*R+B(L, I, 1, 3)*gs1(L, I, 3)*AG1(J, I)
+ +gs2(L, I, 3)*AG2(J, I)+gs3(L, I, 3)*AG3(J, I))*R+B
+ (L, I, 1, 5)*gs1(L, I, 5)*AG1(J, I)+gs2(L, I, 5)*AG2(J, I)+
+ gs3(L, I, 5)*AG3(J, I))-EG(L, I+1)/AR*(B(L, I+1, 3, 3)
+ *(gs1(L, I+1, 3)*AG1(J, I+1)+gs2(L, I+1, 3)*AG2(J, I+1)
+ +gs3(L, I+1, 3)*AG3(J, I+1))*R+B(L, I+1, 3, 5)*gs1(L, I+1, 5)*
+ *AG1(J, I+1)+gs2(L, I+1, 5)*AG2(J, I+1)+gs3(L, I+1, 5)*AG3(J, I+1)))

```

```
END IF
```

```
N=N+1
```

```
END DO
```

```
END DO
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
C MATRICE B2 AUGMENTEE C
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
II=2*MAL-M-L
```

```

DO I=1,II
  QR(I)=0.
  DO J=1,II
    QR(I)=QR(I)+B2(I,J)*C(J)
  END DO
END DO
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C   CALCUL DU VECTEUR (QR) CONTENANT LES VECTEURS C
C           (QA) ET (QB)                         C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

C-----
C
C      ASSIGNATION DE QA ET QB APARTIR DU VECTEUR (QR) -
C
C-----

```

N=1

```

DO I=1,M
  DO J=1,L-1
    QA(J,I)=QR(N)
    N=N+1
  END DO
END DO

```

```

DO I=1,M-1
  DO J=1,L
    QB(J,I)=QR(N)
    N=N+1
  END DO
END DO

```

```

C-----
C
C      CALCUL DE LA RADIOSITE Q0(J,I,K) DONNEE PAR
C      L'EQUATION Q0(J,I,K) = SOM( B(J,I,K,JK)*D(J,I,K) ) -
C      ET LE FLUX DE CHALEUR NET DONNE PAR L'EQUATION (2) -
C-----
```

```

DO I=1,M
  DO J=1,L
    DO K=1,6
      D1=QB(J,I)/AS+(EG(J,I)/AS)*gs1(J,I,1)*AG1(J,I)
      +gs2(J,I,1)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,1)*AG3(J,I))
      IF(I.EQ.M) D1=D(J,I,1)
      X1=B(J,I,K,1)*D1
      X2=B(J,I,K,2)*D(J,I,2)
      D3=EG(J,I)*(gs1(J,I,3)*AG1(J,I)
      +gs2(J,I,3)*Ag2(J,I)+gs3(J,I,3)*AG3(J,I))/AS
      IF(I.NE.1) D3=D3-QB(J,I-1)/AS
    END DO
  END DO
END DO

```



```
$ TY BILA.FOR
```

```
  SUBROUTINE BILAN (M,L,TS,TG,Tamb,A,QA,QB,Qnet,U,CP,
+  Fs,Fg,QC,HE,DM1,DM3,DM5,DM6,TAG1,TAG5,TAG6,J1,I1, F)
  DIMENSION QA(175,175),QB(175,175),Qnet(20,6,6),TSG(20,10)
  DIMENSION A(20,6,6),HS(100,100),HEN(100,100),HE(50,50,6)
  DIMENSION Fs(20,6,6),Fg(20,6),Tamb(20,6,6)
  DIMENSION F(6,40,6,40),TS(20,6,6),TG(20,6),DM1(50,50)
  DIMENSION QC(20,20),TAG1(50),TAG6(50),TAG5(50),DM3(50,50)
  DIMENSION U(20,6,6),DM5(50,50),DM6(50,50)
```

