

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES ET SYSTÈMES

PAR

THIERRY BOURGEOIS

B.Sc., B.Ing.

COUPLAGE DU LOGICIEL PHOENICS ET DE LA MÉTHODE DE ZONES
EN VUE DE LA MODÉLISATION DU TRANSFERT DE CHALEUR
DANS DES FOURNAISES INDUSTRIELLES

MARS 1988



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.

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

La plupart des figures contenues dans ce mémoire sont des représentations graphiques en couleur des champs de température, pression et vitesse obtenus lors des différentes simulations. Malheureusement, dû au coût élevé de la photocopie couleur, l'auteur a été contraint de limiter la reproduction aux figures les plus représentatives.

L'auteur demeure à la disposition du lecteur intéressé qui voudrait consulter les figures originales.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente deux versions du couplage du logiciel PHOENICS avec la méthode de zones.

PHOENICS permet de résoudre, en trois dimensions, les équations différentielles qui décrivent les transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. D'autre part, le transfert de chaleur par rayonnement est fidèlement évalué par la méthode de zones. Le couplage de ces deux entités engendre un outil de premier ordre pour la modélisation complète des chambres de combustion des fours industriels.

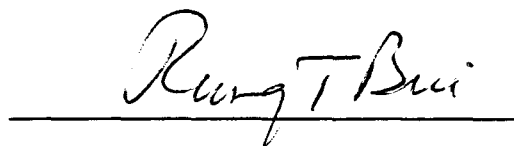
Le modèle couplé PHOENICS-ZONE a été appliqué à la chambre de combustion d'un four de métal chaud tel qu'utilisé dans l'industrie de l'aluminium. Les résultats obtenus ont permis d'en apprécier la valeur et de cerner les paramètres les plus importants lors de la simulation.

Une comparaison entre méthode de zones et méthode de flux est établie. Certains phénomènes physiques sont mis en lumière comme l'effet gravitationnel et la convection naturelle qui en découle, le transfert de masse par infiltration ou exfiltration entre la chambre et le milieu ambiant.

Les simulations effectuées confirment la valeur du modèle couplé PHOENICS-ZONE et permettent de cerner les lacunes qui devraient être comblées pour réaliser un modèle mathématique versatile et performant, représentatif des phénomènes qui régissent le comportement d'une chambre de combustion.



Thierry Bourgeois, étudiant



Rung Tien Bui, dir. de recherche

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier Messieurs Rung T. Bui, Ph.D., et André Charette, D.Sc., respectivement directeur et codirecteur de ce projet de recherche effectué dans le cadre de la Maîtrise en ressources et systèmes.

Un merci tout particulier s'adresse à l'équipe de l'ingénierie des systèmes et plus spécialement à M. Yasar Kocaeffe pour sa collaboration efficace et diligente et à M. Guy Simard dont la connaissance approfondie du logiciel PHOENICS a été une source presque inépuisable de renseignements et d'encouragements.

Merci également à la compagnie Alcan pour son support financier par l'entremise de la bourse Alcan Saguenay-Lac-Saint-Jean 1986.

Merci à Mme Etienne Tremblay pour la dactylographie et la mise en page.

Merci à ma femme, Monique, pour tout et pour le reste.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Le four de métal chaud	1
1.2 Les caractéristiques du four de métal chaud	2
1.3 Les phénomènes physiques rencontrés	4
1.4 Le couplage PHOENICS-ZONE	6
2. COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 1.0	9
2.1 Description du couplage	9
2.1.1 Le logiciel PHOENICS	9
2.1.2 La méthode de zones	11
2.1.3 Le couplage	16
2.1.4 Maillage et axes de référence	18
2.2 Description des cas simulés	19
2.3 Résultats	22
2.3.1 Comparaison entre écoulement chaud et froid	24
2.3.2 Comparaison entre méthode de flux et méthode de zones	30
2.3.3 Simulation du four de métal chaud	36
2.4 Discussion	47
3. COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 2.0	50
3.1 Description du couplage	50

3.2	Description des cas simulés	53
3.3	Résultats	55
3.3.1	Comparaison entre versions 1.0 et 2.0 du couplage PHOENICS-ZONE	56
3.3.2	Simulation du four de métal chaud sans et avec effet gravitationnel	59
3.3.2.1	Sans effet gravitationnel	59
3.3.2.2	Avec effet gravitationnel	68
3.3.3	Simulation du four de métal chaud avec exfiltration ou infiltration	78
3.3.3.1	Avec exfiltration	82
3.3.3.2	Avec infiltration	88
3.4	Discussion	100
4.	CONCLUSION	102
	BIBLIOGRAPHIE	104
ANNEXE I:	Validation des mécanismes de fonctionnement du modèle couplé PHOENICS-ZONE	106
ANNEXE 2:	Guide d'utilisation du modèle couplé PHOENICS-ZONE	123
A2.1	Les fichiers de données	124
A2.2	Construction du fichier Q1.DAT	125
A2.3	Construction du fichier DATA10.DAT	127
A2.4	Construction du fichier ZONE.DAT	127
A2.5	Exécution du modèle couplé PHOENICS-ZONE	138
A2.6	Le temps de calcul	140
ANNEXE 3:	Listage des sous-programmes de transfert entre PHOENICS et ZONE	141
ANNEXE 4:	Résultats numériques partiels de la méthode de zones appliquée au cas 1	154

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Schéma simplifié d'un four de métal chaud	3
Figure 2.1:	Schéma de fonctionnement du couplage PHOENICS-ZONE version 1.0	17
Figure 2.2:	Maillages et axes de référence	20
Figure 2.3:	Cas 1. Écoulement froid	25
Figure 2.4:	Cas 2. Écoulement chaud	27
Figure 2.5:	Cas 6. Maillage PHOENICS et position des entrées et sorties	40
Figure 2.6:	Cas 6. Vecteurs vitesse le long des parois verticales et au centre de la chambre	41
Figure 2.7:	Cas 6. Vecteurs vitesse au-dessus du métal liquide ...	42
Figure 2.8:	Cas 6. Vecteurs vitesse au niveau du brûleur	43
Figure 2.9:	Cas 6. Contours de pression au niveau du brûleur	44
Figure 2.10:	Cas 6. Contours de température au niveau du brûleur ..	45
Figure 3.1	Schéma de fonctionnement du couplage PHOENICS-ZONE version 2.0	51
Figure 3.2	Cas 7. Isothermes dans le plan $Z = 2$	57
Figure 3.3:	Cas 8. Vecteurs vitesse: plans verticaux, sans force de corps	62
Figure 3.4:	Cas 8. Vecteurs vitesse: plan horizontal passant par le brûleur, sans force de corps	63
Figure 3.5:	Cas 8. Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, sans force de corps	64
Figure 3.6:	Cas 8. Vecteurs vitesse: plan vertical passant par le brûleur, sans force de corps	65
Figure 3.7:	Cas 8. Isothermes: plan vertical passant par le brûleur, sans force de corps	66
Figure 3.8	Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, obtenus avec FLUENT et modèle de réaction chimique ...	69

Figure 3.9:	Cas 9. Vecteurs vitesse: plans verticaux avec force de corps	70
Figure 3.10:	Cas 9. Vecteurs vitesse: plan horizontal passant par le brûleur avec force de corps	71
Figure 3.11:	Cas 9. Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, avec force de corps	72
Figure 3.12:	Cas 9. Vecteurs vitesse: plan vertical passant par le brûleur avec force de corps	73
Figure 3.13:	Cas 9. Isothermes: plan vertical passant par le brûleur, avec force de corps	74
Figure 3.14:	Position des orifices pour les cas 10 et 11	80
Figure 3.15:	Cas 10. Champ de pression au niveau du brûleur	83
Figure 3.16:	Cas 10. Vecteurs vitesse au niveau du brûleur	84
Figure 3.17:	Cas 10. Champ de température au niveau du brûleur	85
Figure 3.18:	Cas 10. Contours de vitesse verticale W_1 à la surface nord de la chambre	86
Figure 3.19:	Cas 11. Champ de pression au niveau du brûleur	90
Figure 3.20:	Cas 11. Champ de pression à la surface de la paroi nord	91
Figure 3.21:	Cas 11. Vecteurs vitesse au niveau du brûleur	92
Figure 3.22:	Cas 11. Champ de température au niveau du brûleur	94
Figure 3.23:	Cas 11. Champ de température au niveau des siphons ...	96
Figure 3.24:	Cas 11. Champ de température à la paroi nord de la chambre	97
Figure 3.25:	Cas 11. Champ de température au niveau du bec de coulée	98
Figure A1.1:	Maillage utilisé et distribution supposée de l'énergie de combustion pour la validation	109
Figure A1.2:	Distribution de vitesse supposée pour la validation	109
Figure A2.1:	Schéma de fonctionnement du modèle couplé PHOENICS-ZONE lors de l'exécution	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:	Liste des simulations résolues par couplage PHOENICS-ZONE version 1.0	23
Tableau 2:	Comparaison entre les températures (en degrés K) obtenues avec écoulement froid (cas 1) et chaud (cas 2)	28
Tableau 3:	Comparaison entre les flux radiatifs (kW) pour un écoulement froid (cas 1) et chaud (cas 2)	29
Tableau 4:	Comparaison entre les températures (K) obtenues par la méthode de flux (cas 3) et la méthode de zones à 36 (cas 1), 72 (cas 4) et 144 éléments (cas 5)	33
Tableau 5:	Flux de chaleur et différences de température entre méthode de flux et méthode de zones	34
Tableau 6:	Principales caractéristiques du cas 6	37
Tableau 7:	Distribution des températures (K): cas 6	46
Tableau 8:	Flux de chaleur (kW): cas 6	48
Tableau 9:	Liste des simulations résolues par couplage PHOENICS-ZONE version 2.0	54
Tableau 10:	Distribution des températures (K): cas 7	58
Tableau 11:	Flux de chaleur et différences de température entre le cas 7 et les cas 1, 3, 4 et 5	60
Tableau 12:	Flux de chaleur (kW) pour les cas 8 et 9	76
Tableau 13:	Bilan massique du cas 10	87
Tableau 14:	Flux de chaleur (kW) pour le cas 10	89
Tableau 15:	Bilan massique du cas 11	93
Tableau 16:	Flux de chaleur (kW) pour le cas 11	99
Tableau 17:	Principales caractéristiques du cas particulier utilisé pour la validation	108
Tableau 18:	Flux de chaleur et températures obtenues par application directe de la méthode de zones	111

Tableau 19:	Flux de chaleur et températures obtenues par PHOENICS-ZONE version 1.0	112
Tableau 20:	Flux de chaleur et températures obtenues par PHOENICS-ZONE version 2.0	113

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Ce mémoire a pour but de présenter les développements et les résultats obtenus lors du couplage du logiciel PHOENICS avec la méthode de zones pour modéliser le transfert de chaleur dans des fournaies industrielles. Il s'inscrit dans un objectif global de recherche qui consiste à produire un modèle mathématique du four de métal chaud utilisé dans l'industrie de l'aluminium.

1.1 LE FOUR DE MÉTAL CHAUD

Le four de métal chaud agit comme une sorte de tampon entre la cuve d'électrolyse et la table de coulée. Dépendant de leur utilisation, on distingue généralement trois types de fours:

a) Le four de maintien (réservoir)

Il reçoit sa charge directement des salles de cuves par l'intermédiaire de creusets et, comme son nom l'indique, il ''maintient'' la température du métal liquide pour ensuite le distribuer aux fours de coulée en fonction des besoins.

b) Le four de coulée

La majeure partie de sa charge provient du four de maintien ou encore directement des salles de cuves. L'autre partie de sa charge (0 à 20%) peut être constituée de métal solide et froid (résidus de sciage, lingots rejetés etc.) qui sont ainsi récupérés. C'est là que l'on prépare l'alliage en fonction des spécifications du client et que l'on s'assure qu'il atteint la température idéale pour la coulée. Le métal chaud est ensuite acheminé par un système de dalots jusqu'à la table de coulée.

c) Le four de fonte

Sa charge est totalement ou majoritairement constituée de métal solide (de première fusion ou recyclé) que l'on refond et recoule en fonction des besoins.

1.2 LES CARACTÉRISTIQUES DU FOUR DE MÉTAL CHAUD

Les trois types de four mentionnés précédemment peuvent être de conception fort différente. Leur capacité varie, leur forme aussi (parallélépipède ou cylindre). Le nombre et le type de brûleur, le combustible utilisé sont autant de variables dont il faut tenir compte. Cependant, certaines caractéristiques sont communes à tous ces fours.

On peut retrouver à la figure 1.1 un schéma simplifié représentatif d'un four de métal chaud. On note trois parties principales: la chambre de combustion avec son brûleur, la charge utile constituée de métal liquide ou solide et le système d'évacuation des gaz de combustion.

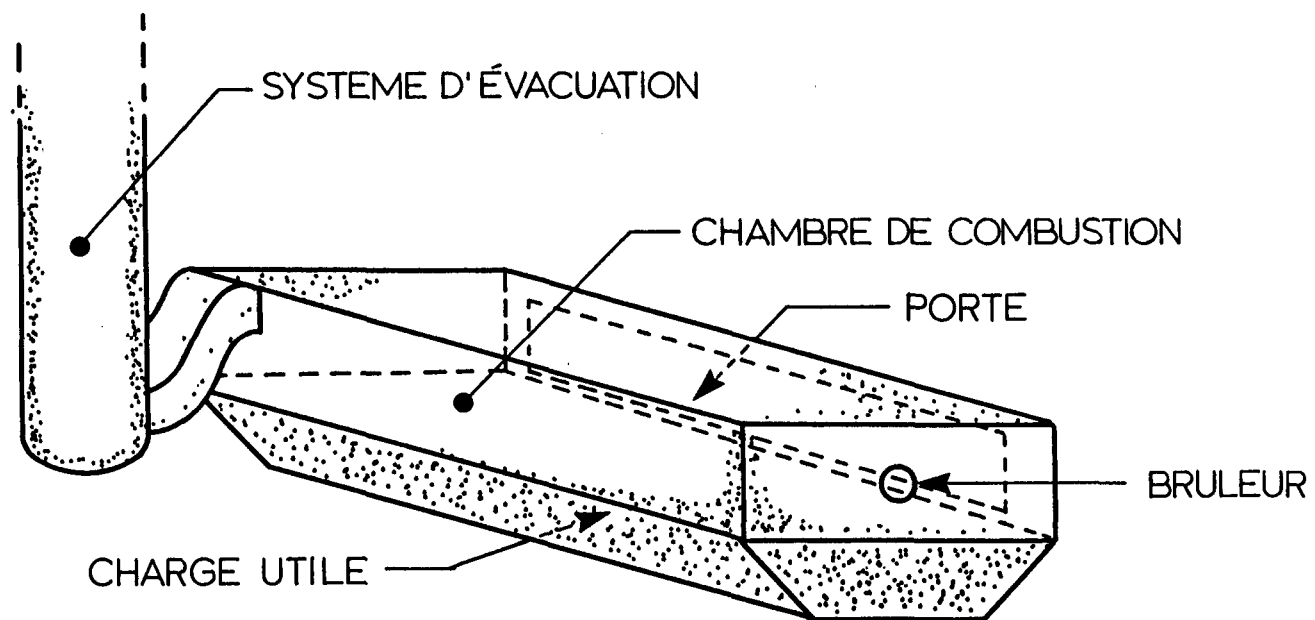


Figure 1.1: Schéma simplifié d'un four de métal chaud

La charge utile représente l'élément principal du four. Elle doit répondre à des normes strictes de composition chimique et de température.

La chambre de combustion a pour rôle unique mais essentiel de fournir à la charge utile l'énergie nécessaire pour maintenir ou hausser la température du métal tout au long de la fournée suivant un profil cible. Son fonctionnement est donc assujetti à l'état de la masse métallique.

Le système d'évacuation des gaz de combustion est généralement doté d'un registre qui permet de régler la pression interne dans la chambre de combustion et de l'ajuster en fonction des étapes de la fournée (chauffage, brassage, fluxage, écumage etc.). De plus amples renseignements sur ces étapes peuvent être trouvées dans Holdner et Tremblay (1982) ou Perron (1987).

1.3 LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES RENCONTRÉS

Plusieurs phénomènes physiques se produisent à l'intérieur d'un four de métal chaud. Mentionnons les principaux:

Pour la charge utile:

- conduction thermique
- convection forcée causée par le brassage
- changement de phase (solide → liquide)

- convection naturelle à l'intérieur de la masse liquide
- oxydation de la surface au contact des gaz et production d'écume
- dispersion des éléments d'alliage et des inclusions
- pertes thermiques à l'environnement

Pour la chambre de combustion:

- transfert de quantité de mouvement (convection naturelle et forcée)
- turbulence
- transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement)
- réaction chimique et génération de chaleur
- infiltration d'air ambiant ou exfiltration
- pertes thermiques à l'environnement

Tous ces phénomènes sont essentiellement de nature dynamique et tridimensionnelle. On peut facilement s'apercevoir de la complexité d'un modèle mathématique général qui se voudrait représentatif de cette réalité.

Plusieurs études de modélisation globale ou partielle ont déjà été effectuées. Mentionnons pour le métal liquide les travaux de Tremblay (1986), Ouellet (1987), Perron (1987) et pour la chambre de combustion ceux de Perron (1987) et Kocaeft et al. (1987). Aucune étude cependant ne traite le transfert de chaleur radiatif dans la chambre de combustion par un modèle tridimensionnel où les distributions de vitesse seraient

non plus estimées comme dans les travaux de Kocaeffe (1987) mais bien évaluées par la résolution des équations de Navier-Stokes relatives à l'écoulement fluide.

C'est pourquoi il a été décidé de coupler les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement avec un modèle radiatif capable de représenter aussi fidèlement que possible le phénomène de rayonnement dans la chambre de combustion d'un four de métal chaud.

1.4 LE COUPLAGE PHOENICS-ZONE

Le logiciel PHOENICS (Parabolic, Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series) a été choisi pour résoudre l'écoulement fluide. Sa structure permet à l'utilisateur d'inclure sous forme de routine en langage FORTRAN ses propres modèles ou sous-modèles (turbulence, réaction chimique, rayonnement etc.) pour construire un ensemble à la fois performant et bien adapté aux particularités des phénomènes physiques rencontrés.

PHOENICS représente donc une base idéale de travail où viendront se greffer les différents sous-modèles choisis ou construits par l'utilisateur. Rosten et Spalding (1986) donnent une description détaillée des champs d'application et des mécanismes de fonctionnement de PHOENICS.

Pour la résolution du transfert thermique radiatif le choix est plus difficile. Trois principales écoles de pensée s'affrontent.

La méthode de flux, sous forme différentielle, se prête bien au traitement numérique (Siddall, 1974 et Gosman et Lockwood, 1972). Elle ne représente cependant qu'une approximation des équations exactes qui régissent le transfert radiatif, le rayonnement étant traité comme un phénomène local.

La méthode de Monte-Carlo est une approche statistique basée sur la génération et la propagation aléatoires de faisceaux d'énergie. Sa précision dépend du nombre de faisceaux générés et le temps de calcul peut facilement devenir prohibitif.

La méthode de zone (Hottel et Cohen, 1958, Hottel et Sarofim, 1967, Kocaeffe, 1983) est considérée par plusieurs comme la plus rigoureuse et la plus classique. L'enceinte est divisée en un certain nombre de zones où les températures sont évaluées par un bilan énergétique incluant le rayonnement entre la zone considérée et les autres zones. Malheureusement cette méthode nécessite le calcul détaillé des aires d'échange dirigé entre les volumes ou les surfaces considérées, d'où un temps de calcul d'autant plus élevé qu'il y aura de zones dans l'enceinte. Le maillage choisi est donc, en général, assez grossier.

Malgré ces quelques contraintes la méthode de zones, telle que développée par Kocaeffe (1983) a été choisie pour être couplée avec PHOENICS.

Deux versions du couplage PHOENICS-ZONE ont été élaborées. Leur construction et les résultats obtenus sont présentés respectivement aux chapitre II et III.

Il est essentiel de noter que le couplage PHOENICS-ZONE ne représente qu'une partie du modèle global d'un four de métal chaud. Il ne s'applique que dans la chambre de combustion, la surface du métal liquide tenant lieu de frontière rigide, sans glissement et à température constante.

CHAPITRE II

COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 1.0

Ce chapitre du mémoire met l'accent sur une première version du couplage PHOENICS-ZONE. On y traite des entités que sont PHOENICS et ZONE, de la ''plomberie'' nécessaire à leur interconnexion, des différents cas simulés et des résultats obtenus.

2.1 DESCRIPTION DU COUPLAGE

2.1.1 Le logiciel PHOENICS

PHOENICS est un ensemble de programmes et sous-programmes développé au Royaume Uni par la compagnie CHAM Ltd à la fin des années 1970. Il est utilisé pour simuler les écoulements fluides, le transfert de chaleur, les réactions chimiques et phénomènes connexes en une, deux ou trois dimensions, en régime transitoire ou permanent. Pour effectuer le calcul numérique, la discrétisation se fait en divisant le domaine en un ensemble de surfaces ou volumes de contrôle finis pour lesquels on détermine la valeur de chacune des variables (pression, température, concentration, vitesses etc.) en résolvant l'équation de conservation généralisée:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_i \rho_i \phi_i) + \nabla \cdot (r_i \rho_i \mathbf{v}_i \phi_i - \Gamma_{\phi_i} r_i \nabla \phi_i) = r_i S_{\phi_i}$$

- où $\frac{\partial}{\partial t}$ = opérateur différentiel par rapport au temps
- $\nabla \cdot$ = opérateur divergence
- ∇ = opérateur gradient
- r_i = fraction volumique de la phase i
- ρ_i = densité de la phase i
- ϕ_i = variable considérée de la phase i
(vitesse, concentration, enthalpie etc.)
- v_i = vitesse de la phase i
- Γ_{ϕ_i} = coefficient d'échange relié à ϕ_i
- S_{ϕ_i} = source de ϕ par unité de volume de la phase i

PHOENICS approche la solution exacte des équations différentielles décrivant la physique du phénomène (turbulence, transfert de chaleur, conservation du momentum etc.) par un processus itératif qui consiste à corriger chacune des variables calculées jusqu'à ce que les distributions obtenues vérifient les équations de base avec un degré d'erreur acceptable. La mesure de cette correction est donnée par la valeur des résidus, pour chacune des variables, à chaque itération. Plus les résidus sont faibles, plus la solution calculée est proche de la solution exacte.

PHOENICS permet à l'utilisateur de choisir parmi différents sous-programmes celui qui représente le mieux la physique du phénomène.

Plusieurs sous-modèles de turbulence sont proposés, d'autres sont adaptés à certains types de réaction chimique, d'autres encore s'occupent des particularités reliées à des cas d'application bien spécifiques (Edwards et Rosten, 1986).

L'utilisateur peut construire ses propres modèles sous forme de sous-programmes en langage FORTRAN et les joindre à PHOENICS pour en faire un outil versatile et performant capable de s'adapter aux besoins de chacun, ce qui représente un avantage indéniable sur ses concurrents particulièrement lorsqu'on veut lui adjoindre un modèle radiatif de transfert de chaleur par la méthode de zones.

PHOENICS dispose de son propre langage de programmation appelé PIL (PHOENICS INPUT LANGUAGE) qui permet de définir les données d'une simulation dans un fichier de contrôle.

L'annexe 1 donne un exemple d'un tel fichier.

Le lecteur intéressé peut consulter Rosten et Spalding (1986) pour de plus amples renseignements sur les mécanismes de fonctionnement de PHOENICS.

2.1.2 La méthode de zones

La méthode de zones, pour décrire le transfert de chaleur par radiation, a été développée à la fin des années 1950 par Hottel et Cohen

(1958). Cette méthode est généralement reconnue comme étant la plus précise et la plus rigoureuse pour représenter l'échange de chaleur par rayonnement dans une enceinte de fournaise.

La méthode consiste à subdiviser l'enceinte en un nombre fini d'éléments de surface ou de volume et d'établir un bilan énergétique (incluant le transfert radiatif) qui permet de déduire les températures et flux de chaleur propres à chaque zone (Hottel et Sarofim, 1967).

Pour un élément de volume i on a l'équation suivante:

$$\sum_j \overrightarrow{G_j G_i} E_{g,j} + \sum_j \overrightarrow{S_j G_i} E_{s,j} - \sum_n 4a_{g,n} K_n V_i E_{g,i} + \dot{Q}_{e,i} = \dot{Q}_{u,g_i} - \dot{Q}_{c,i}$$

où

$\overrightarrow{G_j G_i}$ = aire d'échange dirigé entre les éléments de volume j et i .

$E_{g,j} = \sigma T_{g,j}^4$ où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et $T_{g,j}$ est la température du gaz contenu dans l'élément de volume j .

$\overrightarrow{S_j G_i}$ = aire d'échange dirigé entre l'élément de surface j et l'élément de volume i .

$E_{s,j} = \sigma T_{s,j}^4$ ou $T_{s,j}$ est la température de l'élément de surface j .

$a_{g,n}$ = coefficient de pondération du $n^{\text{ième}}$ gaz gris.

K_n = coefficient d'atténuation du $n^{\text{ième}}$ gaz gris.

V_i = volume de l'élément i .

$E_{g,i} = \sigma T_{g,i}^4$ où $T_{g,i}$ est la température du gaz contenu dans l'élément i .

$\dot{Q}_{e,i}$ = diminution de l'enthalpie sensible du gaz circulant à travers la zone i et convection à partir de toute surface contiguë.

$\dot{Q}_{c,i}$ = énergie de combustion libérée dans l'élément de volume i .

\dot{Q}_{u,g_i} = terme transitoire, accumulation dans la zone i en fonction du temps.

Pour un élément de surface i on a l'équation

$$\sum_j \vec{S}_j \vec{S}_i E_{s,j} + \sum_j \vec{G}_j \vec{S}_i E_{g,j} - A_i \epsilon_i E_{s,i} + h_i A_i (T_{g,k} - T_{s,i}) = \dot{Q}_{i_{net}}$$

où

$\vec{S}_j \vec{S}_i$ = aire d'échange dirigé entre les éléments de surface j et i .

$E_{s,j} = \sigma T_{s,j}^4$ où $T_{s,j}$ est la température de la surface j .

$\vec{G}_j \vec{S}_i$ = aire d'échange dirigé entre l'élément de volume j et l'élément de surface i .

$E_{g,j} = \sigma T_{g,j}^4$ où $T_{g,j}$ est la température de l'élément de volume j .

A_i = surface de l'élément i .

ϵ_i = émissivité de l'élément i .