```
C-----
```

```
C-----
```

```
C      DETERMINATION DU VECTEUR FONCTION {F} QUI
C      CONTIENT LES EQUATION DU BILAN ENERGITIQUES
```

```
C-----
```

```
C      EQUATION DU BILAN ENERGITIQUE POUR LES SURFACES
C      REELES 1, 2, 5 ET 6
```

```
C*****
```

```
  DO I=1,M
    DO J=1,L
      IF(I.EQ.M) THEN
        Fs(J,M,1)= Qnet(J,M,1)+U(J,M,1)*(TS(J,M,1)-Tamb(J,M,1))+HE(J,M,1)*
+        (TS(J,M,1)-TG(J,M))
      END IF
      Fs(J,I,2)= Qnet(J,I,2)+U(J,I,2)*(TS(J,I,2)-Tamb(J,I,2))+HE(J,I,2)*
+        (TS(J,I,2)-TG(J,I))
    END DO
    Fs(1,I,5)= Qnet(1,I,5)+U(1,I,5)*(TS(1,I,5)-Tamb(1,I,5))+HE(1,I,5)*
+        (TS(1,I,5)-TG(1,I))
    Fs(L,I,6)= Qnet(L,I,6)+U(L,I,6)*(TS(L,I,6)-Tamb(L,I,6))+HE(L,I,6)*
+        (TS(L,I,6)-TG(L,I))
  END DO
```

```
C*****
```

```
C      CIRCULATIONS
```

```
C*****
```

```
  DO I=1,L
    DO J=1,M
      HS(I,J)=(DM5(I+1,J)+DM6(I,J)+DM1(I,J)+DM3(I,J+1))*CP*
+      (TG(I,J)-TAMB(I,J,2))
    END DO
  END DO
  DO I=2,L-1
    DO J=2,M-1
      D5=DM5(I,J)*CP*(TG(I-1,J)-TAMB(I,J,2))
      D6=DM6(I+1,J)*CP*(TG(I+1,J)-TAMB(I,J,2))
      D1=DM1(I,J+1)*CP*(TG(I,J+1)-TAMB(I,J,2))
    END DO
  END DO
```

K1=2  
SUM=0.  
DO I=1,M

XX  
C CUBE 1  
C POUR TOUTES LES RANGEEES(I--->M) ET LE PREMIER X  
C XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX  
C EQUATIONS DES BILANS ENERGIIQUE POUR LE GAZ X  
C XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

END DO  
HEN(I,1)=D1+D3+D5+D6  
D3=0.  
D5=DMS(I,1,1)\*CPA(TG(I-1,1)-TAMB(I,1,2))  
D6=DMS(I+1,1)\*CPA(TG(I+1,1)-TAMB(I,1,2))  
D1=DMS(I,2)\*CPA(TG(I,2)-TAMB(I,1,2))  
DO I=2,L-1

END DO  
HEN(I,M)=D1+D3+D5+D6  
D3=DMS(I,M)\*CPA(TG(I-1,M)-TAMB(I,M,2))  
D5=DMS(I,M)\*CPA(TG(I+1,M)-TAMB(I,M,2))  
D6=DMS(I+1,M)\*CPA(TG(I+1,M)-TAMB(I,M,2))  
D1=DMS(I,M+1)\*CPA(TAG1(I)-TAMB(I,M,2))  
DO I=2,L-1

END DO  
HEN(L,J)=D1+D3+D5+D6  
IE (J,NE,1) D3=DMS(L,J)\*CPA(TG(L,J-1)-TAMB(L,J,2))  
IF (J,EQ,1) D3=0.  
IE (J,NE,M) D1=DMS(L,J+1)\*CPA(TAG1(J)-TAMB(L,J,2))  
IF (J,EQ,M) D1=DMS(L,J+1)\*CPA(TG(L,J+1)-TAMB(L,J,2))  
D5=DMS(L,J)\*CPA(TG(L-1,J)-TAMB(L,J,2))  
D6=DMS(L+1,J)\*CPA(TAG6(J)-TAMB(L,J,2))  
DO J=1,M

END DO  
HEN(1,J)=D1+D3+D5+D6  
IE (J,NE,1) D3=DMS(1,J)\*CPA(TG(1,J-1)-TAMB(1,J,2))  
IF (J,EQ,1) D3=0.  
IE (J,NE,M) D1=DMS(1,J+1)\*CPA(TAG1(J)-TAMB(1,J,2))  
IF (J,EQ,M) D1=DMS(1,J+1)\*CPA(TG(1,J+1)-TAMB(1,J,2))  
D6=DMS(2,J)\*CPA(TG(2,J)-TAMB(2,J,2))  
D5=DMS(1,J)\*CPA(TAG5(J)-TAMB(1,J,2))  
DO J=1,M

END DO  
HEN(I,J)=D5+D6+D1+D3  
D3=DMS(I,J)\*CPA(TG(I,J-1)-TAMB(I,J,2))