$E_{s,i} = \sigma T_{s,i}^4$ où $T_{s,i}$ est la température de la surface i .

h_i = coefficient de transfert de chaleur par convection entre la surface i et l'élément de volume adjacent.

$T_{g,k}$ = température de l'élément de volume adjacent.

$\dot{Q}_{i,net}$ = flux de chaleur extrait de l'élément i avec un terme transitoire s'il y a lieu.

Cette méthode nécessite la détermination des aires d'échange entre les paires d'éléments, processus d'autant plus long qu'il y aura de zones dans l'enceinte.

Dans sa thèse de maîtrise Kocaefe (1983) présente une version sophistiquée de la méthode de zones. On y retrouve un calcul détaillé des aires d'échange dirigé par la méthode de Monte-Carlo qui consiste à générer aléatoirement pour chaque élément à l'intérieur de l'enceinte un très grand nombre de faisceaux d'énergie qui seront absorbés, réfléchis ou réémis en fonction de leur cheminement à l'intérieur de la chambre. On détermine alors statistiquement les aires d'échange.

Cette version de la méthode de zones permet aussi de choisir différents types de modèles pour traiter les gaz de combustion: le modèle d'Hottel et Sarofim (gaz réel), le modèle à un gaz gris, le modèle de Smith (1982). De même on peut simuler la présence de particules solides dans le gaz sous forme dispersée (comme les cendres) ou non dispersée (comme la suie).

Les températures aux frontières de l'enceinte sont imposées ou encore déterminées par un bilan énergétique qui tient compte des pertes

atmosphériques. Les concentrations des espèces chimiques (uniformes ou non) permettent de calculer les facteurs d'absorption et d'émission.

Dans la version originale de Kocaeffe, la distribution de l'écoulement fluide est supposée par l'utilisateur en se basant sur des résultats expérimentaux ou des relations empiriques.

Plutôt que de supposer une distribution d'écoulement tel que pratiqué à l'heure actuelle, le couplage PHOENICS-ZONE permettra de calculer les champs de vitesse et de les utiliser comme entrées pour l'application de la méthode de zones. Il devrait en résulter une meilleure définition et une précision accrue des résultats.

Quelques tentatives ont déjà été réalisées pour coupler la méthode de zones avec les équations de mouvement pour des applications très spécifiques (Steward et Tennankore, 1979, Steward et Kocaeffe, 1982). Cependant, à notre connaissance, jamais un logiciel aussi puissant et général que PHOENICS n'a été utilisé dans un tel couplage.

Pour de plus amples renseignements sur les mécanismes de fonctionnement de la méthode de zones, le lecteur intéressé peut consulter Kocaeffe (1983 et 1987) ou Hottel et Sarofim (1967).

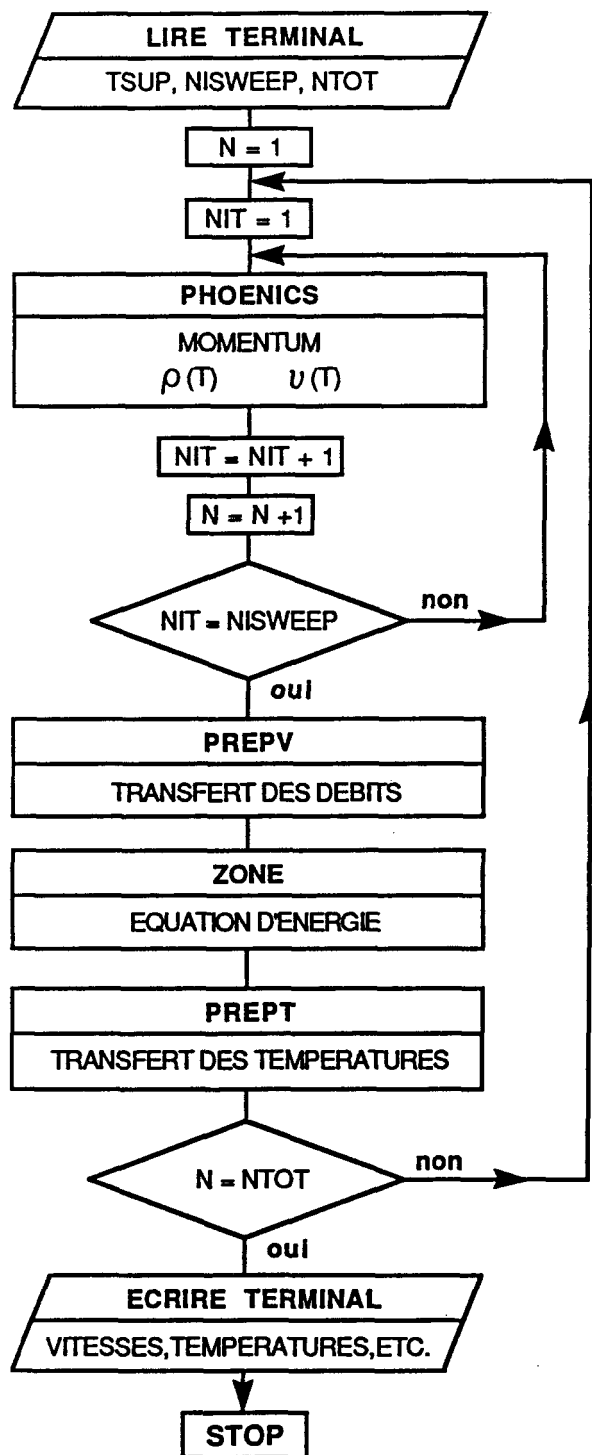
2.1.3 Le couplage

Cette section présente une première version du couplage PHOENICS-ZONE. On peut trouver à la figure 2.1 le schéma explicatif décrivant le fonctionnement du programme ainsi conçu.

Dû à la nature itérative du processus de convergence de PHOENICS, on commence par supposer une température initiale à l'intérieur de la chambre de combustion. A cette température correspondent une densité et une viscosité qui sont utilisées pour exécuter NISWEEP itérations de PHOENICS. A la fin de ces NISWEEP itérations, le champ de vitesse calculé par PHOENICS est injecté dans le sous-programme ZONE qui résout l'équation d'énergie et calcule les nouvelles températures qui, à leur tour, sont réintroduites dans PHOENICS pour recalculer pendant NISWEEP itérations un nouveau champ de vitesse et ainsi de suite jusqu'à convergence de la solution.

Pour cette première version, on remarque que l'équation d'énergie est entièrement résolue par le sous-programme ZONE, alors que PHOENICS s'occupe uniquement de l'équation de mouvement.

Le sous-programme PREPV sert d'interface entre PHOENICS et ZONE. Il a pour fonction de transformer les vitesses calculées par PHOENICS pour un maillage très fin en des débits massiques qui sont transférés au maillage plus grossier de ZONE.



DESCRIPTION	
TSUP	: TEMPERATURE INITIALE SUPPOSEE
NISWEEP	: NOMBRE D'ITERATIONS ENTRE CHAQUE APPEL DE ZONE
NTOT	: NOMBRE TOTAL D'ITERATIONS POUR LA SIMULATION
$\rho(T)$: DENSITE COMME FONCTION DE LA TEMPERATURE
$\nu(T)$: VISCOSITE COMME FONCTION DE LA TEMPERATURE

Figure 2.1: Schéma de fonctionnement du couplage PHOENICS-ZONE version 1.0

Le sous-programme PREPT a pour fonction de transférer les températures calculées par ZONE vers PHOENICS. La redistribution des températures se fait selon le principe suivant: toutes les mailles de PHOENICS contenues dans un élément donné de ZONE reçoivent la même température, celle de cet élément.

Pour faciliter le transfert d'information entre PHOENICS et ZONE, une restriction a été imposée sur leurs maillages respectifs: il faut que le nombre de divisions en X, Y et Z de PHOENICS soit un multiple du nombre de divisions en Y, Z ou X de ZONE ce qui a pour effet de faire coïncider exactement les frontières des éléments de ZONE avec les frontières des éléments de PHOENICS.

L'annexe 3 donne le listage des sous-programmes PREPV et PREPT. Les mécanismes du couplage ont été vérifiés en comparant les résultats avec ceux obtenus directement par application de la méthode de zones avec un écoulement supposé. L'annexe 1 donne une description détaillée du cas particulier utilisé pour la vérification. Les deux résultats sont pratiquement identiques et il semble que le couplage a été effectué correctement.

2.1.4 Maillage et axes de référence

Comme la méthode de zones nécessite un temps de calcul relativement élevé son maillage devra être, en général, plus grossier que celui de PHOENICS. Dans la version actuelle, telle que formulée par Kocaefer,

ZONE requiert un maillage cartésien et uniformément distribué (la distance entre chaque noeud dans une direction donnée doit être égale).

De plus, le système axial de référence de PHOENICS est différent de celui de ZONE ce qui a pour conséquence d'exiger une certaine précaution lors du passage de l'un à l'autre. On peut retrouver à la figure 2.2 les référentiels utilisés qu'il est essentiel de bien comprendre pour situer convenablement les résultats numériques donnés en annexe. A noter que les références ouest, est, nord, sud, bas, haut sont communes aux deux maillages.

2.2 DESCRIPTION DES CAS SIMULÉS

Dans cette section, on donne une brève description des six cas simulés avec la version 1.0 du couplage PHOENICS-ZONE en insistant sur leurs points communs et leurs particularités (voir tableau 1).

On peut résumer ainsi les points communs:

- a) La géométrie de la chambre de combustion est gardée constante: parallélépipède de longueur 10.75 m, largeur 3.75 m, hauteur 1.2 m.
- b) La vitesse du fluide est considérée nulle aux parois et à la surface du métal.
- c) L'écoulement est turbulent et résolu par le modèle $k-\epsilon$ tel que défini dans PHOENICS.

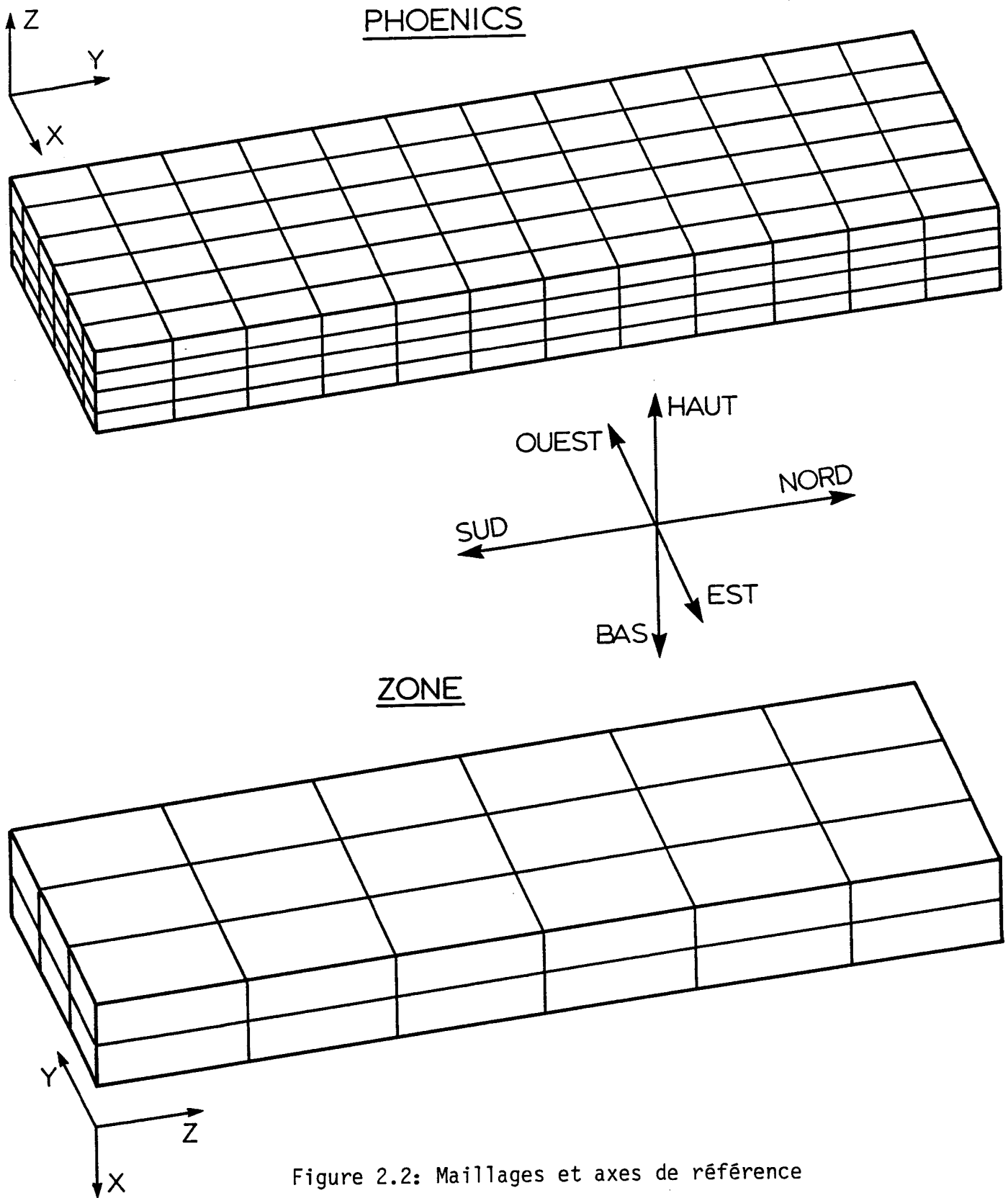


Figure 2.2: Maillages et axes de référence

- d) L'apport énergétique du combustible est de 4213 kW basé sur un débit de 450 m³/h (à TPN) de gaz naturel. Cette énergie est supposée répartie uniformément dans une zone allant de 0 à 7.16 m en longueur (les 2/3 de la chambre), de 1.25 à 2.50 m en largeur (le 1/3 de la largeur), et de 0 à 1.2 m en hauteur (toute la hauteur).
- e) Il n'y a pas de solide (cendre ou suie) dans les gaz de combustion. On utilise le modèle à un gaz gris avec un coefficient d'absorption de 0.175. La concentration des produits est supposée uniforme avec 8.9% de CO₂, 17.7% de H₂O, 1.3% de O₂ et 72.1% de N₂, en supposant une combustion complète du gaz naturel avec 7.3% d'excès d'air.
- f) La température d'entrée du mélange air-gaz est de 333 K et le débit massique se chiffre à 1.752 kg/s. La température de la surface du bain liquide est maintenue à 1033 K. Pour les cas 1 à 5, il n'y a pas de transfert convectif entre le gaz et la paroi où la température est fixée à 1223 K. Pour le cas 6, on tient compte du transfert de chaleur par convection entre le gaz et les surfaces internes et la température de paroi est déterminée par un coefficient de transfert de chaleur global qui tient compte des pertes atmosphériques et dont la valeur est tirée de Kocaefe (1987).

L'émissivité des parois (côtés et plafond) est de 0.6, celle du métal (plancher) est de 0.5.

Pour les cas 1 à 5, la section d'entrée des gaz est de 0.75 m² et la vitesse de 2.36 m/s. Pour le cas 6, la section est réduite à 0.125 m² et la vitesse passe à 14.16 m/s ce qui s'approche davantage de la réalité du four.

On peut retrouver au tableau 1, un résumé des caractéristiques propres à chaque simulation. Les propriétés constantes sont données par

$$\rho = 0.99 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 1.72 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$c_p = 1.1 \text{ kJ/kg K}$$

Pour les propriétés thermiques variables, la densité est donnée par la loi des gaz parfaits, la chaleur spécifique est évaluée par ZONE en tenant compte de la température et de la composition des gaz de combustion. La viscosité est déduite d'une approximation linéaire de la forme:

$$\nu(T) = 1.3714 \times 10^{-7} * T - 2.54 \times 10^{-5} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

avec T en kelvins

2.3 RÉSULTATS

Cette partie du mémoire donne les résultats obtenus pour chacun des 6 cas mentionnés précédemment. L'accent est mis sur une comparaison entre écoulement chaud et froid, une comparaison entre méthode de flux et méthode de zones pour terminer avec une simulation représentative d'un four de métal chaud tel qu'opéré à l'heure actuelle. Finalement,

TABLEAU 1

LISTE DES SIMULATIONS RÉSOLUES PAR
COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 1.0

CAS	MAILLAGE PHOENICS	MAILLAGE ZONE	PROPRIÉTÉS THERMIQUES	PARTICULARITÉS
1	6x12x4	2x3x6	ρ , v , c_p constantes	On simule un écoulement froid
2	6x12x4	2x3x6	ρ , v variables c_p constant	On simule un écoulement influencé par la température
3	6x12x4	---	ρ , v , c_p constantes	On solutionne le transfert radiatif par la méthode de flux
4	6x12x4	4x3x6	ρ , v , c_p constantes	On augmente la finesse du maillage de ZONE
5	6x12x4	4x6x6	ρ , v , c_p constantes	On augmente encore la finesse du maillage de ZONE
6	9x12x8	4x3x6	ρ , v , c_p variables	On approche l'écoulement réel dans la chambre de combustion

où ρ = densité
 v = viscosité
 c_p = chaleur spécifique

rappelons que toutes ces simulations sont réalisées en régime stationnaire.

2.3.1 Comparaison entre écoulement chaud et froid

L'intérêt de cette comparaison consiste à déterminer si un écoulement froid jumelé à une unique application de ZONE pour calculer les températures et flux radiatifs pourrait permettre d'approcher avec un degré de précision suffisant les résultats obtenus avec un écoulement chaud (dont les propriétés sont fonction de la température) après plusieurs applications successives de ZONE. En utilisant l'écoulement froid (indépendant de la température) le temps de calcul serait alors grandement réduit.

Le cas 1 où les propriétés ρ , ν et c_p sont constantes a donc permis d'établir les champs de vitesse correspondant à un écoulement froid. Lorsque ces champs ont finalement convergé la méthode de zones est appelée (une seule fois) pour calculer le champ de température correspondant. On peut trouver à la figure 2.3 la représentation vectorielle des vitesses dans le plan horizontal $Z = 2$ (référentiel PHOENICS) correspondant à la mi-hauteur de la chambre.

Le cas 2 où les propriétés ρ et ν sont fonctions de la température a permis d'établir les champs de vitesse correspondant à un écoulement chaud. Le sous-programme ZONE est appelé à intervalles réguliers (plusieurs fois) pour déterminer les températures auxquelles s'ajusteront

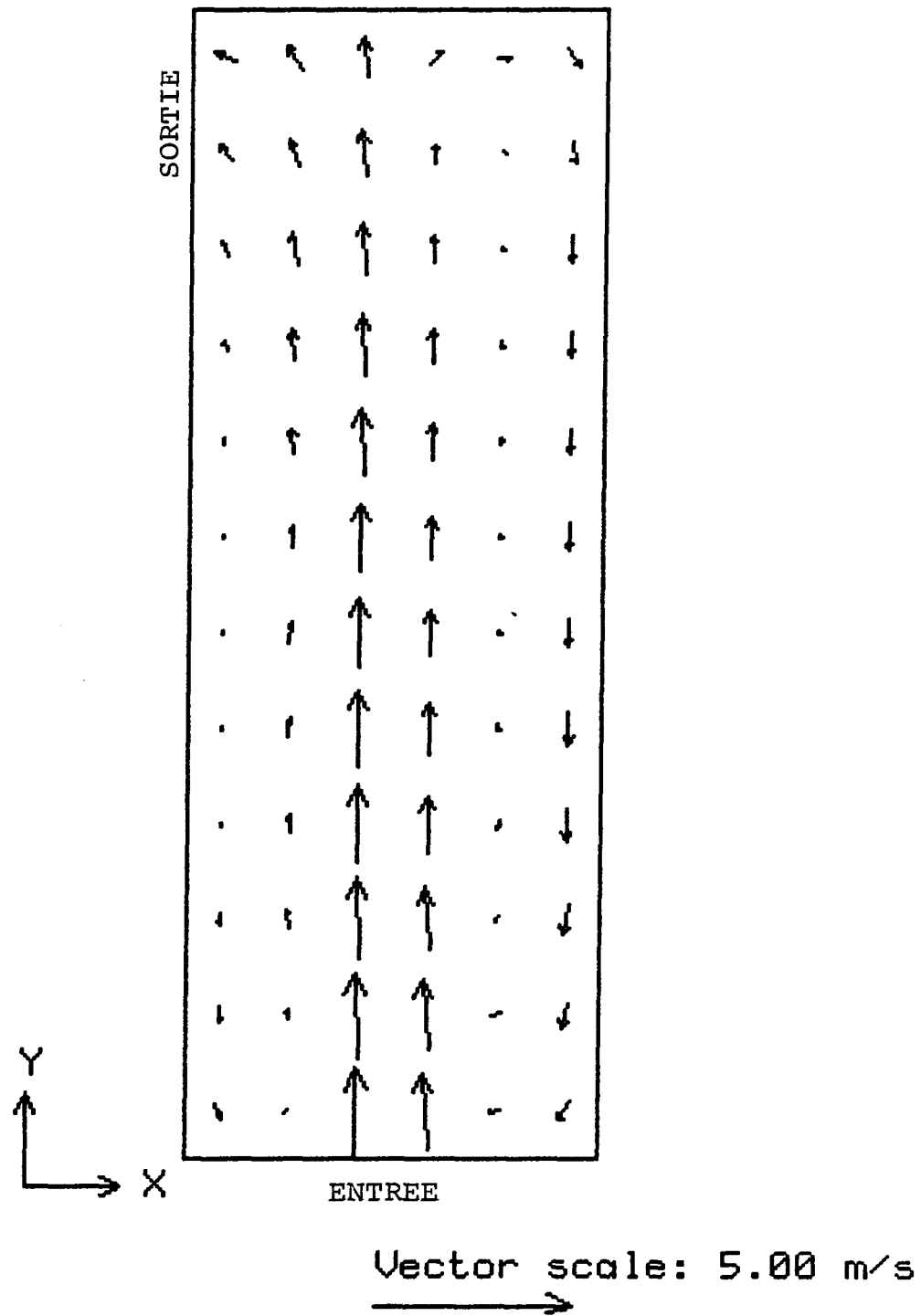


Figure 2.3: Cas 1. Écoulement froid

les vitesses. On retrouve à la figure 2.4 la représentation vectorielle des vitesses dans le plan $Z = 2$ pour cet écoulement chaud lorsque les résultats ont finalement convergé.

On remarque immédiatement que les patrons d'écoulement sont nettement différents entre les cas 1 et 2. Les vitesses sont plus élevées pour l'écoulement chaud surtout près des parois verticales. En effet, la densité moyenne de l'écoulement chaud est de 0.25 kg/m^3 comparativement à 0.99 kg/m^3 pour l'écoulement froid.

Il reste maintenant à comparer les champs de température calculés. On trouve au tableau 2, pour chacun des 36 éléments de ZONE, les températures obtenues. La différence moyenne de température pour l'ensemble des éléments est de 75.1 K . On peut retrouver au tableau 3 une comparaison entre les flux radiatifs à chaque paroi.

Une valeur négative de flux s'explique par le fait que l'énergie radiative reçue (à partir du gaz ou des autres parois) est inférieure à l'énergie radiative émise par la surface en question. Elle émet donc plus de radiations qu'elle n'en absorbe d'où un flux radiatif net orienté vers l'intérieur du four.

À la lumière des résultats donnés aux tableaux 2 et 3, il semble que la différence entre les deux champs de température soit significative. Cette différence approche même 200 degrés pour certains éléments.

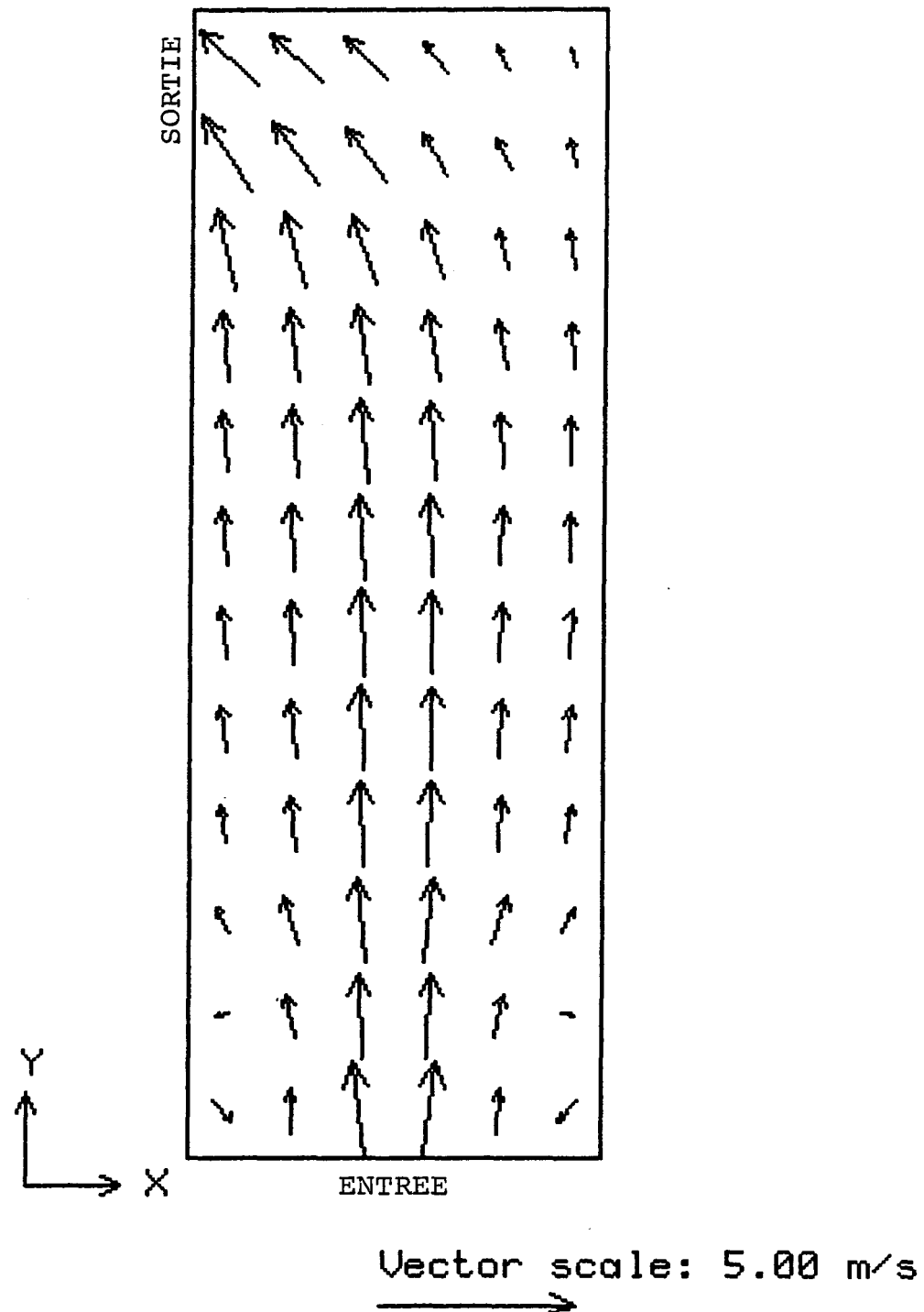


Figure 2.4: Cas 2. Écoulement chaud

TABLEAU 2

COMPARAISON ENTRE LES TEMPÉRATURES (EN DEGRÉS K)
OBTENUES AVEC ÉCOULEMENT FROID (CAS 1) ET CHAUD (CAS 2)

PLANCHER

1335 1284	1448 1320	1332 1226
1341 1309	1590 1488	1296 1258
1318 1323	1792 1902	1289 1286
1251 1289	1638 1829	1306 1276
1216 1224	1381 1536	1266 1222
1133 1078	1010 939	1230 1079

ENTRÉE

PLAFOND

SORTIE	1343 1281	1452 1286	1330 1227	← cas 1 ← cas 2
	1347 1311	1596 1454	1305 1259	
	1321 1319	1802 1899	1295 1282	
	1253 1291	1653 1850	1315 1278	
	1220 1257	1399 1581	1276 1253	
	1129 1110	1020 942	1239 1113	

ENTRÉE

TABLEAU 3

COMPARAISON ENTRE LES FLUX RADIATIFS (kW)
POUR UN ÉCOULEMENT FROID (CAS 1) ET CHAUD (CAS 2)

CAS	PLANCHER (métal)	PLAFOND	CÔTES (brûleur et opposé)	CÔTES (portes et opposé)	TOTAL
1	1764	338	5	159	2266
2	1835	429	-47*	166	2383
DIFFÉ- RENCE	71	91	52	7	117

* Un signe négatif représente un flux orienté
vers l'intérieur de la chambre de combustion

Un signe positif représente un flux orienté
vers l'extérieur de la chambre

Par contre les flux radiatifs totaux restent assez semblables, bien qu'ils diffèrent sensiblement au niveau du plafond et des côtés. Ces dernières valeurs étant très petites, elles n'ont pas d'influence majeure.