```

K2=2
IF(I.EQ.M) K1=1
IF(I.EQ.M) K2=1
DO K=K1,4,K2
  IF(K.NE.3) THEN
    SUM=SUM+A(1,I,K)*QNET(1,I,K)+HE(1,I,K)*A(1,I,K)*
    + (TS(1,I,K)-IG(1,I))
  END IF
END DO
  SUM=SUM+A(1,I,5)*QNET(1,I,5)+HE(1,I,5)*A(1,I,5)*
+ (TS(1,I,5)-IG(1,I))

TERM=QA(1,I)+QB(1,I)-QB(1,I-1)
IF(I.EQ.1) TERM=QA(1,1)+QB(1,1)
IF(I.EQ.M) TERM=QA(1,M)-QB(1,M-1)
FG(1,I)=SUM+QC(1,I)-HS(1,I)+HEN(1,I)+TERM
END DO

```

```

*****
C      POUR TOUTES LES RANGEES(1-->M) ET POUR TOUTS LES      *
C      CUBES SAUF LE PREMIER ET LE DERNIER(1-->L-1      *
*****

```

```

DO I=1,M
  DO J=2,L-1
    SUM=0.
    K1=2
    K2=2
    IF(I.EQ.M) K1=1
    IF(I.EQ.M) K2=1
    DO K=K1,4,K2
      IF(K.NE.3) THEN
        SUM=SUM+A(J,I,K)*QNET(J,I,K)+HE(J,I,K)*A(J,I,K)*
        + (TS(J,I,K)-IG(J,I))
      END IF
    END DO
    TERM=QA(J,I)-QA(J-1,I)+QB(J,I)-QB(J,I-1)
    IF (I.EQ.1) TERM=QA(J,1)-QA(J-1,1)+QB(J,1)
    IF (I.EQ.M) TERM=QA(J,M)-QA(J-1,M)-QB(J,M-1)
    FG(J,I)=QC(J,I)+SUM-HS(J,I)+HEN(J,I)+TERM
  END DO
END DO

```

```

*****
C      POUR TOUTES LES RANGEES(1-->M) ET LE DERNIER CUBE L      *
*****

```

```

DO I=1,M
  SUM=0.
  K1=2
  K2=2
  IF(I.EQ.M) K1=1
  IF(I.EQ.M) K2=1

```

```

DO K=K1,4,K2
  IF(K.NE.3) THEN
    SUM=SUM+A(L,I,K)*QNET(L,I,K)+HE(L,I,K)*A(L,I,K)*
    + (TS(L,I,K)-TG(L,I))
  END IF
END DO
  SUM=SUM+A(L,I,6)*QNET(L,I,6)+HE(L,I,6)*A(L,I,6)*
  + (TS(L,I,6)-TG(L,I))
  TERM=-QA(L-1,I)+QB(L,I)-QB(L,I-1)
  IF (I.EQ.1) TERM=-QA(L-1,1)+QB(L,1)
  IF (I.EQ.M) TERM=-QA(L-1,M)-QB(L,M-1)
  FG(L,I)=QC(L,I)+SUM-HS(L,I)+HEN(L,I)+TERM
END DO

```

C-----C  
C ASSIGNATION DU VECTEUR {F} SELON LES C
C FONCTION DES BILANS ENERGITIQUES DES C
C SURFACES REELLES 1, 2, 5, 6 ET DES C
C DES CUBES DE GAZ C
C-----C