Il semble que l'approximation par un écoulement froid ne soit pas suffisamment précise pour donner des distributions de température pouvant être considérées comme représentatives d'un écoulement réel dont les propriétés sont fonctions de la température.

Il est donc recommandé d'utiliser l'écoulement chaud pour évaluer avec précision les distributions de température correspondantes.

À titre d'exemple, l'annexe 4 présente les résultats numériques partiels associés à la méthode de zones pour la simulation du cas 1. Les résultats complets avec champs de vitesse, pression, température, énergie de turbulence etc. sont trop volumineux pour être joints au mémoire.

2.3.2 Comparaison entre méthode de flux et méthode de zones

Cette comparaison, en plus d'avoir un intérêt académique certain, peut servir de validation à la méthode de zones et nous permettre de comparer les avantages et inconvénients de chaque formulation pour le cas étudié.

La méthode de flux consiste à remplacer les équations intégrales exactes du transfert radiatif par des équations différentielles approchées de la forme (Edwards, 1986):

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{a+s} \frac{d R_x}{dx} \right) = \left(a + \frac{2s}{3} \right) R_x - \frac{s}{3} (R_y + R_z) - a \sigma T^4$$

où R_x , R_y et R_z sont les flux radiatifs composés dans les directions x , y et z .

a = coefficient d'absorption des gaz

s = coefficient de dispersion

σ = constante de Stefan-Boltzmann

T = température du gaz

Le lecteur intéressé peut retrouver dans Gosman et Lockwood (1972) les principales étapes qui ont permis d'obtenir cette équation.

Ce type de formulation différentielle se prête bien au traitement numérique et deux des logiciels commerciaux les plus connus dans le domaine thermofluide (PHOENICS et FLUENT) ont opté pour la méthode de flux pour modéliser le transfert radiatif.

Edwards (1986) donne le listage de la méthode de flux utilisée par PHOENICS. Le cas 3 est résolu en utilisant cette technique. Le cas 1, traité précédemment, et les cas 4 et 5 sont résolus par la méthode de zones avec un maillage de plus en plus fin.

Comme tous ces quatre cas sont calculés avec un écoulement froid (ρ , ν , c_p constants) et indépendant de la température, les distributions de vitesse (voir figure 2.3) sont tout à fait identiques, à la quatrième décimale près, même si les distributions de température varient en fonction de la méthode ou du maillage. Rappelons que, pour la méthode de zones, le cas 1 a un maillage de 36 éléments, le cas 4, 72 éléments et le cas 5, 144 éléments. Quant au cas 3 et à la méthode de flux, son maillage est de 288 éléments.

On peut retrouver au tableau 4 les distributions de température calculées pour chacun des quatre cas et ramenées, par moyenne, au maillage le plus grossier de 36 éléments. Le tableau 5 donne les flux de chaleur totaux et les différences moyennes de température entre méthode de flux et méthode de zones avec les trois maillages utilisés.

On remarque que:

- a) Plus le maillage de zone est fin, plus les différences de température sont faibles entre méthode de flux et méthode de zones (tableau 5).
- b) Les pertes radiatives globales des quatre cas considérés sont presque identiques la différence maximale étant de 2.5% (tableau 5).

TABLEAU 4

COMPARAISON ENTRE LES TEMPÉRATURES (K) OBTENUES PAR LA
MÉTHODE DE FLUX (CAS 3) ET LA MÉTHODE DE ZONES A 36 (CAS 1),
72 (CAS 4) ET 144 ÉLÉMENTS (CAS 5)

PLANCHER			PLAFOND				
1327 1335 1328 1344	1401 1448 1425 1420	1292 1322 1312 1310	SORTIE	1329 1343 1330 1345	1401 1452 1428 1422	1292 1330 1318 1315	+ cas 3 + cas 1 + cas 4 + cas 5
1330 1341 1340 1337	1540 1591 1559 1553	1282 1286 1289 1287		1330 1348 1341 1340	1539 1596 1560 1554	1284 1305 1295 1294	
1310 1319 1317 1311	1707 1792 1748 1749	1292 1289 1279 1281		1312 1322 1331 1317	1708 1802 1753 1752	1295 1295 1287 1289	
1278 1251 1278 1275	1577 1639 1583 1583	1312 1306 1299 1313		1280 1254 1286 1282	1579 1654 1586 1587	1315 1315 1308 1324	
1258 1216 1267 1269	1338 1381 1341 1340	1267 1266 1268 1258		1267 1220 1283 1281	1342 1400 1347 1347	1270 1276 1276 1268	
1221 1134 1218 1227	998 1011 1050 1044	1227 1230 1234 1226		1236 1129 1243 1250	1023 1020 1068 1059	1230 1239 1241 1235	
ENTRÉE				ENTRÉE			

TABLEAU 5

FLUX DE CHALEUR ET DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE
ENTRE MÉTHODE DE FLUX ET MÉTHODE DE ZONES

CAS	FLUX DE CHALEUR (kW)	DIFF. DE TEMP. MAXIMALE (K)	DIFF. DE TEMP. MOYENNE (K)
Cas 3: Flux	2323	Référence	Référence
Cas 1: Zone 36 él.	2266	107	32.6
Cas 4: Zone 72 él.	2289	52	14.3
Cas 5: Zone 144 él.	2288	46	12.8

- c) La méthode de zone devrait être utilisée avec un maillage suffisamment fin (72 ou 144 éléments) pour que les résultats puissent être considérés indépendants du maillage.
- d) La méthode de flux, bien qu'approximative donne des résultats très comparables à ceux de la méthode de zones (144 éléments): différence maximale de température: 46 K, différence moyenne: 12.8 K, différence entre les pertes énergétiques globales: 1.5%.

Avant d'aller plus loin, il serait bon d'évaluer les avantages et inconvénients de chacune des deux méthodes.

La méthode de flux a l'indéniable avantage d'être déjà incorporée au logiciel par le fabricant (PHOENICS ou FLUENT). Sa formulation est très simple et moins de 200 lignes de FORTRAN sont nécessaires pour la programmer. De par sa nature, elle s'applique en chaque point de l'écoulement. Le temps de calcul associé à son utilisation est inférieur à celui de la méthode de zones.

Malheureusement, dans sa forme actuelle, elle nécessite l'utilisation d'une température connue et fixée à la frontière du volume pour fonctionner adéquatement (PHOENICS et FLUENT) ce qui rend difficile la simulation d'une chambre de combustion où les pertes atmosphériques seraient fixées et les températures déduites par un bilan énergétique à la paroi. Bien sûr, cette méthode pourrait être modifiée pour tenir compte de ce type de condition frontière.

Dans sa formulation actuelle, telle que développée par Kocaefe, la méthode de zone permet de considérer un coefficient global de transfert de chaleur à la paroi. Les différents modèles pour l'évaluation des coefficients d'absorption (gaz réel, gaz gris, Smith) permettent de mieux définir l'écoulement gazeux. De plus, il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une méthode rigoureuse, contrairement à la méthode de flux.

Malheureusement, la méthode de zones nécessite un temps de calcul relativement élevé surtout à cause du calcul des aires d'échange dirigé. Sa formulation est plus complexe que la méthode de flux (2000 lignes de FORTRAN) et elle a l'inconvénient majeur de nécessiter un maillage grossier pour fonctionner dans des temps de calcul raisonnables ce qui requiert beaucoup de précautions lors du jumelage de ce maillage grossier au maillage fin de l'écoulement fluide.

2.3.3 Simulation du four de métal chaud

Après avoir effectué les essais précédents, nous pouvons maintenant envisager une représentation plus réaliste du comportement de la chambre de combustion d'un four de métal chaud.

Le tableau 6 donne les principales caractéristiques de cette simulation.

TABLEAU 6

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU CAS 6

Dimensions de la chambre (Lx λ xh)	10.75m x 3.75m x 1.2m
Débit air + combustible à l'entrée	1.752 kg/s
Vitesse à l'entrée	14.16 m/s
Section d'entrée	0.125 m ²
Composition des produits de combustion (% volumique)	8.9% CO ₂ , 17.7% H ₂ O 1.3% O ₂ , 72.1% N ₂
Emissivité des réfractaires	0.6
du métal liquide	0.5
Température du mélange air-gaz à l'entrée	333 K
du métal liquide	1033 K
ambiante	298 K
Énergie globale de combustion	4213 kW
Coefficients de transfert de chaleur par convection	
paroi du brûleur et opposée	50 W/m ² K
autres parois et surface du métal	25 W/m ² K
Coefficients de transfert de chaleur globaux	
pour le plafond	1.37 W/m ² K
les portes	1.30 W/m ² K
la paroi opposée aux portes	0.86 W/m ² K
la paroi du brûleur et opposée	0.75 W/m ² K
Maillage PHOENICS	9x12x8
ZONE	4x3x6

Pour le cas 6, la section d'entrée du mélange air-gaz est réduite à 0.125 m^2 et la vitesse au brûleur est fixée à 14.16 m/s . Le maillage de PHOENICS a été porté à $9 \times 12 \times 8$ divisions soit 864 éléments. Le maillage utilisé par ZONE est de $4 \times 3 \times 6$ divisions soit 72 éléments ce qui semble suffisant d'après la section précédente pour obtenir une bonne représentation des champs de température. Les autres paramètres géométriques ou opérationnels sont tirés directement de Kocaefe (1987).

Rappelons que l'énergie de combustion est de 4213 kW et qu'elle est supposée répartie uniformément dans une zone s'étendant sur toute la hauteur du four, les deux tiers de la longueur et le tiers de la largeur.

Un coefficient de transfert de chaleur global allant de 0.75 à $1.37 \text{ W/m}^2\text{K}$ a été imposé à chacune des parois pour représenter les pertes à l'environnement. Il tient compte de la résistance thermique en conduction à travers la paroi et des résistances convectives et radiatives entre la face externe et l'environnement.

Un coefficient de transfert de chaleur (25 ou $50 \text{ W/m}^2\text{K}$) a également été appliqué sur chaque surface interne de la chambre pour tenir compte du transfert convectif entre le gaz et la surface.

La température du métal liquide a été fixée à 1033 K.

On néglige l'effet de la gravité terrestre et par conséquent la convection naturelle qui en découle. Les propriétés thermiques sont considérées variables et 300 itérations de PHOENICS ont permis d'atteindre la convergence. Le sous-programme ZONE est appelé à toutes les 50 itérations. La figure 2.5 donne le maillage PHOENICS utilisé et la position des entrées et sorties. À la figure 2.6 on peut retrouver les champs de vitesse verticaux le long des parois et au centre de la chambre. On note la présence de deux zones principales de recirculation. La figure 2.7 représente la distribution des vitesses dans le plan horizontal $Z = 1$, juste au-dessus du métal liquide. La figure 2.8 donne le champ de vitesse horizontal au niveau du brûleur. La figure 2.9, les dépressions au même endroit.

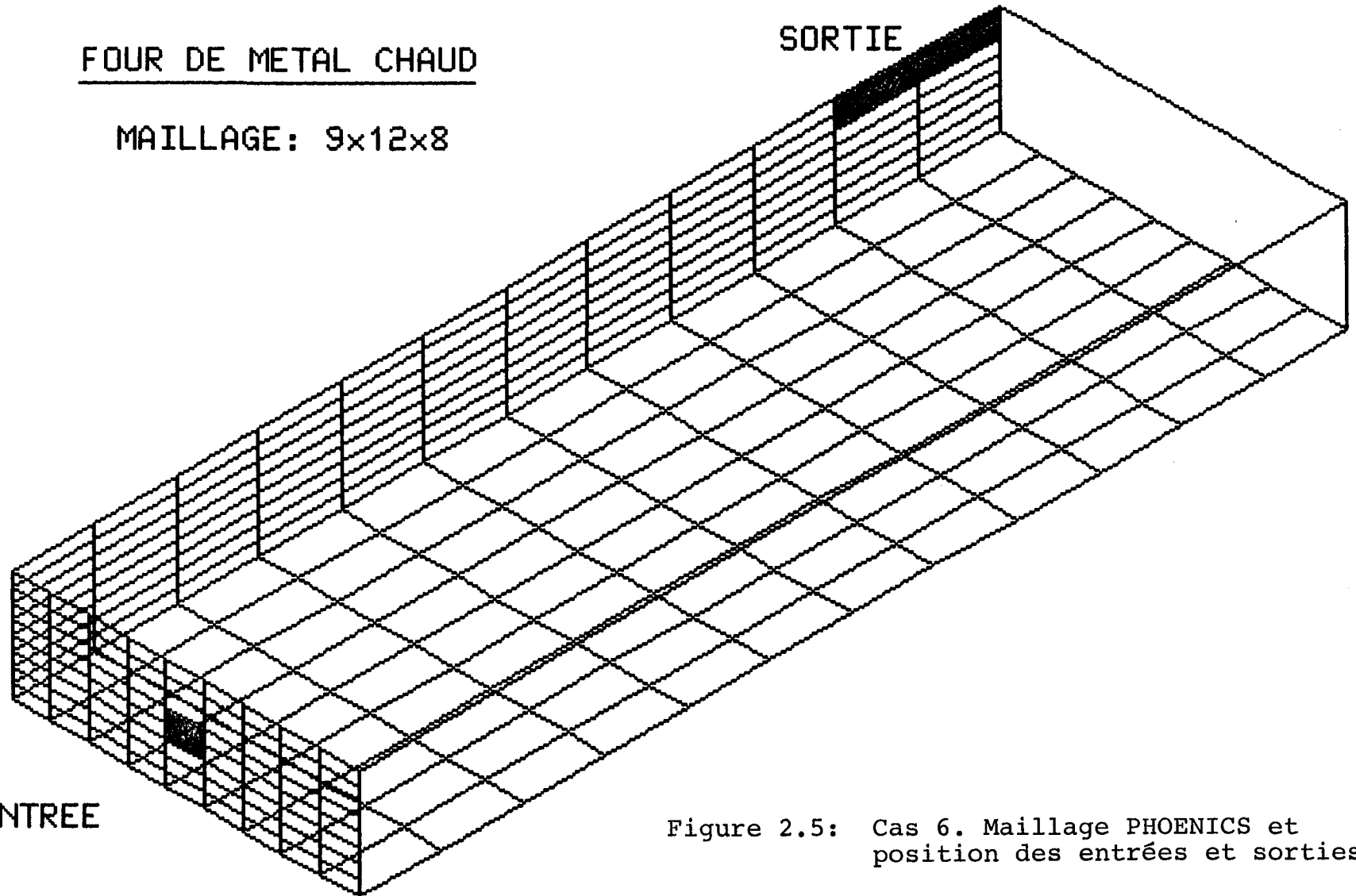
La représentation graphique des températures est plus problématique. En effet, les températures calculées à chaque élément de ZONE sont transférées dans PHOENICS de manière à ce que tous les éléments de PHOENICS inclus dans un élément de ZONE reçoivent une température identique, égale à la température de cet élément.

Par conséquent la représentation des températures par isothermes est déficiente et ressemble à un quadrillage grossier dont la maille est donnée par les éléments de ZONE (voir figure 2.10). Le tableau 7 donne les températures calculées pour les 72 éléments de ZONE et ramenées par moyenne à 36 éléments, ce qui nous permet de comparer avec les cas précédents.

FOUR DE METAL CHAUD

MAILLAGE: 9x12x8

SORTIE

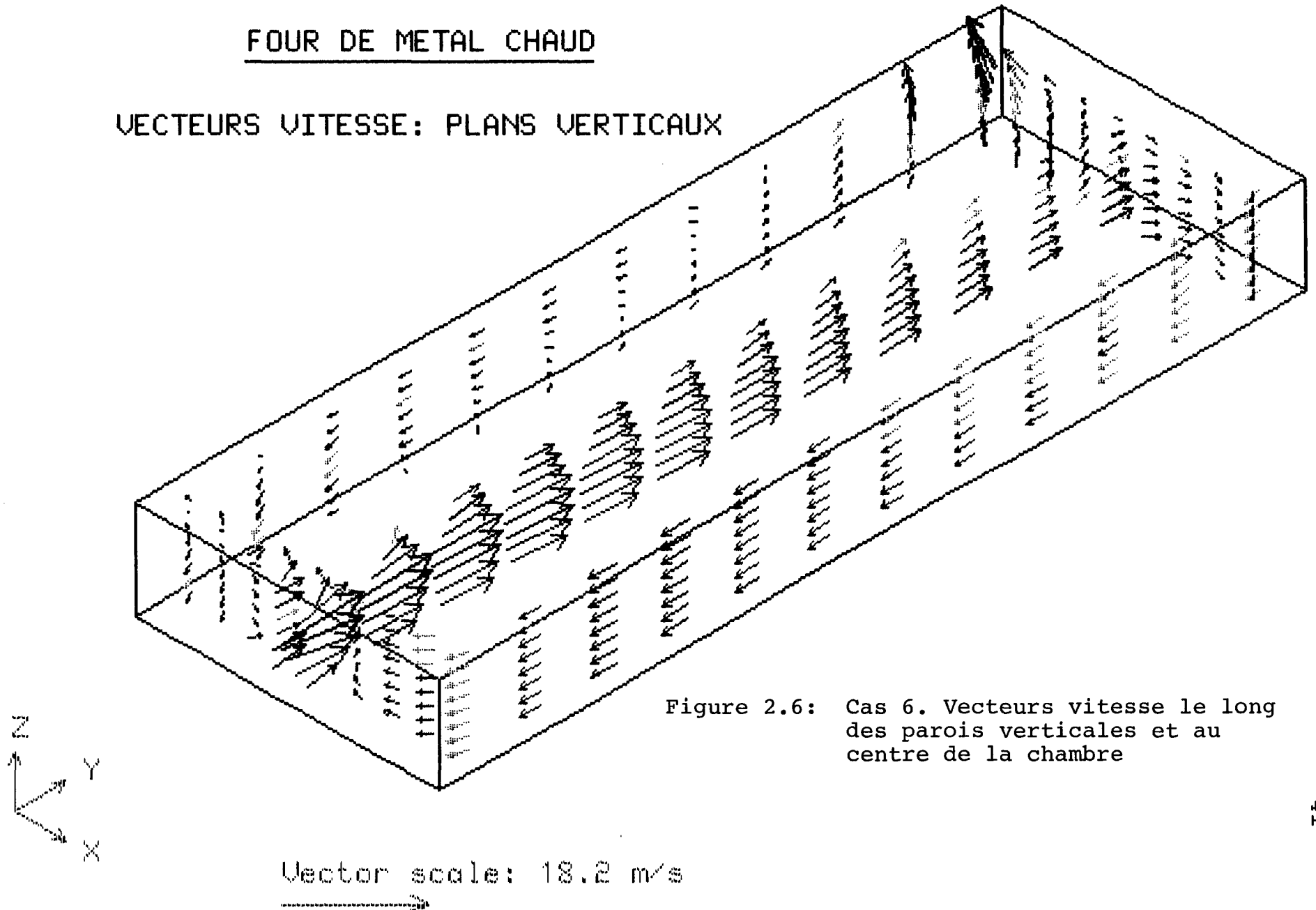


Z
ENTREE
Y
X

Figure 2.5: Cas 6. Maillage PHOENICS et position des entrées et sorties

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLANS VERTICAUX



FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN Z=1

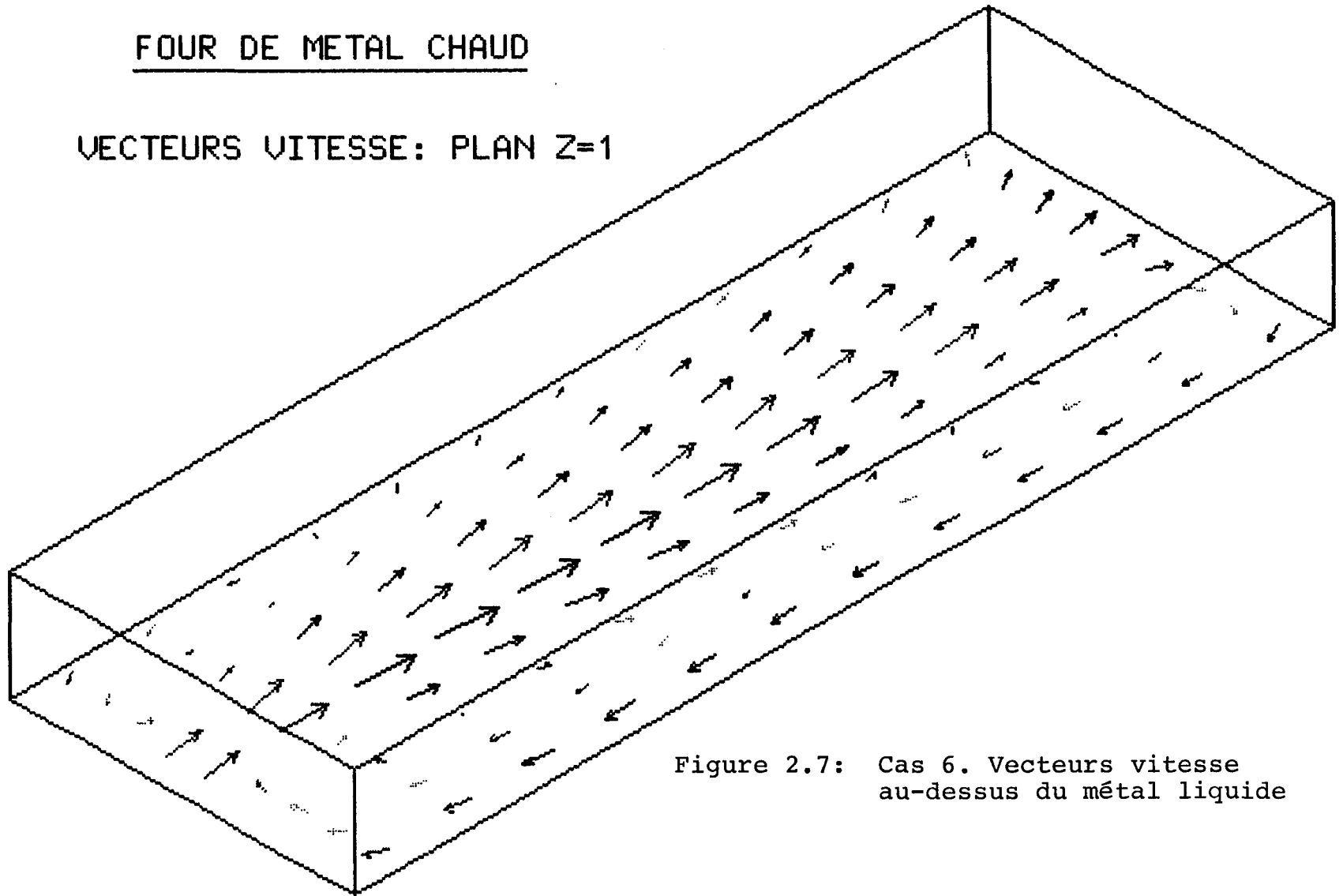


Figure 2.7: Cas 6. Vecteurs vitesse au-dessus du métal liquide



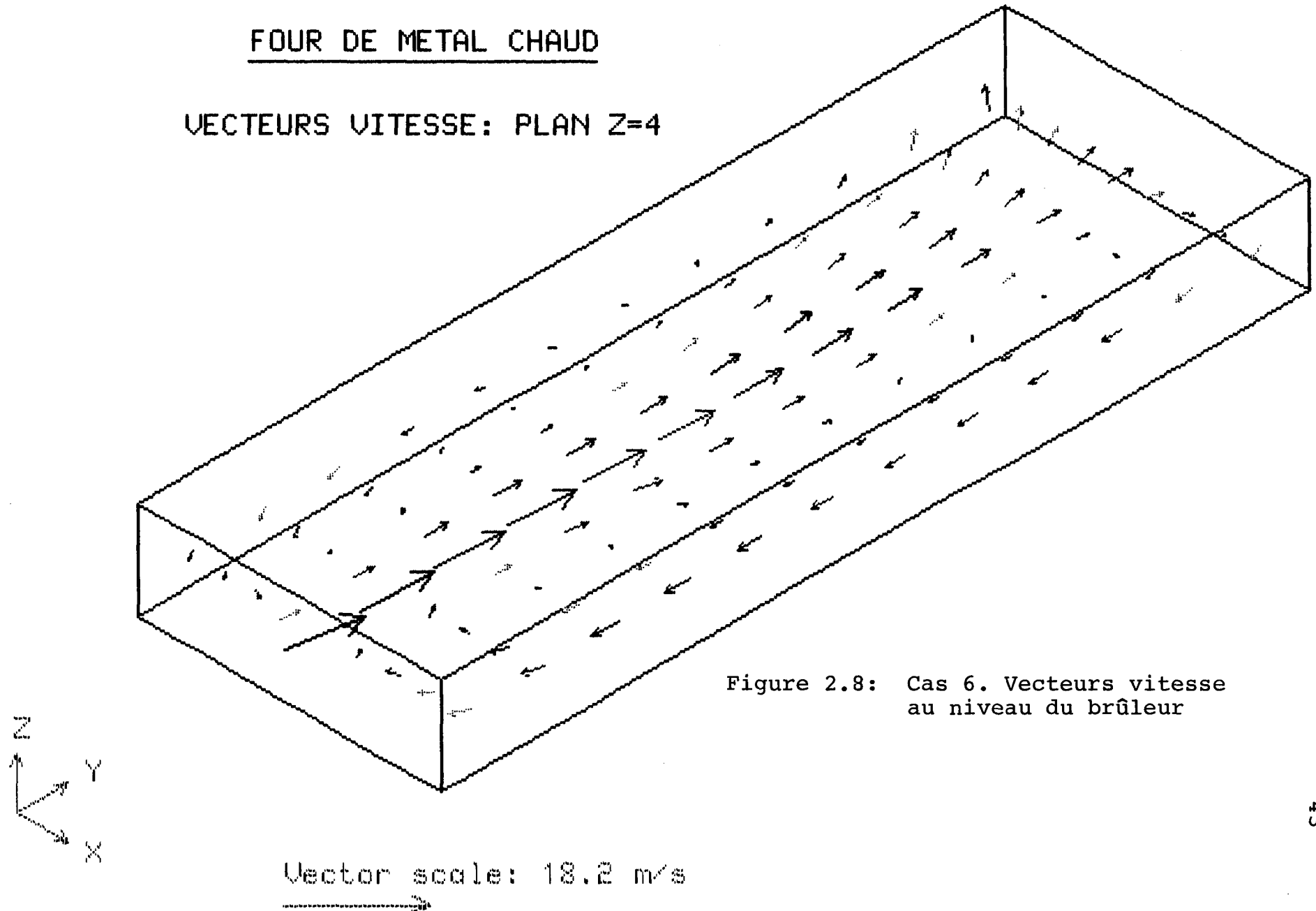
Vector scale: 18.2 m/s



ption?