```

DO I=1,M
  DO J=1,2*L+2
    IF(J.LE.L) F(I1,J1,I,J)=-FS(J,I,2)
    IF((J.GT.L).AND.(J.LE.2*L))F(I1,J1,I,J)=-FG(J-L,I)
    IF(J.EQ.2*L+1)F(I1,J1,I,J)=-FS(1,I,5)
    IF(J.EQ.2*L+2)F(I1,J1,I,J)=-FS(L,I,6)
  END DO
END DO

DO J=1,L
  I=M+1
  F(I1,J1,I,J)=-FS(J,M,1)
END DO

RETURN
END

```

```

$ TY FACE.FOR
    SUBROUTINE FACE(IK,CX,CY,CZ,INDC,FACT,GST)
    DIMENSION INMU(5),FACT(10,6,6),GST(10,6)
    DIMENSION AM(50,50,50),EM(50,50,50),AG(50,50,50)
C    ENTRÉE:
C
    PRINT*, 'IK=', IK, 'INDC=', INDC
    PRINT*, 'CX=', CX, 'CY=', CY, 'CZ=', CZ
    INMU(1)=1
    INMU(2)=2
    INMU(3)=5
    INMU(4)=7
    INMU(5)=0
    NNN=10000
    NX=1
    NY=1
    NZ=1
    EM(1,1,1)=1.0
    EM(2,1,1)=1.0
    EM(3,1,1)=1.0
    EM(4,1,1)=1.0
    EM(5,1,1)=1.0
    EM(6,1,1)=1.0
    II=97531
    PI=3.141593
    DELTAX=CX/NX
    DELTAY=CY/NY
    DELTAZ=CZ/NZ
    IDI=1
    ITER=1
2070  CONTINUE
    IF (INMU(ITER).EQ.0) GOTO 6655
    IDI=INMU(ITER)
    IF (INMU(ITER).EQ.1) IDI=4
    IF (INMU(ITER).EQ.2) IDI=1
    IF (INMU(ITER).EQ.5) IDI=3
    ITER=ITER+1
    DO 2051 IMN=1,NX
    IF (IDI.LE.6) GO TO 2005
    IDI=7
    NAA=NY
    NBB=NZ
    GO TO 2004
2005  GO TO (2001,2001,2002,2003,2002,2003),IDI
2001  NAA=NX
    NBB=NY
    IF (IDI.EQ.1) THEN
    CZ11=CZ
    ELSE
    CZ11=0.0
    ENDIF
    GO TO 2004
2002  NAA=NX

```

```

NBB=NZ
IF (IDI.EQ.3) THEN
CY11=0.0
ELSE
CY11=CY
ENDIF
GO TO 2004
2003 NAA=NY
NBB=NZ
IF (IDI.EQ.4) THEN
CX11=CZ
ELSE
CX11=0.0
ENDIF
GO TO 2004
2004 DO 1021 JDJ=1,NAA
DO 1021 KDK=1,NBB
IF (IDI.LE.6) THEN
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3001) IDI
C      WRITE(6,3002) IDI,JDJ,KDK
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3008)
ELSE
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3003)
C      WRITE(6,3002) IMN,JDJ,KDK
C      WRITE(6,3008)
C      WRITE(6,3008)
ENDIF
C
C      INITIALISE LES VALEURS:
C
DO 1035 I=1,6
DO 1035 J=1,10
DO 1035 K=1,10
AM(I,J,K)=0.0
DO 1035 KK=1,10
AG(J,K,KK)=0.0
1035 CONTINUE
C
DO 7 JSJS=1,NNN
GO TO (1091,1091,1092,701,1092,701,700),IDI
C
C      EMISSION DU GAZ:
C
700  R1=RAN(II)
R2=RAN(II)
R3=RAN(II)
R4=RAN(II)
R5=RAN(II)

```