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN Z=4



1
1
2
2
3
3
4
4
5
5
6
6
7
7

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE PRESSION: PLAN Z=4

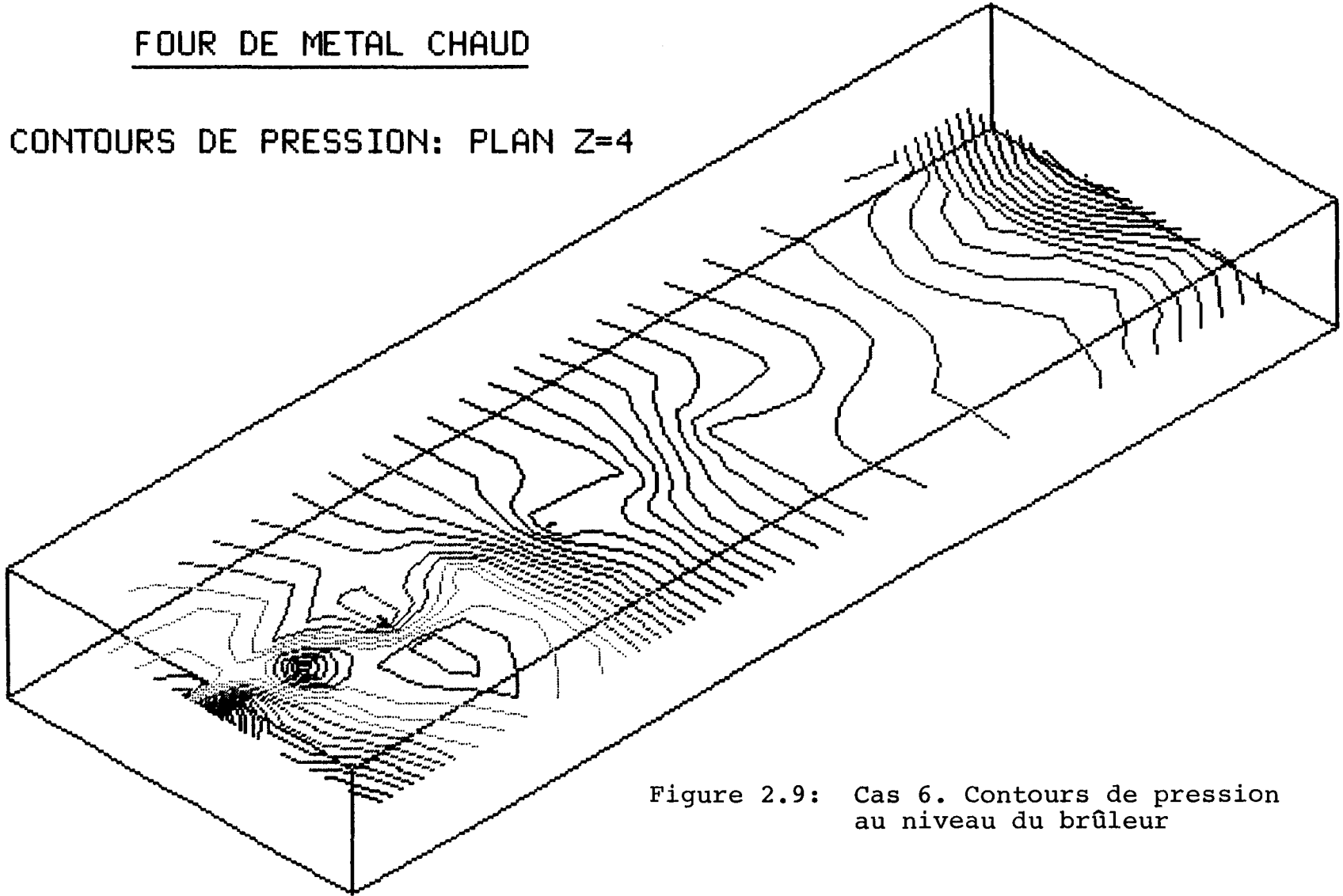


Figure 2.9: Cas 6. Contours de pression au niveau du brûleur



Option?

856
907
957
1007
1057
1107
1157
1207
1257
1308
1358
1408
1458
1508

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=4

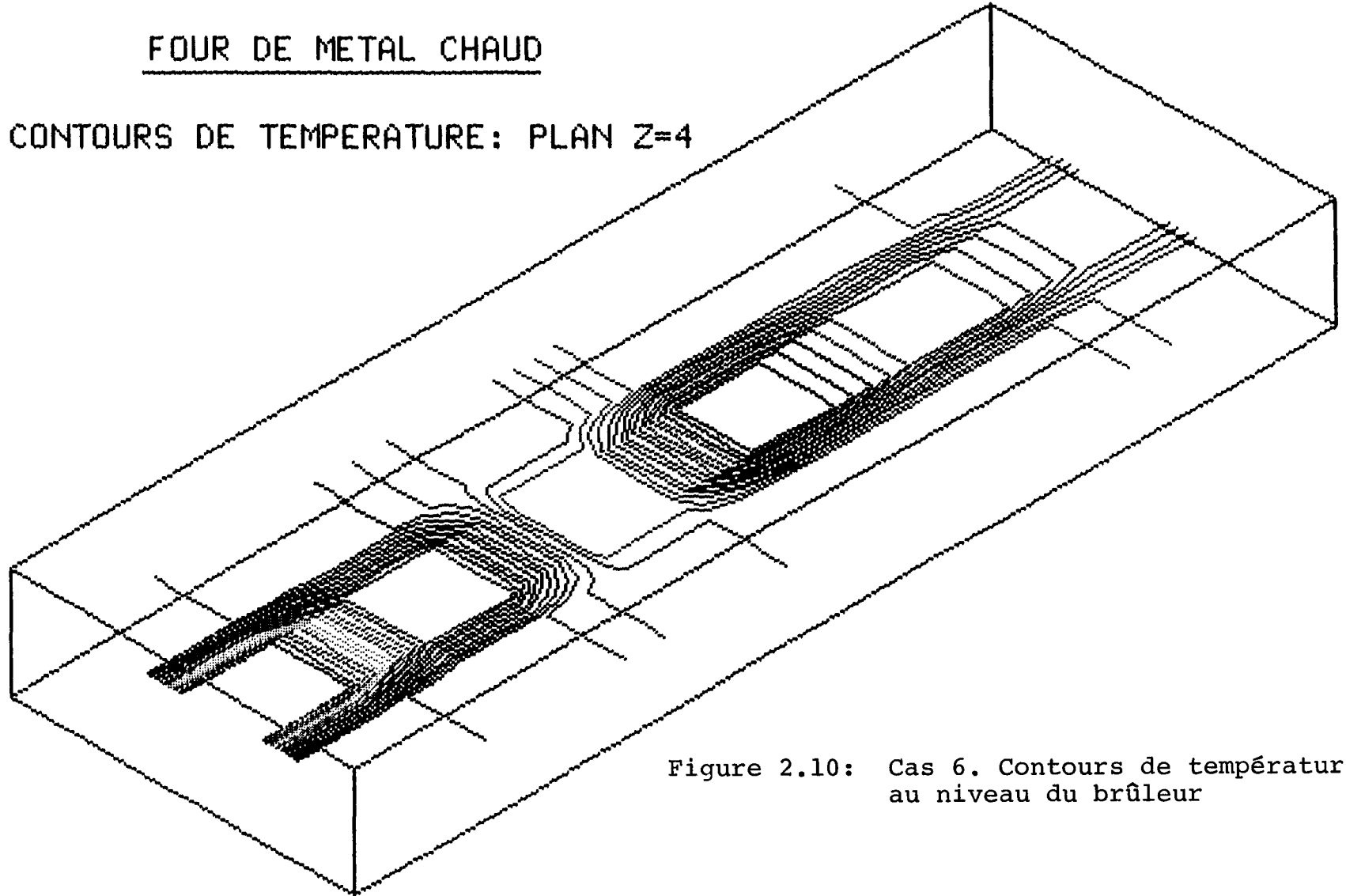


Figure 2.10: Cas 6. Contours de température au niveau du brûleur



TABLEAU 7

DISTRIBUTION DES TEMPÉRATURES (K): CAS 6

PLANCHER

1301	1391	1300
1323	1469	1264
1327	1577	1270
1261	1394	1274
1219	1202	1235
1186	1016	1200

ENTRÉE

PLAFOND

SORTIE	1320	1385	1319
	1360	1493	1288
	1398	1693	1281
	1317	1523	1300
	1278	1303	1272
	1246	1090	1232

ENTRÉE

Le tableau 8 donne les flux de chaleur calculés.

2.4 DISCUSSION

Ce chapitre présente la première version du couplage PHOENICS-ZONE. Les différentes simulations effectuées ont permis d'en évaluer la valeur et de déterminer les grandes lignes directrices qui serviront de base aux simulations subséquentes. On peut résumer ainsi les principales constatations effectuées:

- a) La comparaison entre les températures calculées par la méthode de zone avec écoulement froid ou chaud a mis en lumière une différence moyenne de 75 K entre les deux distributions de températures. Il semble donc que l'approximation par un écoulement froid ne soit pas suffisamment précise pour donner des résultats considérés représentatifs d'un écoulement chaud.
- b) La comparaison entre méthode de flux et méthode de zone montre que:
 - 1) La méthode de flux représente une approximation très réaliste du transfert de chaleur radiatif et sa simplicité la rend très attrayante par rapport à la méthode de zones.
 - 2) Pour le cas particulier simulé (chambre de combustion d'un four de métal chaud) un maillage ZONE de 36 éléments n'est pas suffisant pour représenter fidèlement les distributions de température. Il faut passer à 72 et même 144 éléments pour affirmer que les températures ont atteint un degré d'indépen-

TABLEAU 8

FLUX DE CHALEUR (kW) : CAS 6

	PLANCHER (métal)	PLAFOND	CÔTES (brûleur et opposé)	CÔTES (portes et opposé)	TOTAL
Convection	282	144	15	28	469
Radiation	1663	-91*	-9	-2	1561
TOTAL	1945	53	6	26	2030

* Un signe négatif représente un flux orienté vers l'intérieur du four

Un signe positif représente un flux orienté vers l'extérieur.

dance suffisant par rapport au maillage. Ce phénomène est dû au fait que les bilans énergétiques déterminant les températures ont la précision du maillage de ZONE, l'équation d'énergie étant résolue par le sous-programme ZONE.

- 3) Les flux de chaleur sont presque identiques, peu importe la méthode ou le maillage utilisé.
- c) La simulation détaillée d'un four de métal chaud (cas 6) a mis en évidence le patron d'écoulement dans la chambre de combustion avec deux zones principales de recirculation de part et d'autre du brûleur. La représentation graphique des températures laisse cependant à désirer.

Le chapitre III présente une deuxième version du couplage PHOENICS-ZONE, où l'équation d'énergie sera résolue par PHOENICS, seuls les flux de chaleur étant calculés par ZONE et transférés à PHOENICS. Chaque élément de PHOENICS aura son propre bilan énergétique et sa propre température. Cette seconde version devrait donc être plus précise que la première, l'équation d'énergie s'appliquant sur le maillage fin de PHOENICS plutôt que sur le maillage grossier de ZONE.

CHAPITRE III

COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 2.0

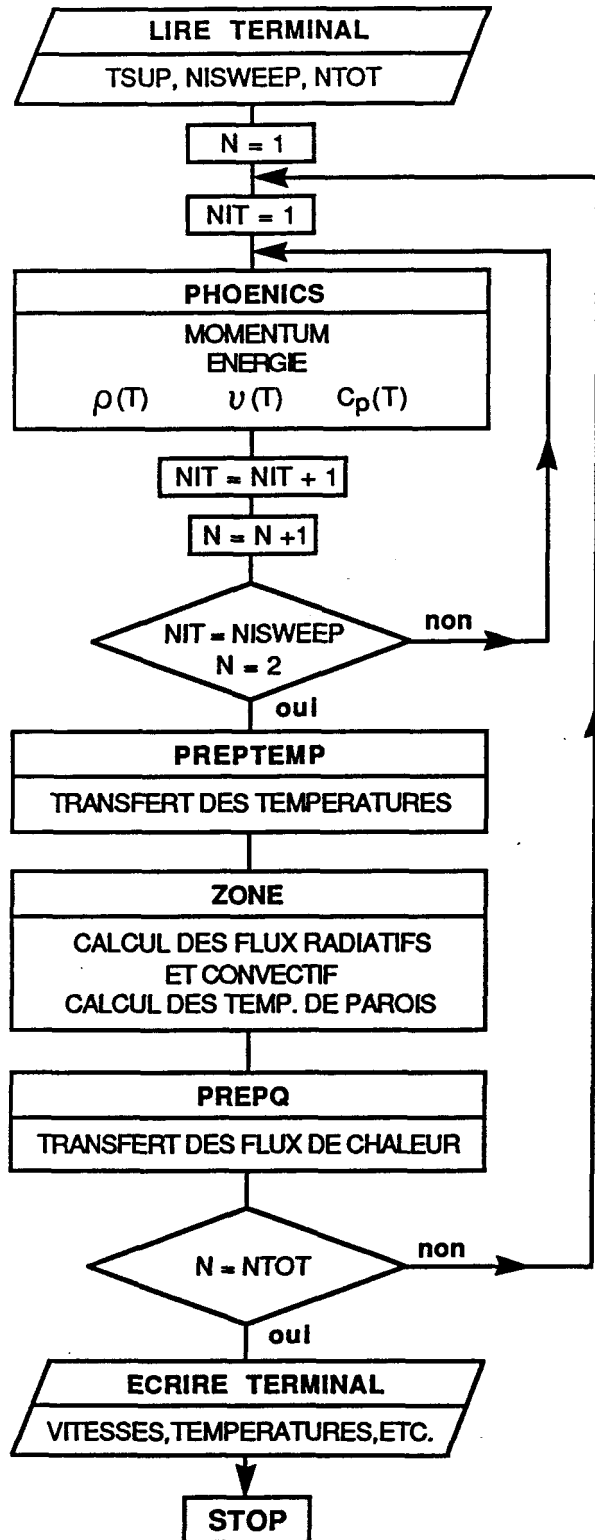
Ce chapitre du mémoire met l'accent sur une deuxième version du couplage PHOENICS-ZONE. Différentes simulations sont effectuées pour mettre en lumière certains phénomènes physiques comme la convection naturelle et les infiltrations ou exfiltrations.

3.1 DESCRIPTION DU COUPLAGE

La version 2.0 du couplage diffère de la version 1.0 par le fait que l'équation d'énergie est maintenant résolue par PHOENICS. Il devrait s'en suivre une plus grande précision des résultats, l'équation d'énergie étant appliquée au maillage de PHOENICS plus fin que celui de ZONE.

On retrouve à la figure 3.1 le schéma explicatif décrivant le fonctionnement de cette nouvelle version.

Tout comme la version précédente, on commence par supposer une température uniforme dans la chambre. Au début du cycle ($N = 2$) un



DESCRIPTION	
TSUP	: TEMPERATURE INITIALE SUPPOSEE
NISWEEP	: NOMBRE D'ITERATIONS ENTRE CHAQUE APPEL DE ZONE
NTOT	: NOMBRE TOTAL D'ITERATIONS POUR LA SIMULATION
$\rho(T)$: DENSITE COMME FONCTION DE LA TEMPERATURE
$\nu(T)$: VISCOSITE COMME FONCTION DE LA TEMPERATURE
$C_p(T)$: CHALEUR SPECIFIQUE COMME FONCTION DE LA TEMPERATURE

Figure 3.1: Schéma de fonctionnement du couplage PHOENICS-ZONE version 2.0

premier appel de ZONE permet de déterminer les flux radiatifs et convectifs qui sont transférés à PHOENICS sous forme de termes sources. On effectue alors NISWEEP itérations de PHOENICS pour déterminer de nouveaux champs de température qui sont réinjectés dans ZONE pour obtenir de nouvelles sources radiatives et convectives et ainsi de suite jusqu'à convergence de la solution.

Le sous-programme PREPTMP sert d'interface entre PHOENICS et ZONE. Il a pour fonction de transférer les températures du maillage fin de PHOENICS au maillage grossier de ZONE par une simple moyenne arithmétique, chaque élément de ZONE recevant la température moyenne de tous les éléments de PHOENICS qui y sont inclus.

Le sous-programme PREPQ sert d'interface entre ZONE et PHOENICS. Il a pour fonction de transférer les flux radiatifs et convectifs calculés par ZONE. Chaque élément de PHOENICS inclus dans un élément donné de ZONE reçoit les flux radiatifs et convectifs de cet élément.

L'équation d'énergie est donc résolue à partir du maillage fin de PHOENICS, seuls les termes sources radiatifs et convectifs sont calculés à partir du maillage grossier de ZONE. Chaque élément de PHOENICS a donc sa propre température et par conséquent, la représentation graphique par isotherme sera beaucoup plus réaliste que pour la version 1.0.

On retrouve à l'annexe 3 le listage des sous-programmes PREPTMP et PREPQ.

La deuxième version a été vérifiée à partir d'un cas particulier décrit en détail à l'annexe 1. Les résultats obtenus prouvent la validité des mécanismes de fonctionnement du couplage PHOENICS-ZONE version 2.0. On peut retrouver à l'annexe 2 un guide d'utilisation du modèle ainsi conçu.

3.2 DESCRIPTION DES CAS SIMULÉS

Dans cette section, on donne une brève description des différents cas simulés avec la deuxième version du couplage PHOENICS-ZONE.

Le tableau 9 résume les caractéristiques propres à chaque simulation.

Le cas 7 est identique au cas 1 traité précédemment, mêmes maillages PHOENICS et ZONE, mais résolu cette fois par la deuxième version du couplage. Il sert deux objectifs principaux:

- a) vérifier la plus grande précision de la seconde version.
- b) montrer que les représentations des champs de température par isothermes sont plus acceptables.

TABLEAU 9

LISTE DES SIMULATIONS RÉSOLUES
PAR COUPLAGE PHOENICS-ZONE VERSION 2.0

CAS	MAILLAGE PHOENICS	MAILLAGE ZONE	PROPRIÉTÉS THERMIQUES	PARTICULARITÉS
7	6x12x4	2x3x6	ρ , v , c_p constantes	Identique au cas 1 mais résolu par la version 2.0
8	9x12x8	2x3x6	ρ , v , c_p variables	Identique au cas 6 mais maillage ZONE plus grossier. On néglige la force de corps ρg .
9	9x12x8	2x3x6	ρ , v , c_p variables	Identique au cas 8. On considère la force de corps ρg .
10	9x12x8	2x3x6	ρ , v , c_p variables	On considère les exfiltrations de gaz de combustion.
11	9x12x8	2x3x6	ρ , v , c_p variables	On considère les infiltrations d'air ambiant.

Le cas 8 est identique au cas 6 à l'exception du maillage ZONE plus grossier. Pour cet essai, la force de corps représentée par ρg dans les équations de Navier-Stokes n'est pas activée. On néglige donc l'effet de la gravité terrestre. Le cas 9 est identique au cas 8, mais tient compte de l'effet gravitationnel.

Une comparaison entre les cas 8 et 9 permet de déterminer l'influence de l'effet gravitationnel et de la convection naturelle qui en découle sur l'écoulement fluide.

Le cas 10 est identique au cas 9 mais tient compte des possibles exfiltrations des gaz de combustion par les différentes ouvertures: trous de siphon, bec de coulée, portes.

Le cas 11 traite des infiltrations d'air ambiant par les mêmes orifices lorsque le niveau de pression interne est inférieur à la pression atmosphérique.

Les propriétés thermiques constantes ou variables utilisées pour les cas 7 à 11 sont identiques à celles qui sont décrites à la section 2.2 du mémoire.

3.3 RÉSULTATS

Cette partie du mémoire donne les résultats obtenus pour la simulation des cas 7 à 11. L'accent est mis sur une comparaison entre les

versions 1.0 et 2.0 du couplage, une comparaison avec les résultats obtenus avec et sans effet gravitationnel pour terminer avec une étude de l'influence des infiltrations ou exfiltrations sur le comportement de la chambre de combustion.

3.3.1 Comparaison entre versions 1.0 et 2.0 du couplage PHOENICS-ZONE

Le cas 7 est identique au cas 1 traité au chapitre précédent à cette différence près qu'il est résolu par la version 2.0 du couplage. Le maillage PHOENICS est de $6 \times 12 \times 4$, le maillage ZONE $2 \times 3 \times 6$ éléments. Les propriétés thermiques sont constantes. Les conditions limites sont données à la section 2.2.

Les cas 1 et 7 ont le même patron d'écoulement donné par la figure 2.3 et représentatif d'un écoulement froid.

Le cas 7 a nécessité 200 itérations de PHOENICS. La méthode de ZONE a été appelée à toutes les 10 itérations pour calculer les flux radiatifs qui ont été transférés à chaque élément de PHOENICS. La figure 3.2 donne la représentation graphique des températures obtenues pour le plan $Z = 2$. On note une nette amélioration par rapport à la figure 2.10. Le tableau 10 donne les valeurs numériques des moyennes de température pour chacun des 36 éléments de ZONE. Si l'on compare ces températures avec celles des cas 1 et 3, on note une réelle amélioration de la précision des résultats, les températures du cas 7 étant plus près de celles calculées par la méthode de flux (cas 3), comme on peut le

566
656
746
836
926
1015
1105
1195
1285
1375
1465
1554
1644
1734

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=2

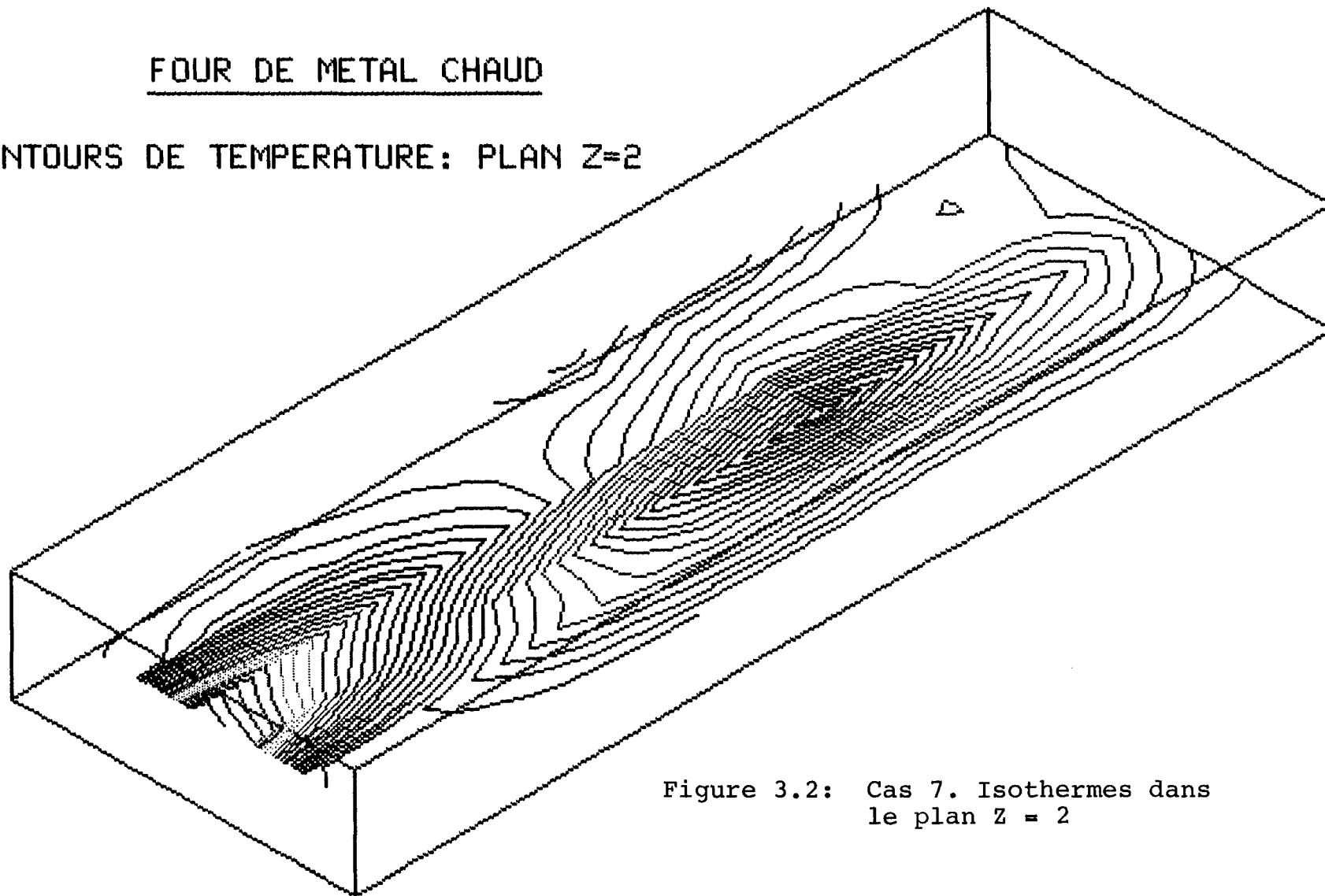


Figure 3.2: Cas 7. Isothermes dans le plan $Z = 2$

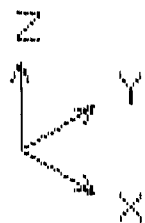


TABLEAU 10

DISTRIBUTION DES TEMPÉRATURES (K): CAS 7

PLANCHER			PLAFOND				
ENTRÉE	1377	1414	1301	SORTIE	1342	1406	1300
	1365	1612	1312		1359	1612	1318
	1313	1777	1311		1321	1780	1316
	1283	1607	1344		1294	1613	1352
	1260	1332	1269		1285	1343	1277
	1211	977	1199		1236	1015	1206
ENTRÉE			ENTRÉE				

constater en consultant le tableau 11 où l'on donne pour chaque cas les différences maximales et moyennes de température de même que les flux totaux d'énergie. On note que le flux de chaleur radiatif total du cas 7 est très près de celui calculé par la version 1.0 avec 72 ou 144 éléments. De plus, la différence moyenne de température est passée de 32.6 à 23.4 K, une nette amélioration par rapport au cas 1. La version 2.0 est par conséquent plus précise que la version 1.0.

Les simulations subséquentes seront donc effectuées avec un maillage ZONE de 2x3x6 éléments ce qui aura l'avantage de diminuer considérablement le temps de calcul, tout en assurant une précision relativement acceptable au niveau des champs de température et une excellente précision pour les flux radiatifs.

3.3.2 Simulation du four de métal chaud sans et avec effet gravitationnel

L'utilisateur de PHOENICS doit décider pour ses simulations de l'utilisation ou non de la force de corps ρg dans les équations de Navier-Stokes. Par défaut, cette force n'est pas considérée. Pour déterminer l'impact de la force de corps sur le comportement de la chambre de combustion, deux simulations ont été réalisées: le cas 8 néglige le terme ρg , le cas 9 en tient compte.

3.3.2.1 Sans effet gravitationnel

Le cas 8 est très semblable au cas 6 traité au chapitre précédent à cette différence près qu'il est maintenant résolu par la version 2.0 du

TABLEAU 11

FLUX DE CHALEUR ET DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE
ENTRE LE CAS 7 ET LES CAS 1, 3, 4 ET 5

CAS	FLUX DE CHALEUR (kW)	DIFF. DE TEMP. MAXIMALE (K)	DIFF. DE TEMP. MOYENNE (K)
Cas 3: FLUX	2323	Référence	Référence
Cas 1: ZONE 36 version 1.0	2266	107	32.6
Cas 7: ZONE 36 version 2.0	2284	73	23.4
Cas 4: ZONE 72 version 1.0	2289	52	14.3
Cas 5: ZONE 144 version 1.0	2288	46	12.8

couplage et que le maillage ZONE est passé de 72 éléments (cas 6) à 36 éléments ce qui semble suffisant d'après la section précédente pour assurer une bonne précision au niveau des champs de température et flux de chaleur, tout en diminuant le temps de calcul requis.

On peut retrouver à la section 2.3.3, tableau 6, les principales caractéristiques du cas 8.

Rappelons que le maillage PHOENICS est de $9 \times 12 \times 8$ (figure 2.5). Un coefficient de transfert global de chaleur est imposé à chacune des parois pour tenir compte des pertes atmosphériques sauf pour le métal liquide où la température est fixée à 1033 K. Un coefficient de transfert de chaleur par convection a également été imposé sur chaque surface interne de la chambre. Les propriétés thermiques sont variables et 500 itérations de PHOENICS ont permis d'atteindre la convergence. Le sous-programme ZONE a été appelé à toutes les 10 itérations.

A la figure 3.3 on peut retrouver les champs de vitesse le long des parois verticales et au centre de la chambre. On note encore une fois la présence de deux zones principales de recirculation que l'on retrouve aussi à la figure 3.4 dans le plan horizontal $Z = 4$ au niveau du brûleur. La figure 3.5 donne les isothermes au même endroit. Les figures 3.6 et 3.7 donnent respectivement les champs de vitesse et de température correspondant au plan vertical $X = 5$ passant par le brûleur.

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLANS VERTICAUX

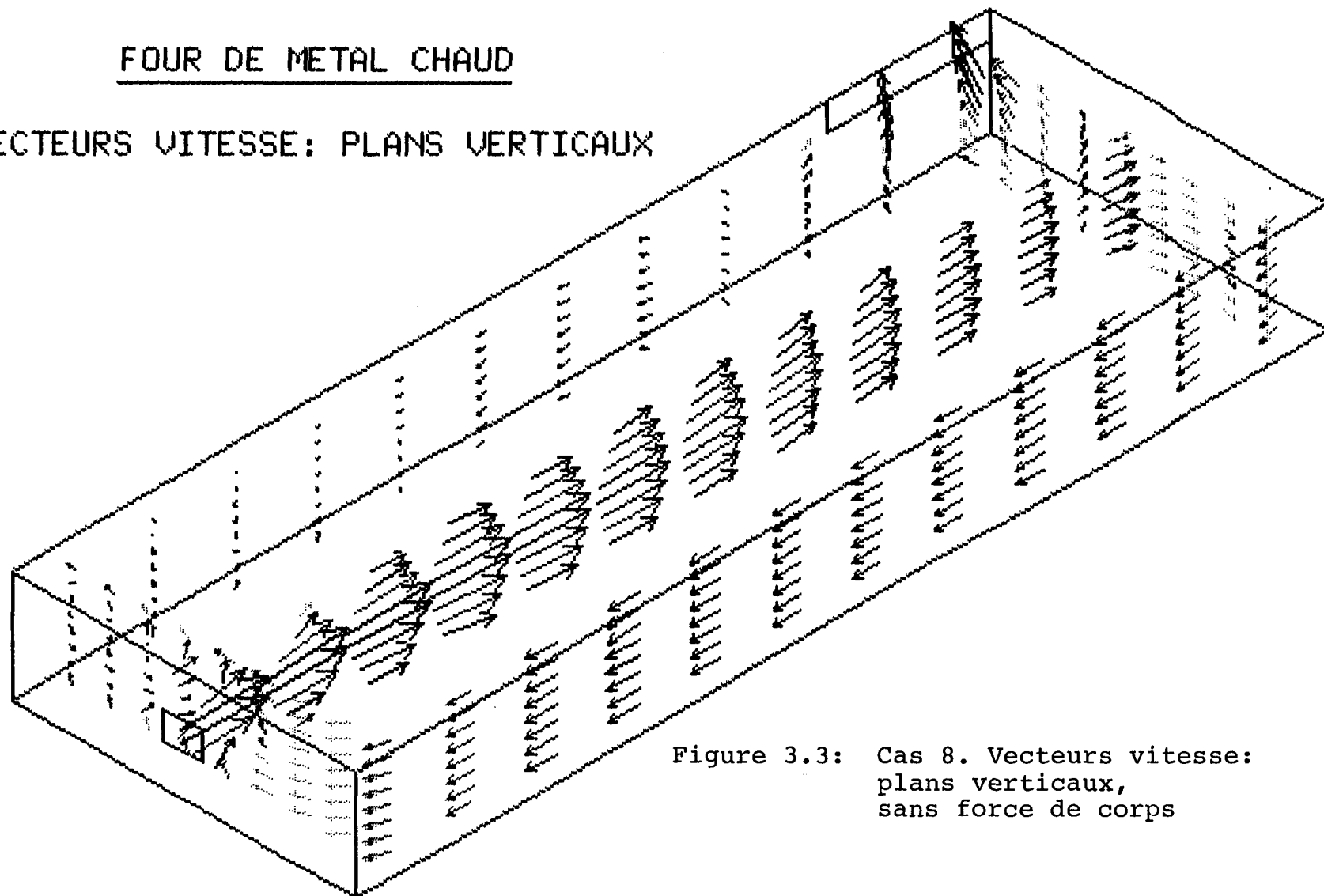


Figure 3.3: Cas 8. Vecteurs vitesse:
plans verticaux,
sans force de corps



Vector scale: 18.2 m/s



FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN $Z=4$

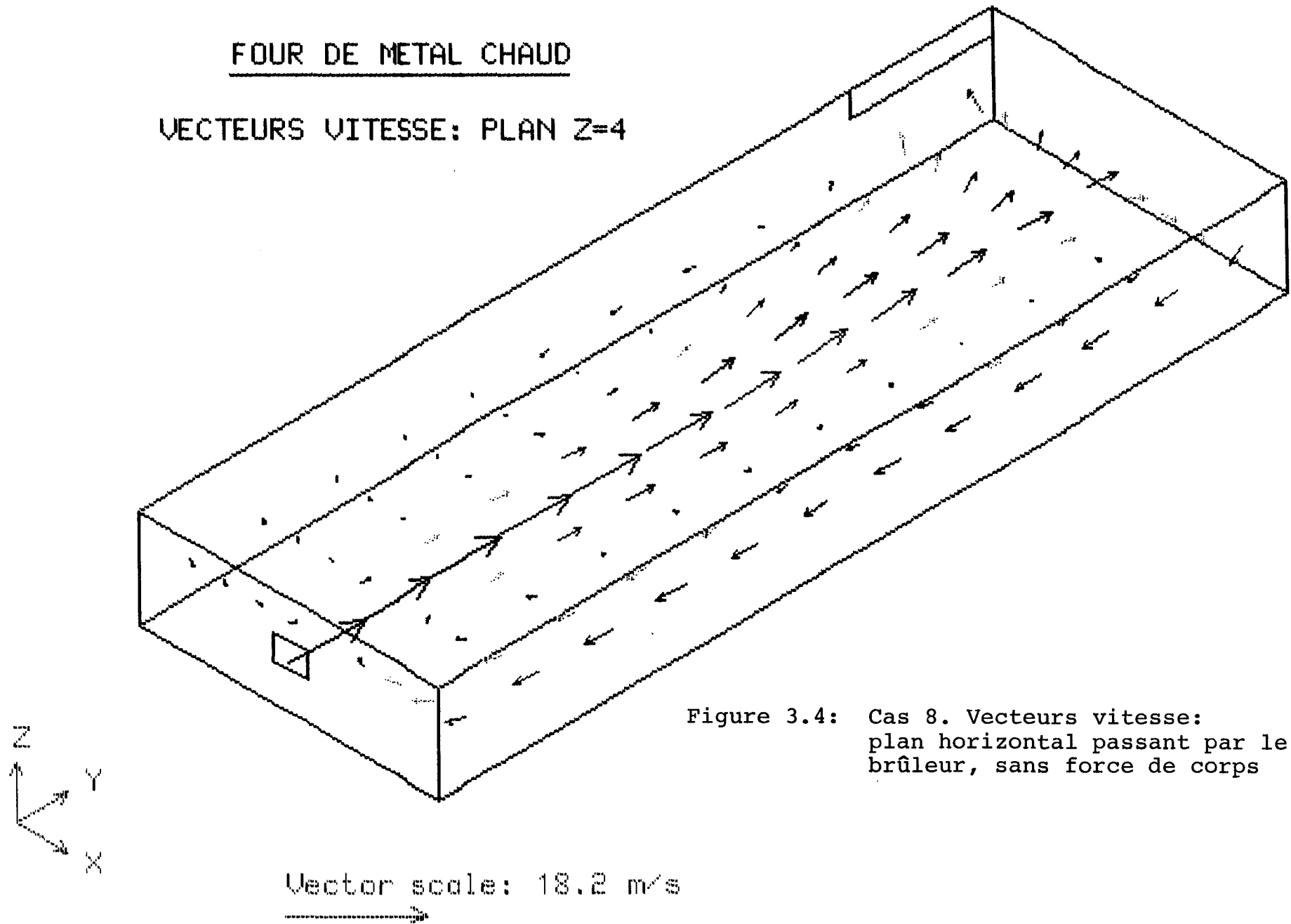


Figure 3.4: Cas 8. Vecteurs vitesse:
plan horizontal passant par le
brûleur, sans force de corps

455
547
639
731
822
914
1006
1098
1190
1282
1374
1466
1558
1649

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=4

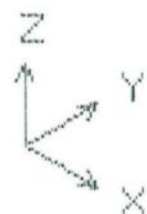
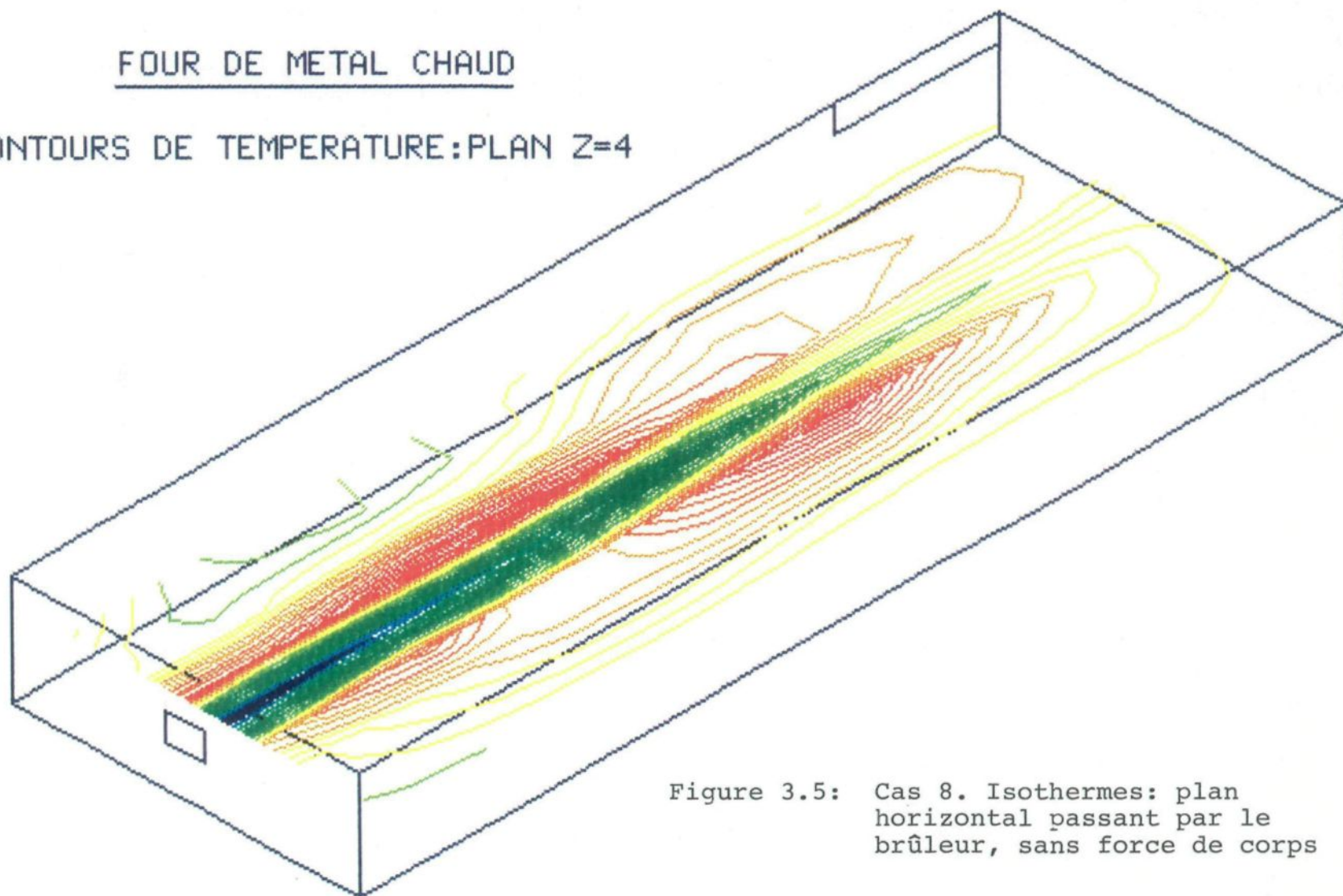


Figure 3.5: Cas 8. Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, sans force de corps

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN X=5

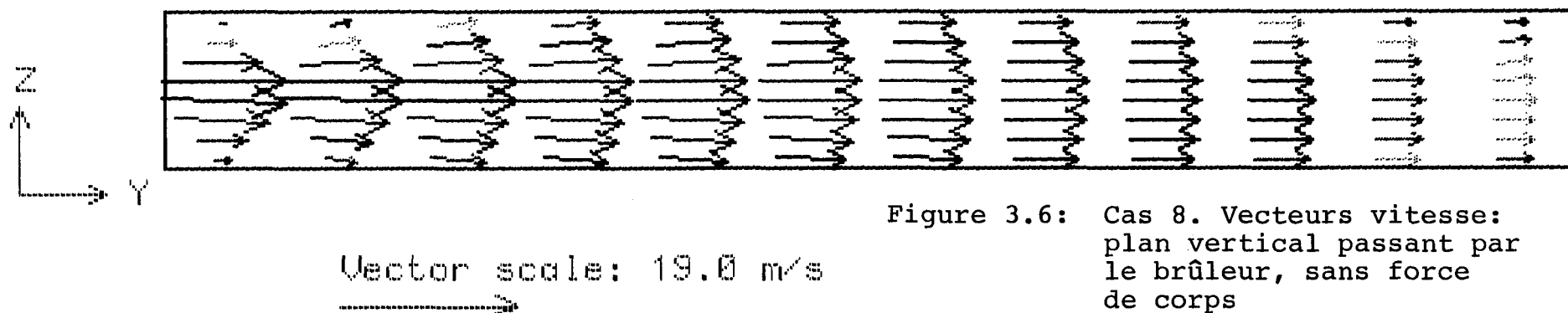


Figure 3.6: Cas 8. Vecteurs vitesse:
plan vertical passant par
le brûleur, sans force
de corps

448

536

624

713

801

889

977

1066

1154

1242

1331

1419

1507

1596

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN X=5

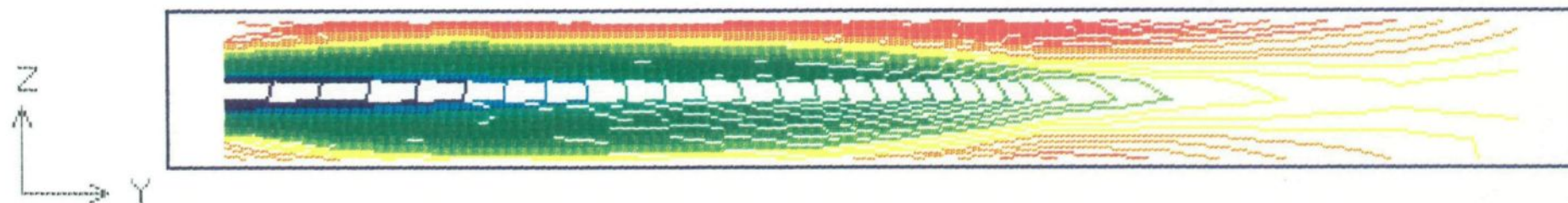


Figure 3.7: Cas 8. Isothermes: plan vertical passant par le brûleur sans force de corps

A cette étape-ci, il est bon d'ouvrir une parenthèse sur la valeur des champs de température représentés aux figures 3.5 et 3.7. On remarque une longue traînée froide générée par l'entrée du mélange air-combustible au brûleur là où, normalement, la température devrait être plus élevée puisqu'elle correspond à la position de la flamme.

On est donc en présence d'un sérieux problème dû à notre supposition initiale sur la répartition de la chaleur générée par la combustion. Rappelons que l'énergie est libérée uniformément dans un volume qui s'étend sur les premiers deux tiers de la chambre en longueur, du tiers aux deux tiers en largeur et sur toute la hauteur.

L'énergie étant libérée uniformément, les éléments situés à mi-hauteur de la chambre, au niveau de la source froide du mélange air-combustible auront donc une température moins élevée que les éléments situés aux extrémités hautes et basses de la chambre qui sont moins affectés par cette source froide. Il s'ensuit une inversion des profils de température verticaux par rapport à ce que l'on devrait normalement observer.

Pour évaluer et situer correctement les sources d'énergie provenant de la combustion, un modèle de réaction chimique avec génération de chaleur devrait être jumelé à PHOENICS pour déterminer avec précision ces sources énergétiques et éviter ainsi qu'elles ne soient réparties

par l'utilisateur selon des critères plus ou moins acceptables. Il semble qu'un tel modèle soit essentiel pour une évaluation réaliste des champs de température dans la chambre de combustion.

A titre purement indicatif, la figure 3.8 donne la distribution de température au niveau du brûleur calculée par le logiciel FLUENT en activant le modèle de réaction chimique et génération de chaleur lors d'une simulation antérieure effectuée avec des données similaires. En comparant avec la figure 3.5, on observe la distribution plus réaliste du champ de température. Fermons la parenthèse.

3.3.2.2 Avec effet gravitationnel

Contrairement au cas 8, le cas 9 a été simulé en activant le terme ρg dans les équations de Navier-Stokes. Les entrées et conditions frontières sont identiques. Cette simulation met en lumière l'influence de la gravité (et par conséquent de la convection naturelle) sur l'écoulement fluide.

On retrouve à la figure 3.9 les champs de vitesse le long des parois verticales et au centre de la chambre. La figure 3.10 donne le champ de vitesse horizontal au niveau du brûleur. La figure 3.11 donne les isothermes au même endroit. Les figures 3.12 et 3.13 donnent respectivement les champs de vitesse et de température au plan vertical $X = 5$ passant par le brûleur.

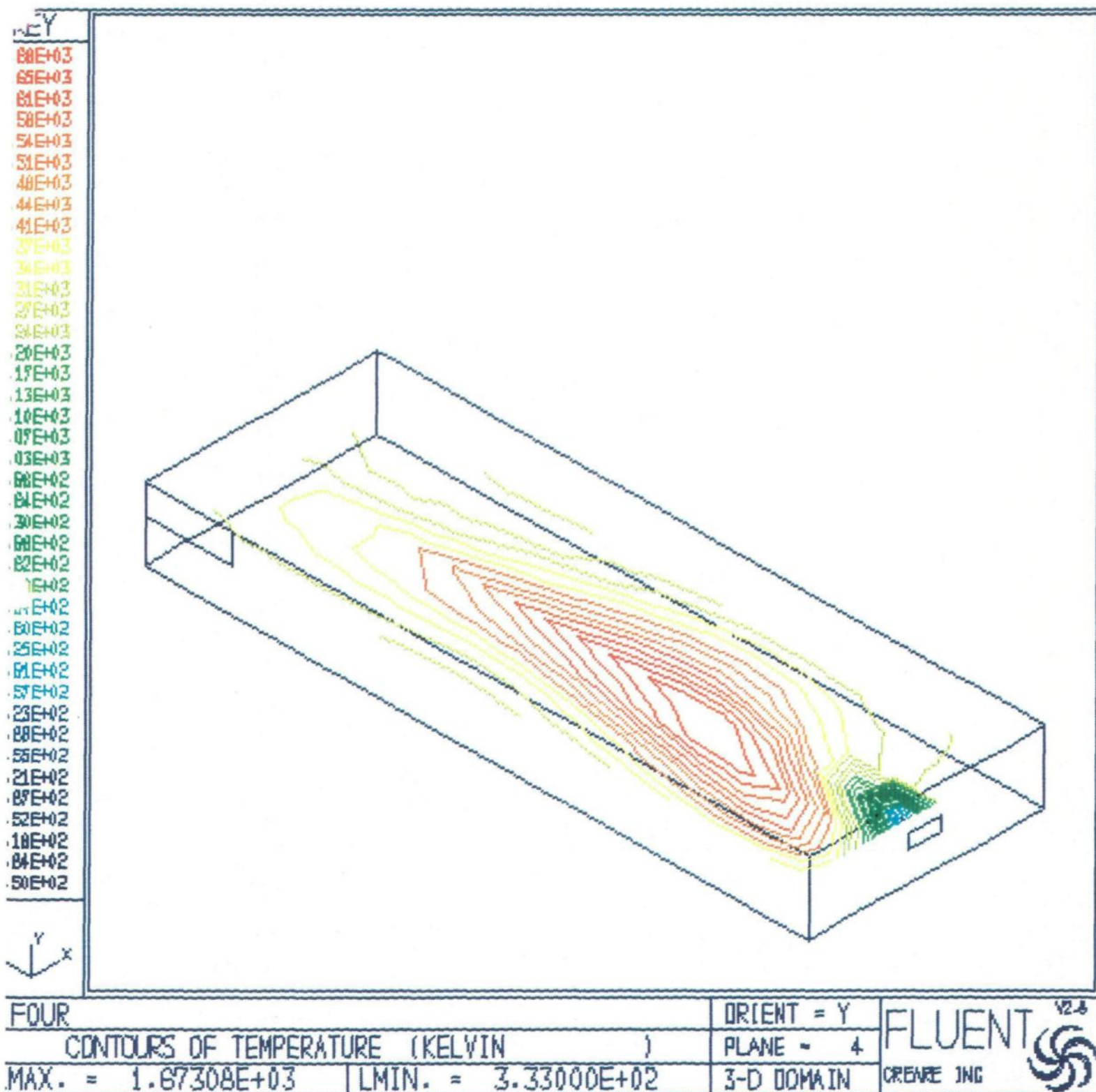


Figure 3.8: Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, obtenus avec FLUENT et modèle de réaction chimique