```

RG=RAN(II)
X=(R1+IMN-1)*DELTAX
Y=(R2+JDJ-1)*DELTAY
Z=(R3+KDK-1)*DELTAZ
T=2.0*PI*R4
B=ACOS(1.0-2.0*R5)
ZL=-(ALOG(R6))/TK
PI2=PI/2
IF (B-PI2) 702,702,703
702  CZ1=Z
      B=PI/2-B
      CALL CAR (T,B,CX,CY,CZ1,X,Y,Z,ZLL,A2,B2,C2,L)
      IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1000
      X=X+ZL*COS(T)*COS(B)
      Y=Y+ZL*SIN(T)*COS(B)
      Z=Z-ZL*SIN(B)
      GO TO 100
1000  X=A2
      Y=B2
      Z=Z-C2
      GO TO (704,705,706,707,708),L
704   L=4
      GO TO 709
705   L=5
      GO TO 709
706   L=6
      GO TO 709
707   L=3
      GO TO 709
708   L=2
709   GO TO 33
703   CZ1=CZ-Z
      B=PI/2
      CALL CAR (T,B,CX,CY,CZ1,X,Y,Z,ZLL,A2,B2,C2,L)
      IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1001
      X=X+ZL*COS(T)*COS(B)
      Y=Y+ZL*SIN(T)*COS(B)
      Z=Z+ZL*SIN(B)
      GO TO 100
1001  X=A2
      Y=B2
      Z=Z+C2
      GO TO (710,711,712,713,714),L
710   L=4
      GO TO 715
711   L=5
      GO TO 715
712   L=6
      GO TO 715
713   L=3
      GO TO 715
714   L=1
715   GO TO 33

```

C  
C EMISSION DU MUR 1 OU 2:  
C  
1091 R1=RAN(II)  
R2=RAN(II)  
Z=CZ11  
X=(R1+JDJ-1)\*DELTAX  
Y=(R2+KDK-1)\*DELTAY  
L=IDI  
GO TO 278  
C  
C EMISSION DU MUR 3 OU 5:  
C  
1092 R1=RAN(II)  
R2=RAN(II)  
Y=CY11  
X=(R1+JDJ-1)\*DELTAX  
Z=(R2+KDK-1)\*DELTAZ  
L=IDI  
GO TO 278  
C  
C EMISSION DU MUR 4 OU 6:  
C  
701 R1=RAN(II)  
R2=RAN(II)  
X=CX11  
Y=(R1+JDJ-1)\*DELTAY  
Z=(R2+KDK-1)\*DELTAZ  
L=IDI  
GO TO 278  
C  
C LONGUEUR DU RAYON:  
C  
278 R1=RAN(II)  
ALGN=ALOG(R1)  
ZL=-ALGN/TK  
C  
C ANGLES D EMISSION:  
C  
R1=RAN(II)  
R2=RAN(II)  
T=2.0\*R1\*PI  
B=ASIN(R2\*0.5)  
GO TO (19,20,21,22,23,24),L  
C  
C VERIFIE SI FRAPPE UN MUR:  
C  
C A PARTIR DU MUR 1:  
C  
19 CALL CAR (T,B,CX,CY,CZ,X,Y,Z,ZLL,A2,B2,C2,L)  
IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1002  
X=X+ZL\*COS(B)\*COS(T)  
Y=Y+ZL\*COS(B)\*SIN(T)