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLANS VERTICAUX

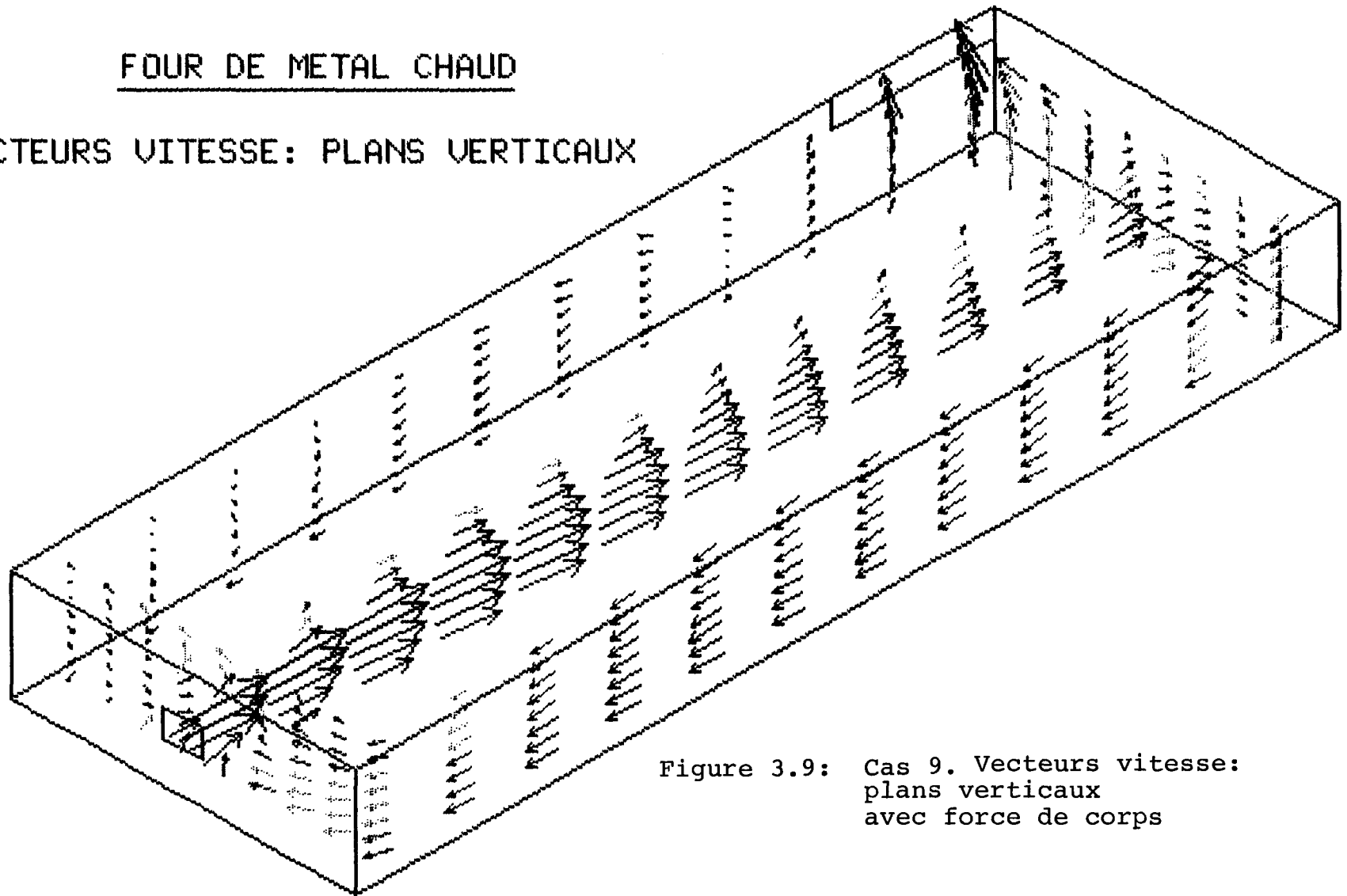


Figure 3.9: Cas 9. Vecteurs vitesse:
plans verticaux
avec force de corps



Vector scale: 18.2 m/s



FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN Z=4

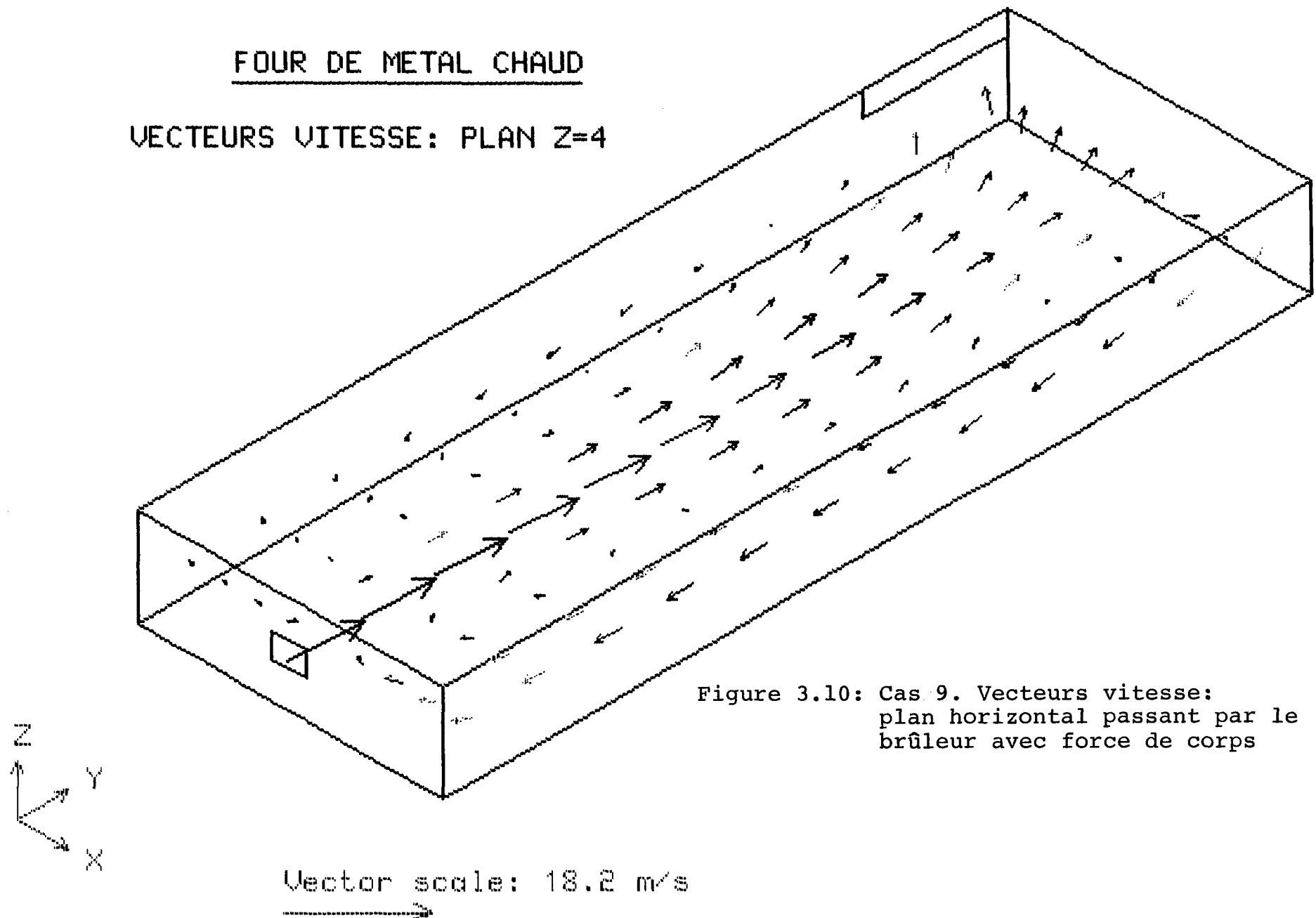


Figure 3.10: Cas 9. Vecteurs vitesse:
plan horizontal passant par le
brûleur avec force de corps

457

543

629

716

802

888

974

1061

1147

1233

1319

1406

1492

1578

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=4

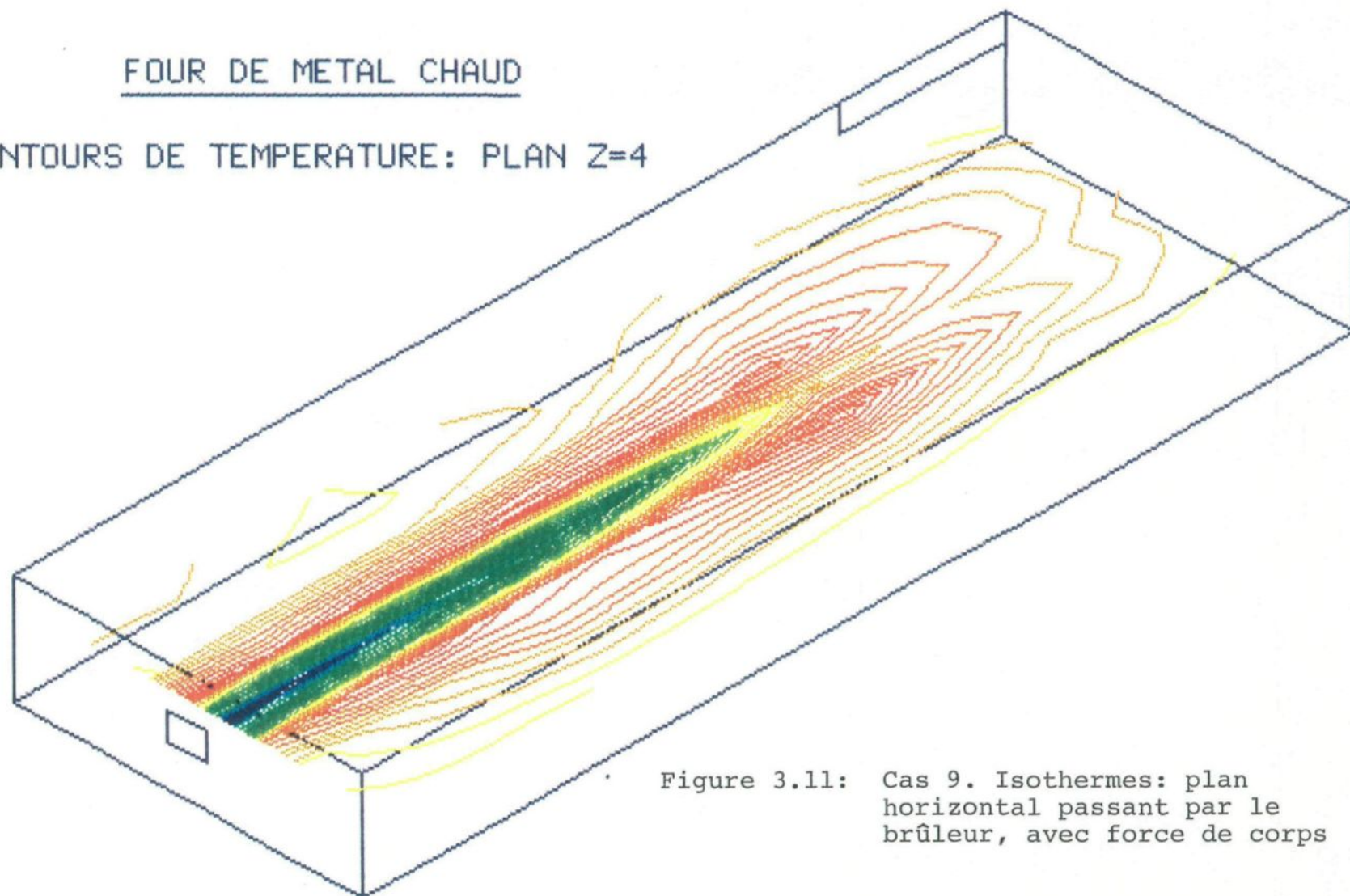
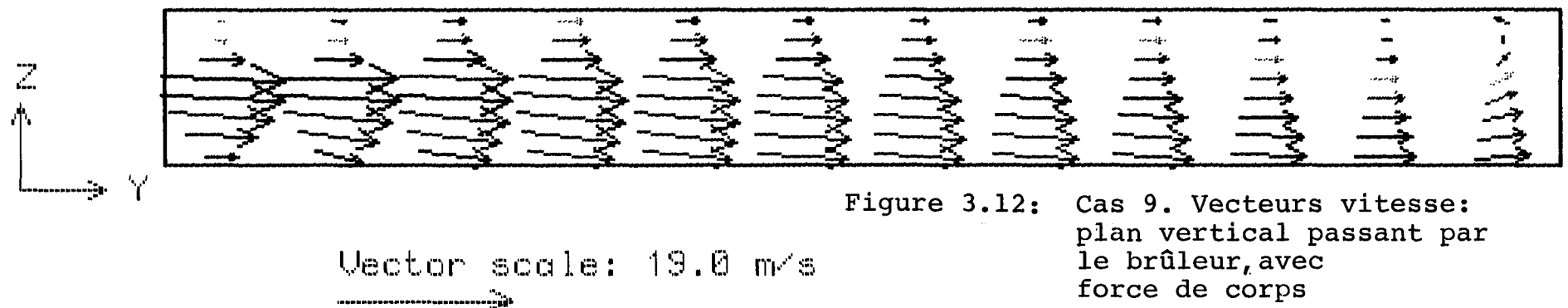


Figure 3.11: Cas 9. Isothermes: plan horizontal passant par le brûleur, avec force de corps

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN X=5



469
581
692
804
916
1028
1140
1252
1364
1476
1587
1699
1811
1923

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN X=5

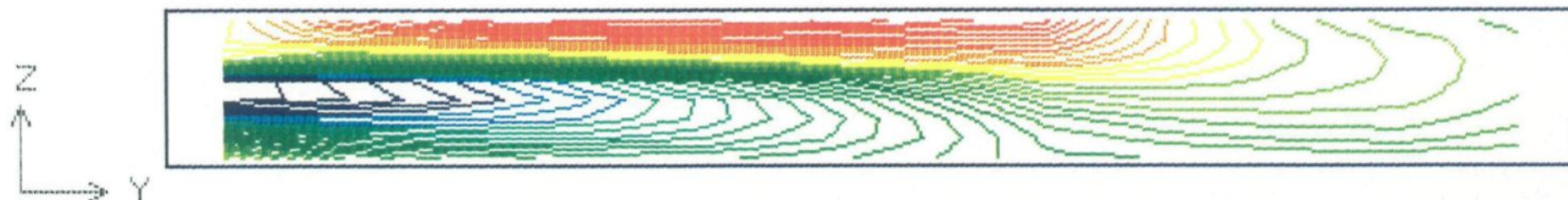


Figure 3.13: Cas 9. Isothermes: plan vertical passant par le brûleur, avec force de corps

Une comparaison entre les figures 3.6 et 3.12 montre que l'écoulement avec gravité est plus incliné que l'écoulement sans gravité. En effet, la colonne d'air froid générée par le brûleur, de par sa densité plus élevée subit une poussée qui la force à s'incliner vers le bas. Comportement logique si l'on considère la répartition supposée de l'énergie, mais peu réaliste si l'on considère la tendance naturelle d'une flamme à s'élever.

Si l'énergie de combustion était convenablement évaluée et située, il est probable que la tendance observée aurait été tout autre. La colonne d'air chaud aurait alors eu tendance à s'élever plutôt qu'à descendre d'où l'importance d'un bon modèle de combustion.

Une comparaison entre les figures 3.7 et 3.13 montre que les températures sont passablement différentes. La température près du plafond est plus élevée et la température près du plancher plus faible lorsqu'on tient compte de la convection naturelle, ce qui semble raisonnable étant donné la tendance d'un gaz chaud à s'élever.

Le tableau 12 résume les flux de chaleur calculés pour les cas 8 et 9.

La différence entre les flux de chaleur totaux est de l'ordre de 3.7%. Il est intéressant de noter que la température élevée au plafond du cas 9 implique un gain convectif plus élevé qu'au cas 8 de même

TABLEAU 12

FLUX DE CHALEUR (kW) POUR LES CAS 8 ET 9

		PLANCHER (métal)	PLAFOND	CÔTES (brûleur et opposé)	CÔTES (portes et opposé)	TOTAL
CAS 8 sans pg	Convection	281	110	24	35	450
	Radiation	1666	-58*	-18	-9	1581
	TOTAL	1947	52	6	26	2031
CAS 9 avec pg	Convection	238	147	22	31	438
	Radiation	1783	-93	-15	-5	1670
	TOTAL	2021	54	7	26	2108

* Un signe négatif représente un flux orienté vers l'intérieur de la chambre

Un signe positif représente un flux orienté vers l'extérieur.

qu'une émission radiative plus intense. Inversement, le plancher du cas 9 reçoit moins d'énergie par convection, la température des gaz étant plus basse qu'au cas 8. Par contre, les flux radiatifs y sont plus élevés puisque la paroi opposée (le plafond) est plus chaude.

Une comparaison entre les cas 8 et 9 montre donc que la force de corps ρg a un effet visible sur le patron de l'écoulement fluide et sur la distribution des températures. Cependant, l'effet de cette convection naturelle est masqué par l'importance de la convection forcée générée par le brûleur de sorte que son influence est plutôt réduite.

Si, par contre, le débit d'entrée du mélange air-combustible était plus faible (comme en période de bas feu par exemple) alors l'influence de la convection naturelle serait beaucoup plus nette. Il s'ensuit qu'il paraît être préférable d'activer la convection naturelle lorsque l'on simule la chambre de combustion d'un four de métal chaud.

Cette comparaison nous a de plus permis de souligner l'importance capitale d'un bon modèle de réaction chimique et génération de chaleur avec lequel on pourrait évaluer et situer exactement les sources énergétiques de combustion.

Avec un tel modèle, les patrons d'écoulement avec force de corps seraient beaucoup plus réalistes que ceux obtenus au cas 9.

3.3.3 Simulation du four de métal chaud avec exfiltration ou infiltration

Jusqu'à maintenant, la chambre de combustion du four de métal chaud était considérée parfaitement étanche avec une unique entrée du mélange air-combustible au brûleur et une unique sortie au carneau d'évacuation des gaz de combustion.

La réalité est cependant toute autre puisque des transferts de masse importants peuvent se produire entre la chambre et son environnement par l'intermédiaire des trous de siphons, bec de coulée, portes et autres orifices de moindre importance.

Les cas 10 et 11 ont été simulés en tenant compte des exfiltrations ou infiltrations qui peuvent se produire et affecter le comportement de la chambre.

Pour un orifice donné, le transfert de masse entre la chambre et l'environnement est représenté par l'équation suivante:

$$\dot{m}_g = CA \sqrt{2\rho\Delta P}$$

où \dot{m}_g = débit massique de fluide traversant l'orifice [kg/s]

C = constante d'écoulement reliée à la nature de l'orifice
(sans unités)

A = section de l'orifice [m²]

ρ = densité moyenne du fluide dans l'orifice [kg/m^3]

ΔP = différence de pression totale entre chaque extrémité de l'orifice [Pa]

La figure 3.14 donne la position des différents orifices considérés. On note les deux trous de siphon à l'extrémité nord de la chambre, le bec de coulée sur la face ouest et à l'opposé, les interstices laissés libres sur le pourtour de chacune des portes. Comme ces derniers sont plus difficiles à situer, on les supposera répartis uniformément sur toute la surface des portes.

Pour appliquer l'équation précédente reliant le débit d'infiltration ou d'exfiltration à la différence de pression, les hypothèses suivantes sont utilisées:

- a) La valeur de C , le coefficient d'écoulement, est fixée à 0.92 pour tous les orifices sur la base de travaux antérieurs effectués dans une situation semblable (Dernedde, 1987). Comme première approximation, cette valeur semble raisonnable.
- b) Les sections d'écoulement pour chaque orifice sont:
 - trou de siphon 1 : 0.0625 m^2
 - trou de siphon 2 : 0.0625 m^2
 - bec de coulée : 0.05 m^2
 - interstices de porte: 0.125 m^2

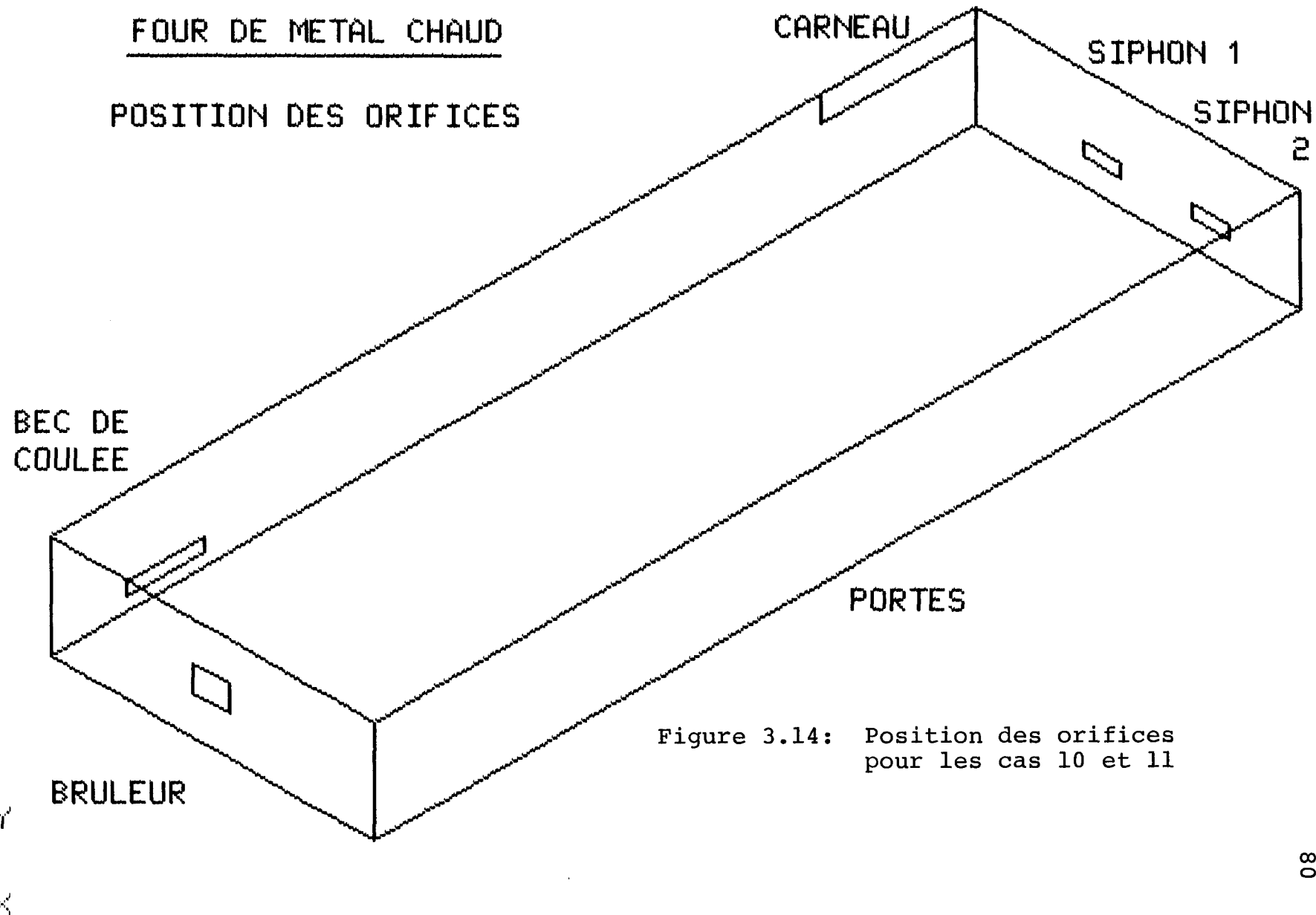


Figure 3.14: Position des orifices pour les cas 10 et 11

Ces valeurs sont elles aussi approximatives en particulier pour les interstices de porte qu'il est difficile de mesurer précisément.

- c) La densité moyenne dans l'orifice est:
- en infiltration: 1.2 kg/m^3
 - en exfiltration: la densité de l'élément adjacent à l'orifice.

On considère donc que l'infiltration se produit à la température ambiante et l'exfiltration à la température de l'élément adjacent à l'orifice.

- d) L'écoulement à travers les interstices de portes est réparti uniformément sur toute la surface à l'est de la chambre. Les autres orifices sont traités ponctuellement.

Jusqu'à maintenant, le niveau de pression fixé dans la chambre n'avait aucune importance puisque ce qui entrait au brûleur devait nécessairement sortir au carneau. Maintenant, la pression interne devient capitale puisqu'elle détermine automatiquement la quantité de fluide transférée par les orifices. Si la chambre est en surpression on aura exfiltration des gaz de combustion, si elle est en dépression, on aura infiltration d'air frais ambiant.

3.3.3.1 Avec exfiltration

Le cas 10 est identique au cas 9 traité précédemment à cette différence près que l'on considère maintenant les orifices. La pression relative imposée au carneau d'évacuation est de + 4Pa, de sorte que toute la chambre est sous l'effet d'une légère surpression. On peut retrouver à la figure 3.15 les champs de pression obtenus dans le plan horizontal $Z = 4$ passant par le brûleur.

La pression est maximale sur la surface nord, près du carneau, l'écoulement principal frappant directement la paroi à cet endroit comme on peut le constater à la figure 3.16. La figure 3.17 donne le champ de température au même endroit. On note une légère augmentation par rapport au cas 9, figure 3.11. La figure 3.18 donne les contours de vitesse verticale W_1 dans le plan $Y = 12$ à la surface nord de la chambre. On peut observer les perturbations causées par l'exfiltration des gaz de combustion à travers les trous de siphon 1 et 2. Le tableau 13 donne le bilan massique du cas 10.

Près de 30% du débit au brûleur est sorti par les différents orifices. Ces pertes à l'environnement ont un effet sur les champs de vitesse, en diminuant la quantité de gaz recirculés dans la chambre. Une observation attentive des vitesses le long des portes montre une légère diminution par rapport au cas 9.