```

        Z=CZ-ZL*SIN(B)
        GO TO 100
1002    X=A2
        Y=B2
        Z=CZ-C2
        GO TO (70,71,72,73,74),L
70      L=4
        GO TO 200
71      L=5
        GO TO 200
72      L=6
        GO TO 200
73      L=3
        GO TO 200
74      L=2
200     GO TO 33
C
C      A PARTIR DU MUR 2:
C
20      CALL CAR (T,B,CX,CY,CZ,X,Y,Z,ZLL,A2,B2,C2,L)
        IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1003
        X=X+ZL*COS(B)*COS(T)
        Y=Y+ZL*COS(B)*SIN(T)
        Z=ZL*SIN(B)
        GO TO 100
1003   X=A2
        Y=B2
        Z=C2
        GO TO (75,76,77,78,79),L
75      L=4
        GO TO 201
76      L=5
        GO TO 201
77      L=6
        GO TO 201
78      L=3
        GO TO 201
79      L=1
201     GO TO 33
C
C      A PARTIR DU MUR 3:
C
21      CALL CAR (T,B,CX,CZ,CY,X,Z,Y,ZLL,A2,B2,C2,L)
        IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1004
        X=X+ZL*COS(B)*COS(T)
        Y=ZL*SIN(B)
        Z=Z+ZL*COS(B)*SIN(T)
        GO TO 100
1004   X=A2
        Y=C2
        Z=B2
        GO TO (80,81,82,83,84),L
80      L=4

```

```

94      L=3
205      GO TO 33
C
C      A PARTIR DU MUR 6:
C
24      CALL CAR (T,B,CY,CZ,CX,Y,Z,X,ZLL,A2,B2,C2,L)
        IF (ZL.GE.ZLL) GO TO 1007
        X=ZL*SIN(B)
        Y=Y+ZL*COS(B)*COS(T)
        Z=Z+ZL*COS(B)*SIN(T)
        GO TO 100
1007    X=C2
        Y=A2
        Z=B2
        GO TO (95,96,97,98,99),L
95      L=5
        GO TO 206
96      L=1
        GO TO 206
97      L=3
        GO TO 206
98      L=2
        GO TO 206
99      L=4
206      GO TO 33
C
33      GO TO (1022,1022,1023,1024,1023,1024),L
1022    JJ=X+1/DELTAX+1
        KK=Y+1/DELTAY+1
34      SOS=EM(L,JJ,KK)
        R1=RAN(II)
        IF (R1-SOS) 1026,1026,1025
1023    JJ=X+1/DELTAX+1
        KK=Z+1/DELTAZ+1
        GO TO 34
1024    JJ=Y+1/DELTAY+1
        KK=Z+1/DELTAZ+1
        GO TO 34
1025    GO TO 278
1026    AM(L,JJ,KK)=AM(L,JJ,KK)+1.0
        GO TO 7
100      III=X+1/DELTAX+1
        JJ=Y+1/DELTAY+1
        KK=Z+1/DELTAZ+1
        AG(III,JJ,KK)=AG(III,JJ,KK)+1.0
        GO TO 7
7       CONTINUE
C
        DO 8027 I=1,6
        GO TO (8028,8028,8029,8030,8029,8030),I
8028    DO 8031 J=1,NX
        DO 8031 K=1,NY
        AM(I,J,K)=AM(I,J,K)/NNN

```

```

8031  CONTINUE
      GO TO 8027
8029  DO 8032 J=1,NX
      DO 8032 K=1,NZ
      AM(I,J,K)=AM(I,J,K)/NNN
8032  CONTINUE
      GO TO 8027
8030  DO 8033 J=1,NY
      DO 8033 K=1,NZ
      AM(I,J,K)=AM(I,J,K)/NNN
8033  CONTINUE
8027  CONTINUE
C
C      DO 8034 I=1,NX
C      DO 8034 J=1,NY
C      DO 8034 K=1,NZ
C      AG(I,J,K)=AG(I,J,K)/NNN
8034  CONTINUE
C
C      ECRITURE DES RESULTATS:
C
C      IF(IDI.EQ.7) GOTO 1028
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),1)=AM(4,1,1)
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),2)=AM(1,1,1)
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),3)=AM(6,1,1)
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),4)=AM(2,1,1)
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),5)=AM(3,1,1)
      FACT(INDC,INMU(ITER-1),6)=AM(5,1,1)
C
C      GOTO 1027 ..
1028  CONTINUE
      GST(INDC,1)=AM(4,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
      GST(INDC,2)=AM(1,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
      GST(INDC,3)=AM(6,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
      GST(INDC,4)=AM(2,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
      GST(INDC,5)=AM(3,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
      GST(INDC,6)=AM(5,1,1)*4.*CX*CY*CZ*TK
1027  CONTINUE
C
C      WRITE(6,3000)
C      WRITE(6,3007)
C      WRITE(6,3000)
      DO 1034 I=1,NX
      DO 1034 J=1,NY
C      WRITE(6,3006)(AG(I,J,K),K=1,NZ)
1034  CONTINUE
C      WRITE(6,3000)
1021  CONTINUE
C
      IF (IDI.LE.6) GO TO 2050
2051  CONTINUE
2050  W=0.0
C

```

```

C      FORMAT:
C
3008  FORMAT(1X,60('*'))
3000  FORMAT(1X,60('-'))
3001  FORMAT(1X,'DEPART DU MUR=',I2)
3002  FORMAT(1X,'COORDONNEES=',3I2)
3003  FORMAT(1X,'DEPART DU GAZ')
3004  FORMAT(1X,'SUR MUR=',I2)
3005  FORMAT(1X,<NY>F9.5)
3006  FORMAT(1X,<NZ>F9.5)
3007  FORMAT(1X,'DANS LE GAZ')

C      GO TO 2070

C
6655  CONTINUE
      DO 7555 I=1,6
      FACT(INDC,3,I)=FACT(INDC,1,I)
      IF(I.EQ.1) FACT(INDC,3,I)=FACT(INDC,1,3)
      IF(I.EQ.3) FACT(INDC,3,I)=0.0

C
      FACT(INDC,4,I)=FACT(INDC,2,I)
      IF(I.EQ.2) FACT(INDC,4,I)=FACT(INDC,2,4)
      IF(I.EQ.4) FACT(INDC,4,I)=0.0

C
      FACT(INDC,6,I)=FACT(INDC,5,I)
      IF(I.EQ.5) FACT(INDC,6,I)=FACT(INDC,5,6)
      IF(I.EQ.6) FACT(INDC,6,I)=0.0

C
7555  CONTINUE
      RETURN
      END

C
$ 1Y CAR.FOR
C
      SUBROUTINE CAR (I,B,CA,CB,CC,A1,B1,C1,ZLL,A2,B2,C2,M)
      PI=3.141593
      T1=ATAN((CB-B1)/(CA-A1))
      T2=PI-ATAN((CB-B1)/A1)
      T3=PI+ATAN(B1/A1)
      T4=2*PI-ATAN(B1/(CA-A1))

C
      IF ((T.LE.T1).OR.(T.GT.T4)) GO TO 500
      IF ((T.LE.T2).AND.(T.GT.T1)) GO TO 501
      IF ((T.LE.T3).AND.(T.GT.T2)) GO TO 502

C
      T5=ABS(3*PI/2-T)
      H=B1/COS(T5)
      BM=ATAN(CC/H)
      IF (B.GT.BM) GO TO 510
      M=4
      B2=0.0
      A2=A1+H*SIN(T-3*PI/2)
      C2=H*TAN(B)

```

C

599 ZLL=H/COS(B)  
RETURN  
END