3
3
4
4
5
5
6
6
7
7
8
8
9
9

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE PRESSION: PLAN Z=4

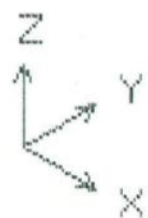
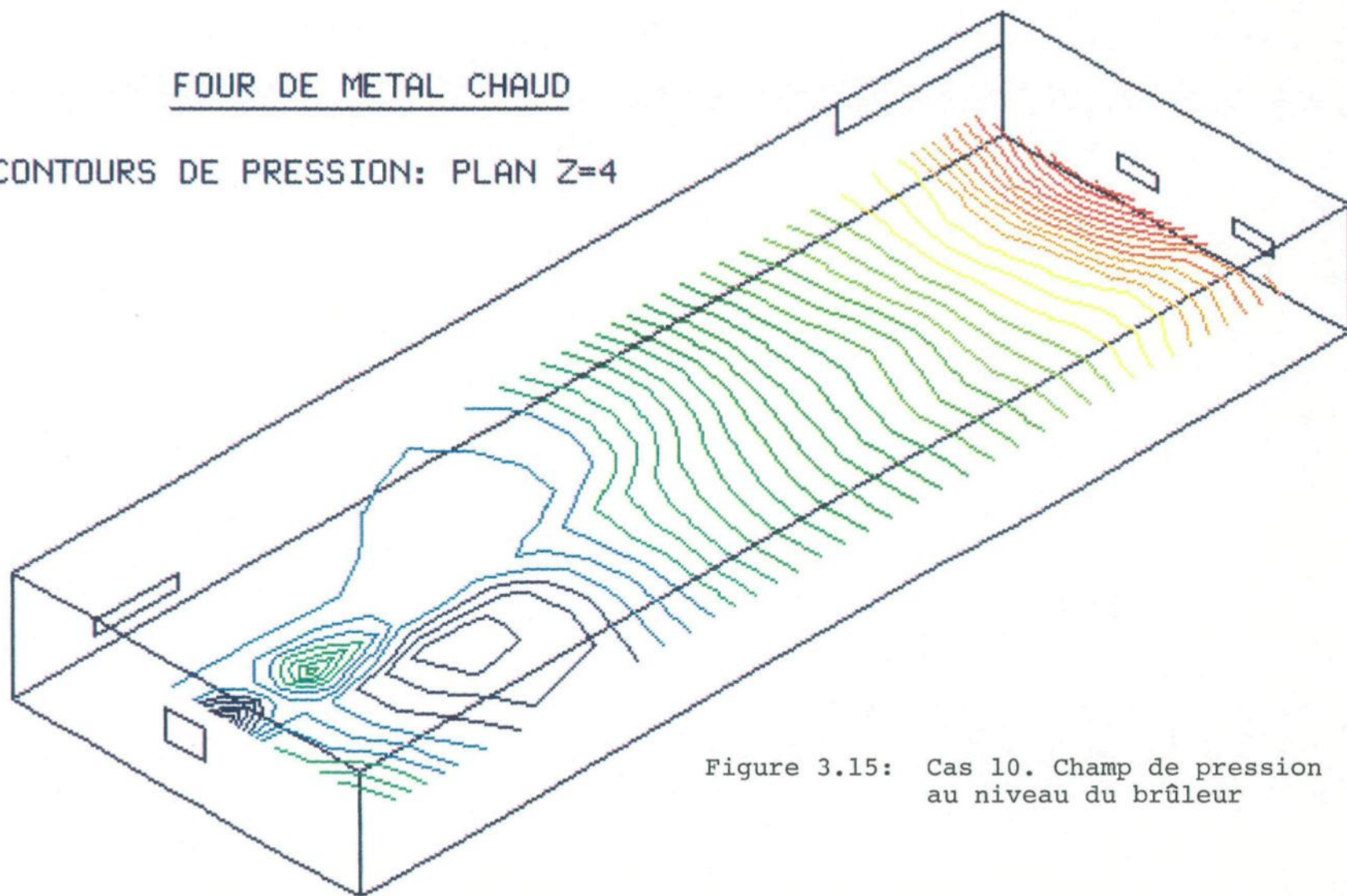


Figure 3.15: Cas 10. Champ de pression au niveau du brûleur

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN Z=4

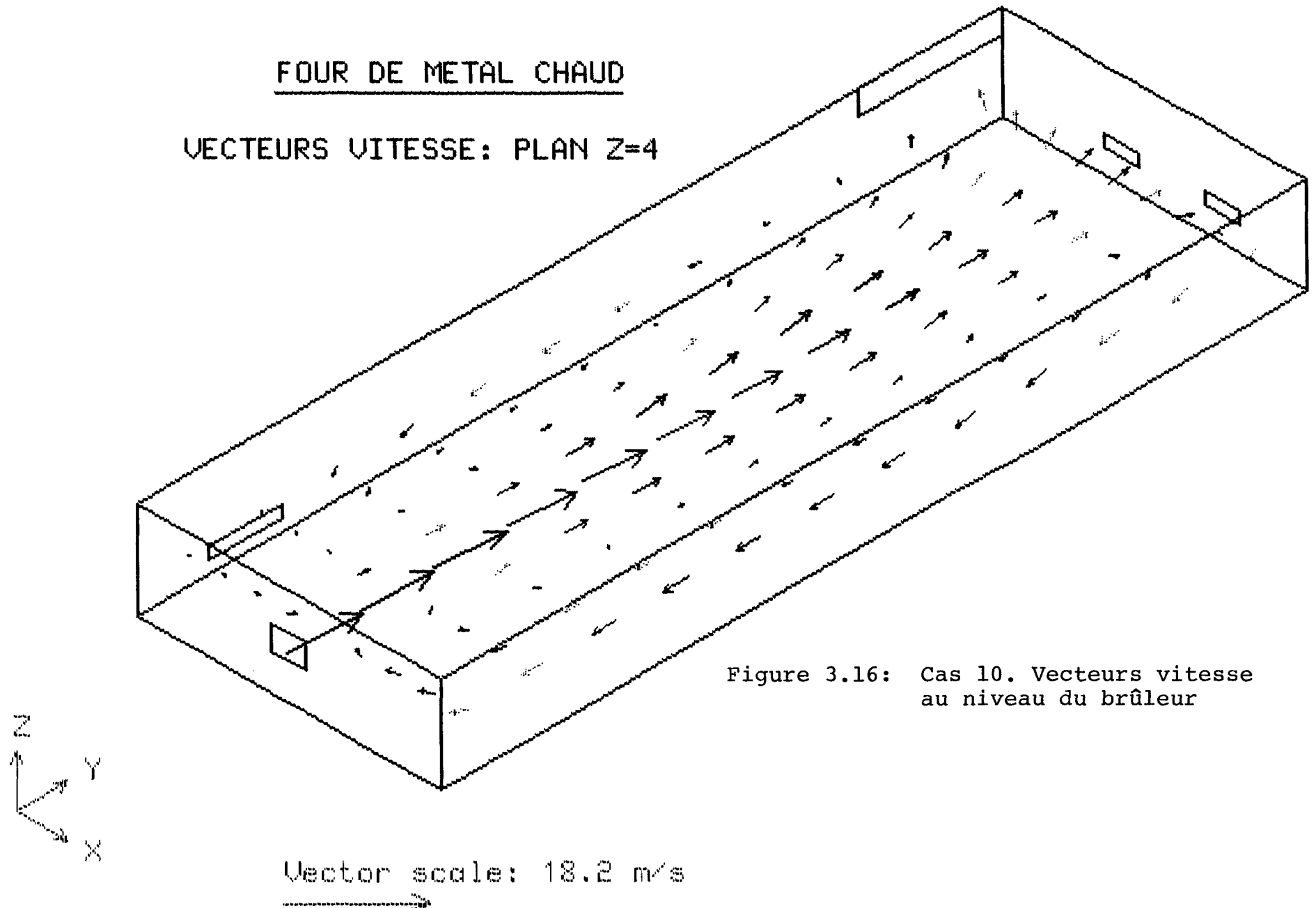


Figure 3.16: Cas 10. Vecteurs vitesse
au niveau du brûleur

456
542
629
716
803
890
976
1063
1150
1237
1324
1410
1497
1584

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=4

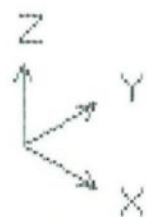
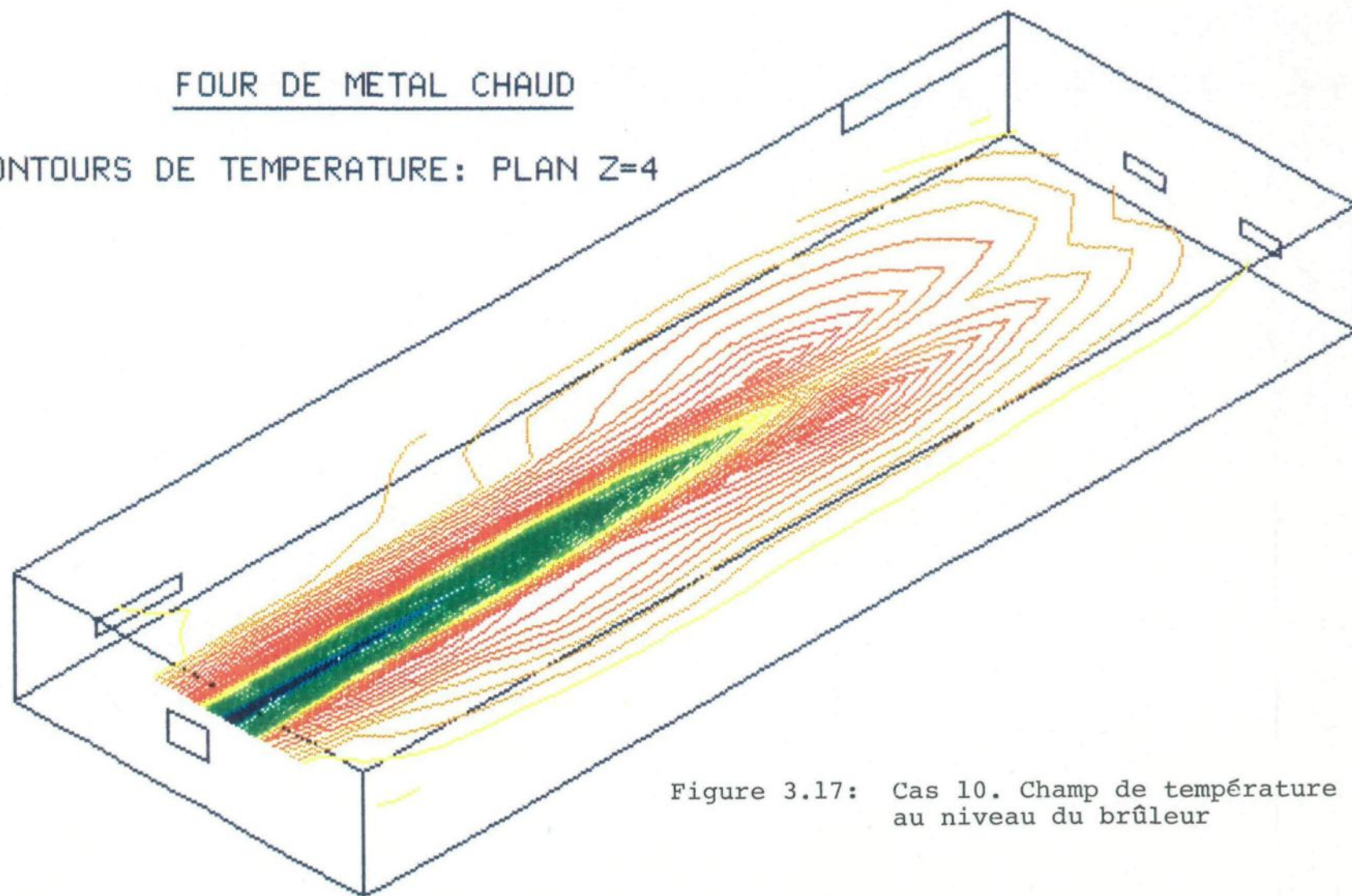


Figure 3.17: Cas 10. Champ de température au niveau du brûleur

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE VITESSE W1: PLAN Y=12

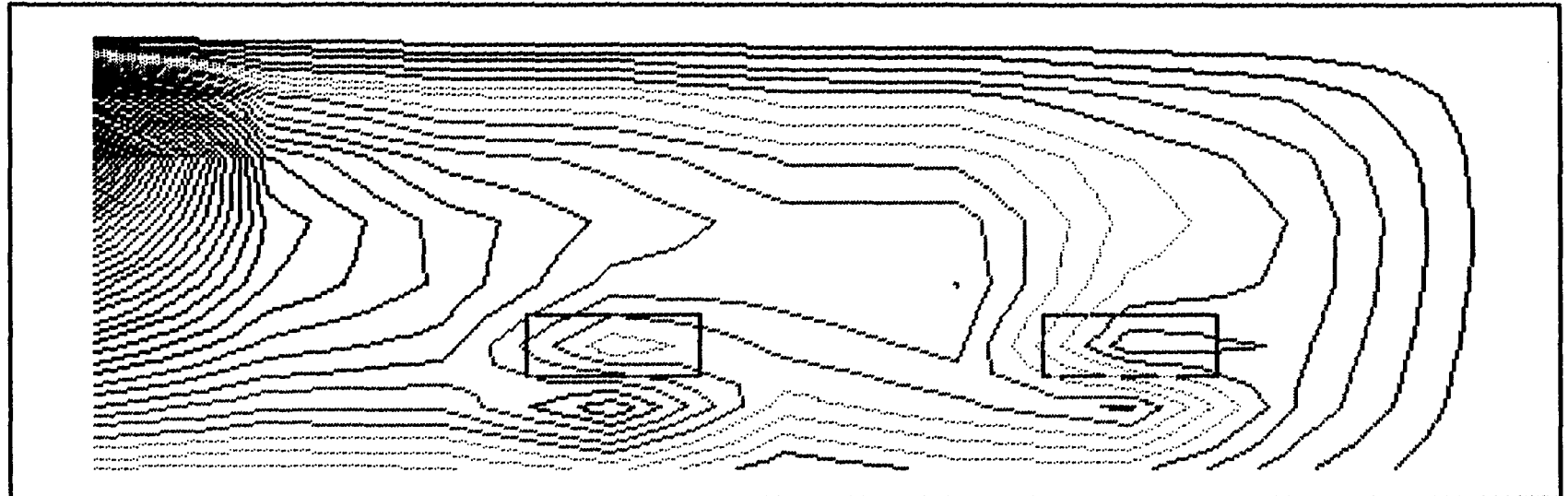


Figure 3.18: Cas 10. Contours de vitesse verticale W_1
à la surface nord de la chambre

TABLEAU 13

BILAN MASSIQUE DU CAS 10

ORIFICE	DÉBIT (kg/s)
Brûleur	+1.752
Carneau	-1.230
Siphon 1	-0.133
Siphon 2	-0.125
Bec de coulée	-0.073
Portes	-0.191
TOTAL	0.0

Le tableau 14 donne les flux de chaleur convectifs et radiatifs pour les différentes surfaces de la chambre. Il est intéressant de noter l'augmentation légère (3%) du flux de chaleur transféré à la surface du métal liquide par rapport au cas 9 sans exfiltration (tableau 10). Cette légère hausse peut s'expliquer par la diminution de la recirculation qui permet d'atteindre une température moyenne un peu supérieure et par conséquent, un flux radiatif plus intense au métal.

3.3.3.2 Avec infiltration

Le cas 11 est similaire au cas 9 à cette différence près que l'on considère maintenant les infiltrations à travers les orifices. La pression relative imposée au carneau d'évacuation est de -13 Pa, de sorte que la majeure partie de la chambre est en légère dépression. On peut retrouver à la figure 3.19 le champ de pression au niveau du brûleur et à la figure 3.20 le champ vertical à la paroi nord de la chambre. Une petite zone en face du siphon 1 est encore sous l'effet d'une surpression. La figure 3.21 donne le champ de vitesse au niveau du brûleur. On aperçoit immédiatement une zone de recirculation plus intense à la droite du brûleur comparativement au cas 9, figure 3.10. Cela s'explique par l'infiltration d'air ambiant à travers le siphon 2 et les portes.

Le tableau 15 donne le bilan massique du cas 11. On remarque l'exfiltration faible au siphon 1 et les fortes infiltrations aux portes, bec de coulée et siphon 2. La figure 3.22 donne la distribution

TABLEAU 14

FLUX DE CHALEUR (kW) POUR LE CAS 10

		PLANCHER (métal)	PLAFOND	CÔTES (brûleur et opposé)	CÔTES (portes et opposé)	TOTAL
CAS 10 avec exfiltration	Convection	244	148	22	31	445
	Radiation	1839	-94*	-16	-4	1725
	TOTAL	2083	54	6	27	2170

* Un signe négatif représente un flux orienté vers
l'intérieur de la chambre

Un signe positif représente un flux orienté vers
l'extérieur.

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE PRESSION: PLAN Z=4

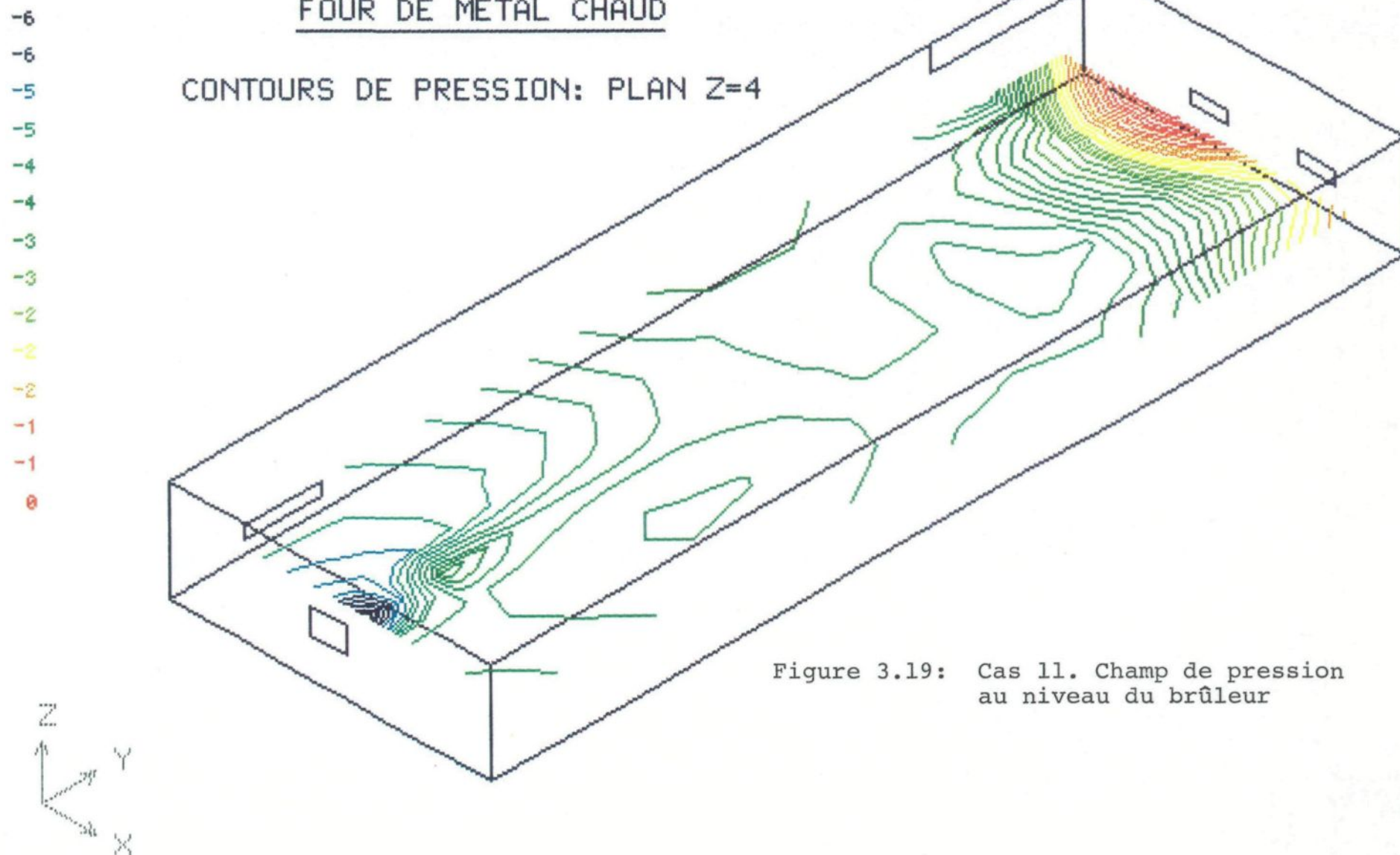


Figure 3.19: Cas 11. Champ de pression
au niveau du brûleur

-13
-12
-11
-10
-9
-8
-7
-6
-5
-3
-2
-1
0
1

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE PRESSION: PLAN Y=12

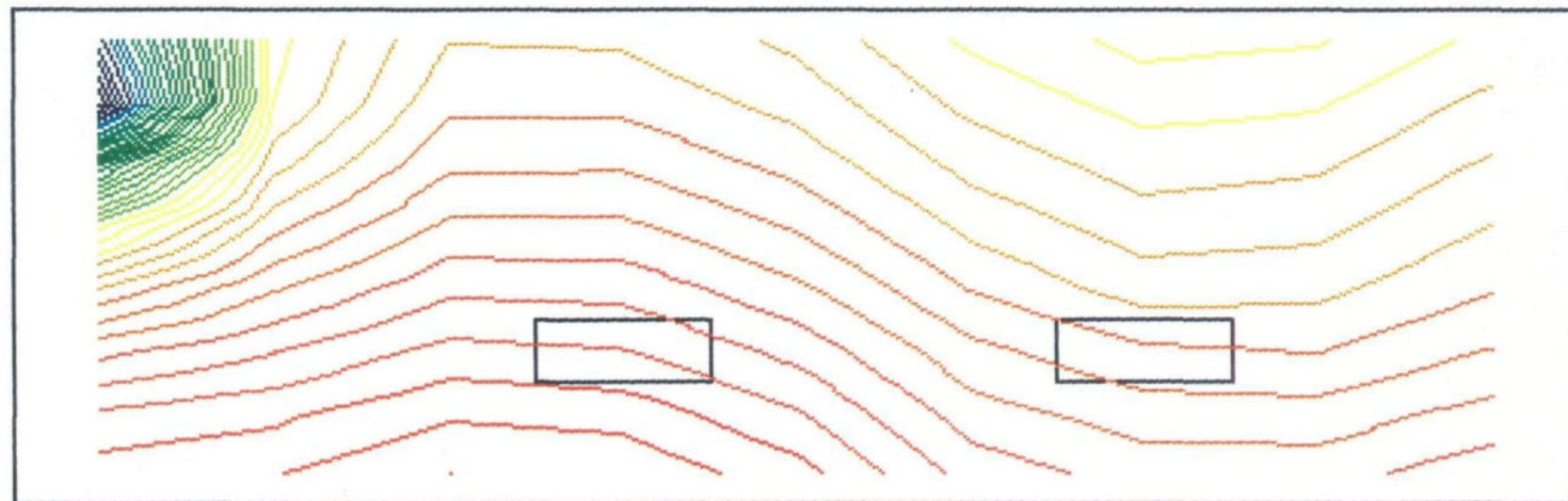
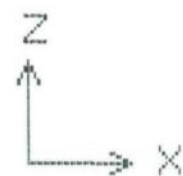


Figure 3.20: Cas 11. Champ de pression à la surface de la paroi nord

FOUR DE METAL CHAUD

VECTEURS VITESSE: PLAN Z=4

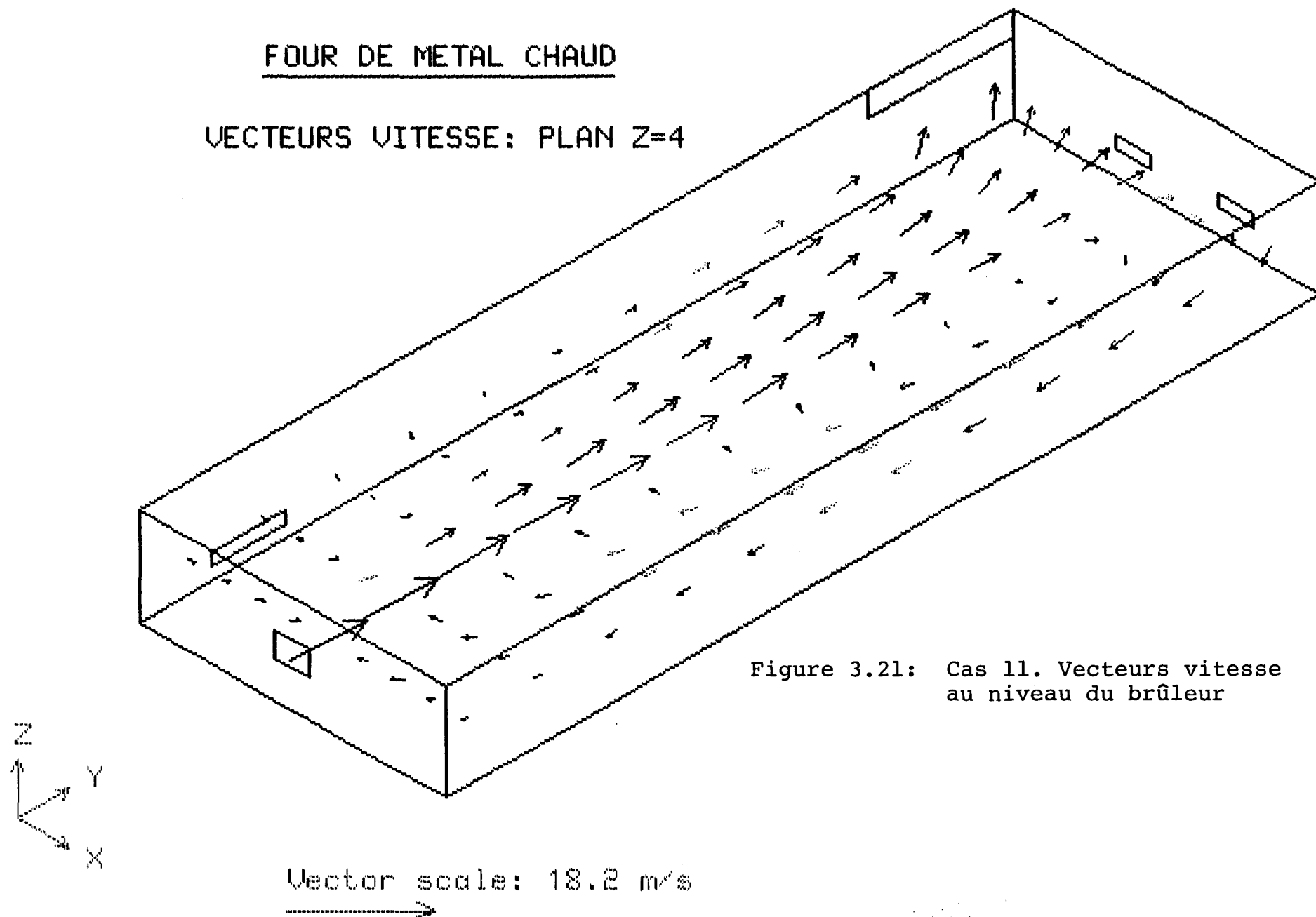


Figure 3.21: Cas 11. Vecteurs vitesse au niveau du brûleur

TABLEAU 15

BILAN MASSIQUE DU CAS 11

ORIFICE	DÉBIT (kg/s)
Brûleur	+1.752
Carneau	-2.338
Siphon 1	-0.026
Siphon 2	+0.109
Bec de coulée	+0.140
Portes	+0.358
TOTAL	0.0

450
535
620
706
791
876
961
1047
1132
1217
1303
1388
1473
1558

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=4

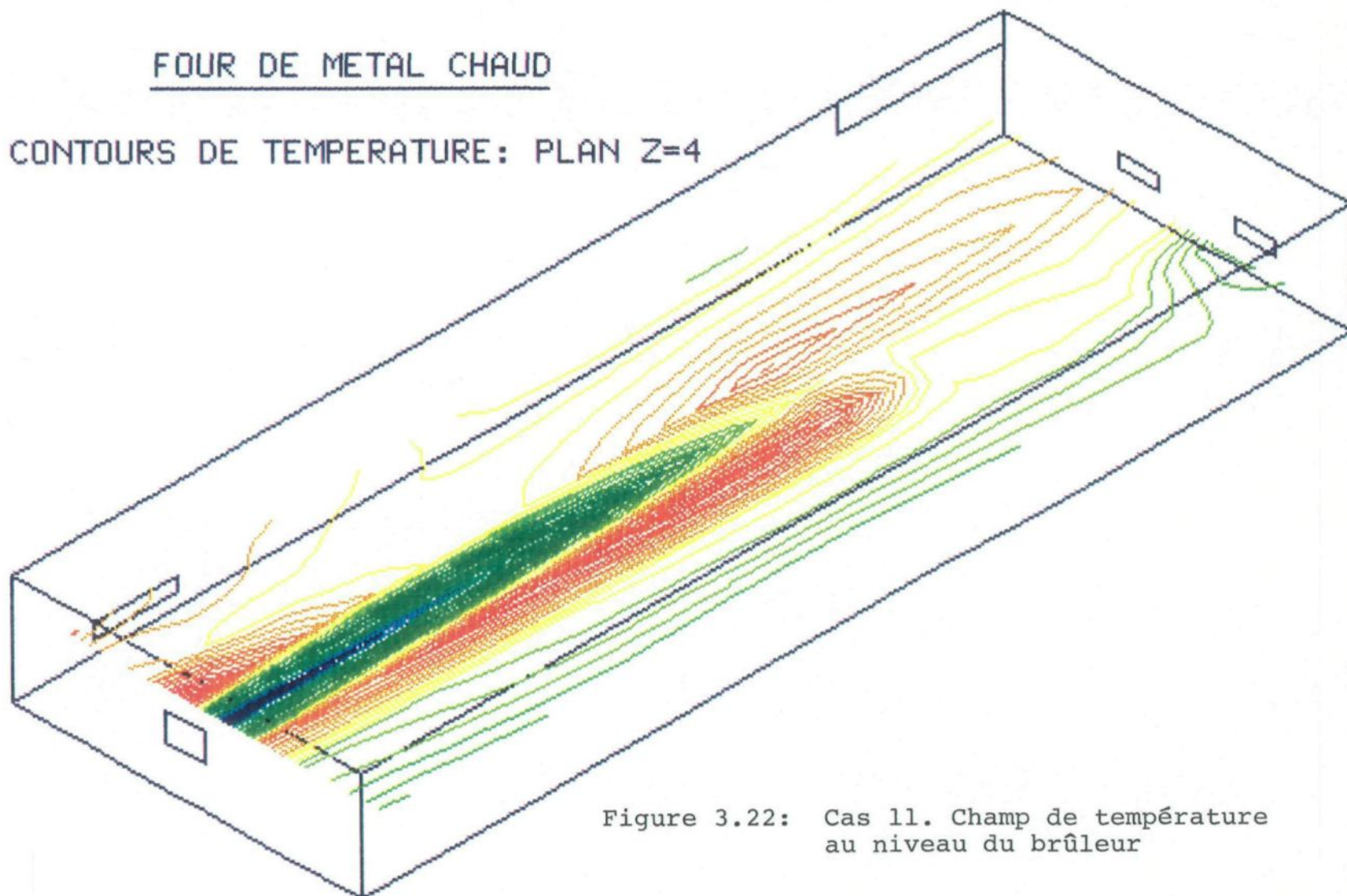


Figure 3.22: Cas 11. Champ de température au niveau du brûleur

de température au niveau du brûleur. La forte baisse de température par rapport au cas 9 est due à la masse d'air frais infiltrée, plus particulièrement le long des portes où les isothermes sont plus serrées. La figure 3.23 représente les températures au niveau des trous de siphon 1 et 2. On remarque l'effet de la masse d'air frais au siphon 2. Le siphon 1 étant en exfiltration, il n'a pas d'influence sur le champ de température, comme on peut aussi le constater à la figure 3.24. La figure 3.25 donne la distribution de température au niveau du bec de coulée, on note encore une fois l'effet de la masse d'air frais.

Le cas 11 est donc très différent des cas précédents au niveau des distributions de température. La convergence des résultats a été difficile à obtenir probablement à cause des contraintes thermiques ou de l'apport de masse dus à l'infiltration. Il a fallu sous-relaxer certaines variables et 700 itérations de PHOENICS ont été nécessaires pour atteindre la convergence.

Le tableau 16 donne les flux de chaleurs obtenus pour le cas 11.

L'énergie transférée à la surface du métal liquide a diminué de plus de 600 kW (30%) par rapport au cas 9. L'infiltration a donc un effet très néfaste sur l'efficacité d'un four de métal chaud, ce qui prouve la nécessité d'un contrôle adéquat et constant de la pression interne dans le four.

689
757
825
893
961
1029
1098
1166
1234
1302
1370
1438
1506
1575

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=3

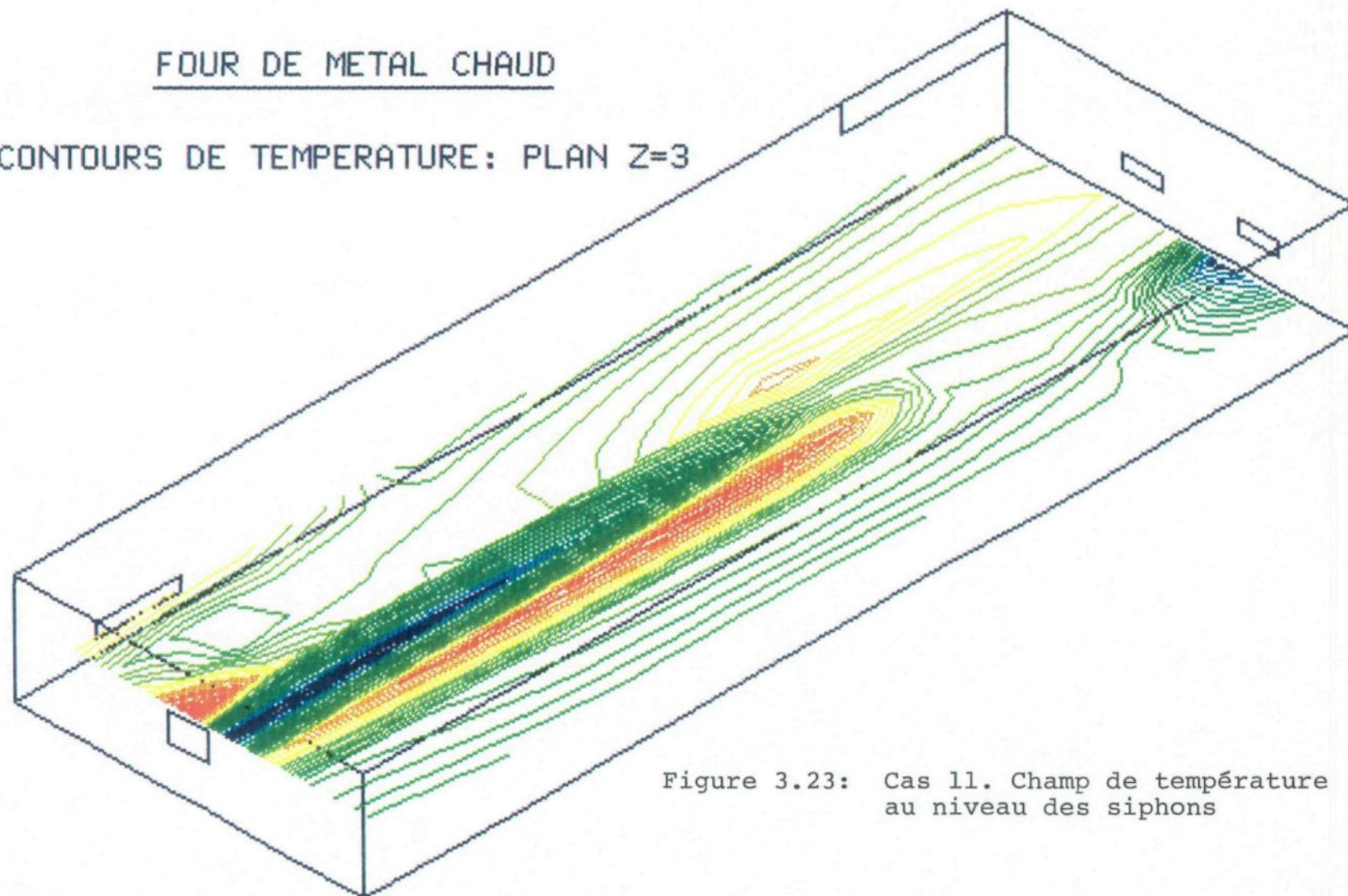


Figure 3.23: Cas 11. Champ de température au niveau des siphons

754
798
841
884
927
970
1013
1057
1100
1143
1186
1229
1272
1316

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Y=12

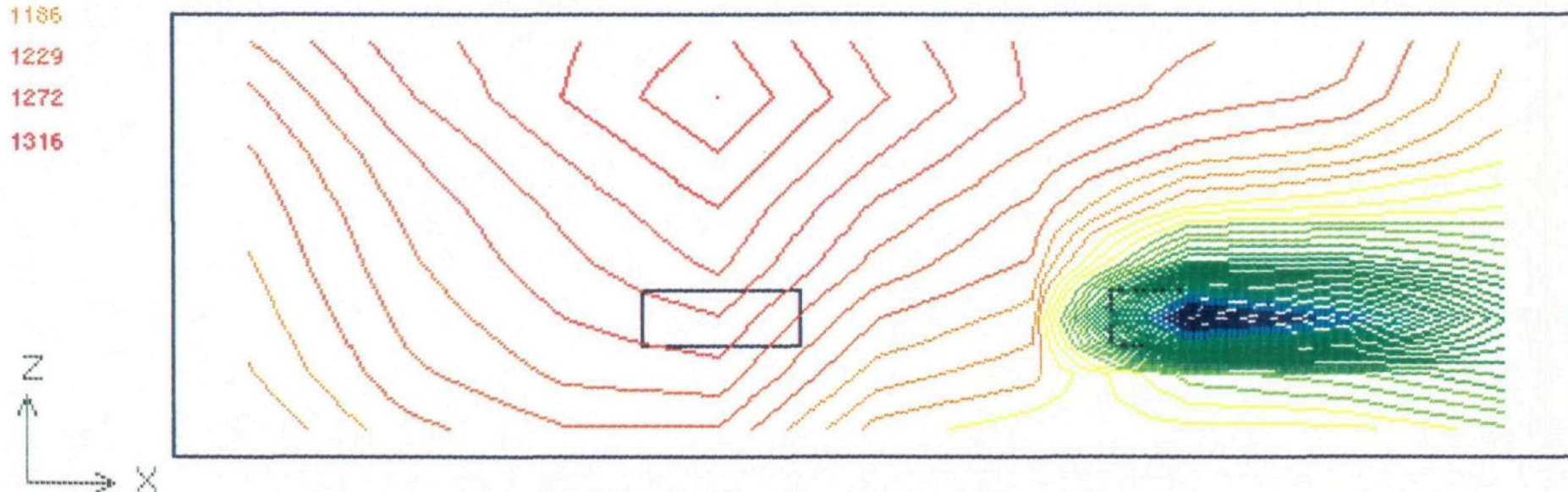


Figure 3.24: Cas 11. Champ de température à la paroi nord de la chambre

554
620
686
752
818
885
951
1017
1083
1149
1215
1281
1347
1413

FOUR DE METAL CHAUD

CONTOURS DE TEMPERATURE: PLAN Z=2

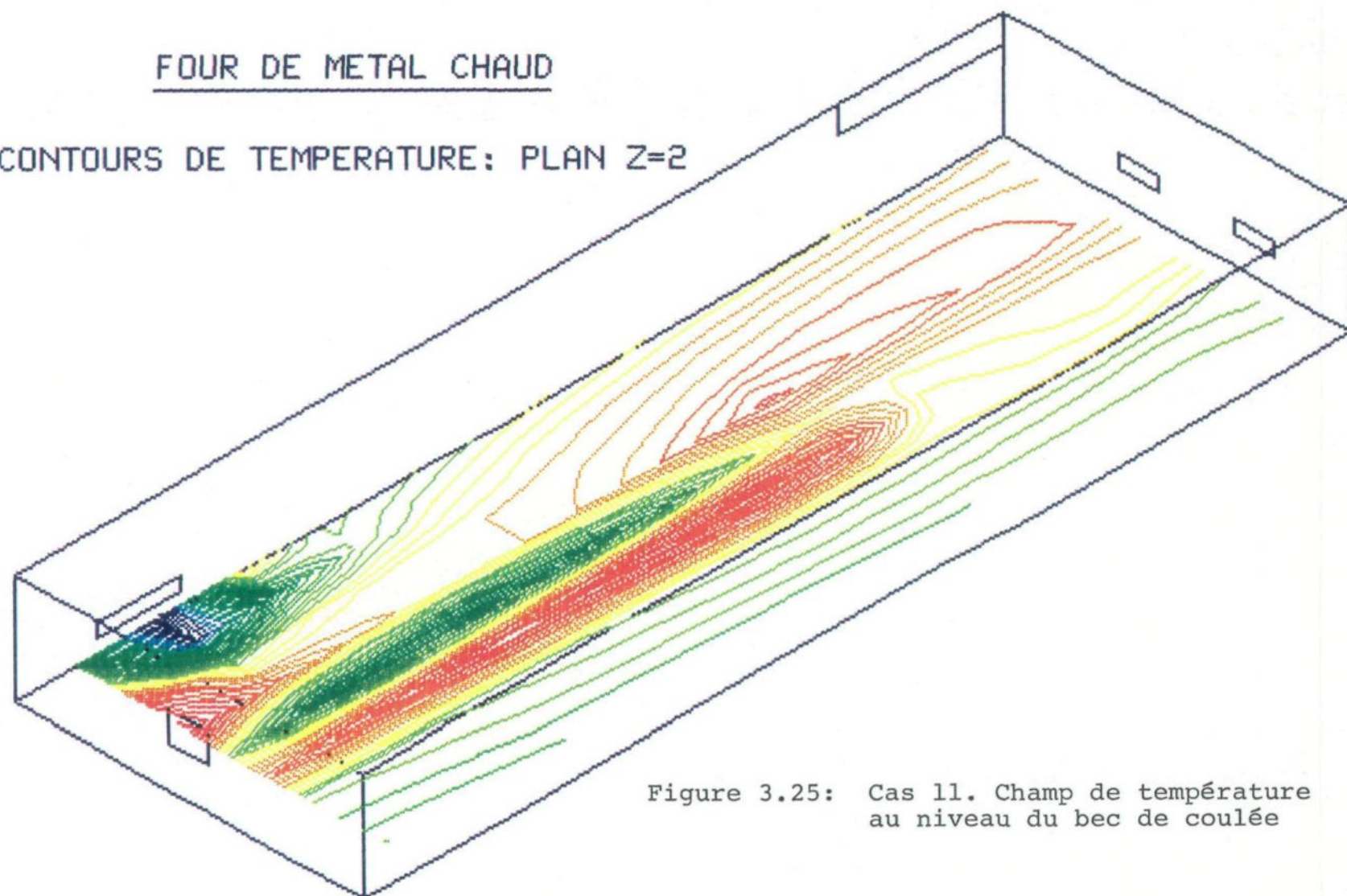


Figure 3.25: Cas 11. Champ de température au niveau du bec de coulée

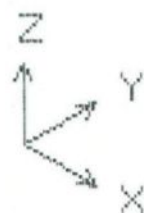


TABLEAU 16

FLUX DE CHALEUR (kW) POUR LE CAS 11

		PLANCHER (métal)	PLAFOND	CÔTÉS (brûleur et opposé)	CÔTÉS (portes et opposé)	TOTAL
CAS 11 INFILTRATION	Convection	124	151	16	9	300
	Radiation	1285	-100*	-10	16	1191
	TOTAL	1409	51	6	25	1491

* Un flux négatif est orienté vers l'intérieur du four

Un flux positif est orienté vers l'extérieur.

Les cas 10 et 11 ont donc permis d'illustrer le comportement de la chambre de combustion en période d'exfiltration et d'infiltration. Si l'exfiltration des gaz de combustion ne semble pas affecter significativement le flux de chaleur total transmis au métal liquide, il en va tout autrement de l'infiltration d'air frais qui diminue drastiquement l'efficacité globale du four de métal chaud.

3.4 DISCUSSION

Le chapitre III présente la deuxième version du couplage PHOENICS-ZONE. Les différentes simulations effectuées permettent d'en évaluer la valeur et de cerner l'impact sur le comportement de la chambre de combustion de certains phénomènes physiques comme l'effet gravitationnel et l'écoulement entre la chambre et son environnement. On peut résumer ainsi les principales constatations effectuées:

- a) Le cas 7 met en évidence la plus grande précision de la version 2.0 du couplage PHOENICS-ZONE par rapport à la version 1.0, l'équation d'énergie étant résolue à partir du maillage fin de PHOENICS. Chaque élément de PHOENICS a maintenant sa propre température et les représentations graphiques par isotherme sont nettement améliorées par rapport à la version 1.0
- b) Le cas 8 souligne l'importance de se doter d'un bon modèle de réaction chimique et génération de chaleur pour bien évaluer et situer les sources énergétiques de combustion. Sans ce modèle, les

distribution de température resteront tributaires des suppositions de l'utilisateur quant à la répartition des sources d'énergie de combustion.

- c) Le cas 9 montre l'influence de l'effet gravitationnel (et de la convection naturelle) sur le comportement de la chambre de combustion. Cet effet est bien visible particulièrement en ce qui concerne les champs de vitesse et de température. Il semble donc recommandé d'activer la force de corps ρg dans les équations de Navier-Stokes.
- d) Le cas 10 illustre le peu d'influence des exfiltrations sur l'énergie totale transmise à la masse de métal liquide. On note même une très légère amélioration qui peut être due à la diminution des masses gazeuses recirculées.
- e) Le cas 11 montre l'influence majeure des infiltrations d'air frais sur le comportement général de la chambre de combustion. On note une baisse importante des températures et de l'énergie transmise au métal. On en déduit l'importance d'un contrôle permanent du niveau de pression à l'intérieur du four.

CHAPITRE IV

CONCLUSION

Deux versions du couplage PHOENICS-ZONE ont été présentées et utilisées pour simuler différentes situations reliées à l'opération de la chambre de combustion d'un four de métal chaud.

La version 1.0 a permis d'établir les faits suivants:

- a) Il est préférable d'utiliser un écoulement chaud, fonction de la température, pour évaluer avec précision les champs de température et les flux radiatifs.
- b) La méthode de zones et la méthode de flux donnent des résultats très semblables en terme de températures et flux radiatifs.

La version 2.0 a mis en évidence:

- a) Une précision accrue par rapport à la version 1.0, l'équation d'énergie étant résolue sur la base du maillage fin de PHOENICS.

- b) La nécessité de se doter d'un sous-modèle de réaction chimique avec génération de chaleur pour bien évaluer et situer les sources d'énergie de combustion.
- c) L'importance de l'effet gravitationnel sur les distributions de vitesse et de température.
- d) L'effet négligeable des exfiltrations sur l'efficacité globale du four.
- e) L'effet important des infiltrations d'air frais sur le comportement général de la chambre de combustion.

Le modèle couplé PHOENICS-ZONE représente donc un outil versatile et performant pour l'analyse détaillée des chambres de combustion.

BIBLIOGRAPHIE

- Dernedde, E., Bourgeois, T., Bui, R.T., Charette, A., 'The Leakage of Air in Horizontal Flue Ring Furnaces', Light Metals, AIME, 1987, pp. 591-595.
- Edwards, J.P., Rosten, H.I., 'Special GROUND and SATLIT Subroutines in Use in the PHOENICS Input Library', Report no TR/125, CHAM Ltd, March 1986.
- Gosman, A.D., Lockwood, F.C., 'Incorporation of a Flux Model for Radiation into a Finite-Difference Procedure for Furnace Calculations', Fourteenth Symposium (International) on Combustion, 1972, pp. 661-671.
- Holdner, D., Tremblay, R., 'Thermal Evaluation of the Arvida No. 5 Casting Centre', rapport interne AR-81/0004, Jonqui re, Alcan International Limitée, Janvier 1982.
- Hottel, H.C., Cohen, E.S., 'Radiant Heat Exchange in a Gas Filled Enclosure: Allowance for Non-uniformity of Gas Temperature', A.I.Ch.E.J., 4(3), 3, 1958.
- Hottel, H.C., Sarofim, A.F., 'Radiative Transfer', McGraw-Hill, New York, 1967.
- Kocaefe, Y.S., Charette, A., Bui, R.T., Stevens, W., 'Predicting Flame Heat Transfer in a Melting Furnace', Light Metals, AIME, 1987, pp. 827-831.
- Kocaefe, Y.S., 'Mathematical Modelling of the Interaction between Flow and Radiative Transfer in Combustion Systems', Master Thesis, University of New Brunswick, Chemical Engineering Department, 1982.
- Kreith, F., Black, W.Z., 'Basic Heat Transfer', Harper and Row, New York, 1980.
- Ouellet, R.,  tude du problème d'ablation   deux dimensions par la méthode des éléments finis de frontière, Thèse de Maîtrise, Universit  du Québec   Chicoutimi, Département des sciences appliquées, 1987.
- Patankar, S.V., 'Numerical Heat Transfert and Fluid Flow', McGraw-Hill, New York, 1980.
- Perron, J., Modélisation mathématique simplifi e d'un four de métal chaud, Thèse de Maîtrise, Universit  du Québec   Chicoutimi, Département des sciences appliquées, 1987.
- Rosten, H.I., Spalding, D.B., 'PHOENICS-Beginner's Guide and User Manuel', Report no TR/100, CHAM Ltd, October 1986.

- Siddall, R.G., 'Flux Methods for the Analysis of Radiant Heat Transfer', Journal of the Institute of Fuel, Vol. 47, June 1974, pp. 101-109.
- 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.
- Stevens, W., 'Energy Study of Kitimat Tilting Furnace No 2', Rapport interne AR-81/0032, Alcan International Limitée, Jonquiére, Octobre 1981.
- Steward, F.R., Kocaefe, Y.S., 'Methods for Determining the Radiative Transfer in a Furnace Chamber Using the Fundamental Equations of Motion and Transport of Heat and Mass', Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conference, vol. 2, 1982, pp. 553-558.
- Steward, F.R., Tennankore, K.N. 'Towards a Finite Difference Solution Coupled with the Zone Method for Radiative Transfer for a Cylindrical Combustion Chamber', J. of Inst. of Energy, 52, 107, 1979.
- Tremblay, J., 'Simulation d'un bain de métal en fusion avec convection naturelle', Thèse de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences appliquées, 1986.
- Tritton, D.J., 'Physical Fluid Dynamics', Van Nostrand Reinhold, New York, 1977.
- Trivic, Dusan, 'Mathematical Modelling of Three Dimensional Turbulent Flow with Combustion and Radiation', Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., 1987.
- Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E., 'Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer' John Wiley and Sons, New York, 1976.

ANNEXE 1

VALIDATION DES MÉCANISMES DE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE COUPLE PHOENICS-ZONE

VALIDATION DES MÉCANISMES DE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE

Même si elle se situe en annexe la validation représente une étape essentielle de la mise au point du modèle couplé PHOENICS-ZONE. On part du principe que les entités PHOENICS et ZONE ont déjà été vérifiées séparément. Il reste à montrer que les mécanismes utilisés pour le couplage sont valides et que les résultats obtenus par les versions 1.0 et 2.0 du modèle couplé correspondent bien aux valeurs obtenues par application directe de la méthode de zones (Kocaeffe 1983).

La procédure à suivre consiste donc à choisir un cas particulier, à le résoudre directement par la méthode de zones en supposant un certain champ de vitesse et à se servir de cette référence pour comparer les résultats obtenus par le modèle couplé PHOENICS-ZONE en imposant le même champ de vitesse. On peut trouver au tableau 17 les principales caractéristiques du cas particulier utilisé pour la validation. On doit noter les faits suivants:

- 1) L'énergie globale de combustion est répartie uniformément entre les huit premières cellules centrales (fig. A1.1).
- 2) L'écoulement supposé est de type frontal (fig. A1.2). La densité du fluide est considérée constante et égale à 0.99 kg/m^3 . La vitesse selon l'axe Y est considérée constante et égale à 0.393 m/s

TABLEAU 17

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU CAS PARTICULIER
UTILISÉ POUR LA VALIDATION

Dimension de la chambre (Lxøxh)	10.75m x 3.75m x 1.2m
Débit air + combustible à l'entrée	1.752 kg/s
Composition des produits de combustion (% volumique)	8.9 CO ₂ , 17.7 H ₂ O, 1.3 O ₂ , 72.1 N ₂
Emissivité des réfractaires	0.6
Emissivité du métal liquide	0.5
Température du mélange gazeux à l'entrée	333 K
Température ambiante	298 K
Température des réfractaires	1 223 K
Température du métal liquide	1 033 K
Energie globale de combustion	4 213 kW
Coefficients de transfert de chaleur par convection	
paroi du brûleur et opposée	50 W/m ² K
autres parois et surface du métal	25 W/m ² K
Maillage utilisé	2x3x6 voir figure A1.1
Distribution de l'énergie de combustion	voir figure A1.1
Distribution de l'écoulement	voir figure A1.2

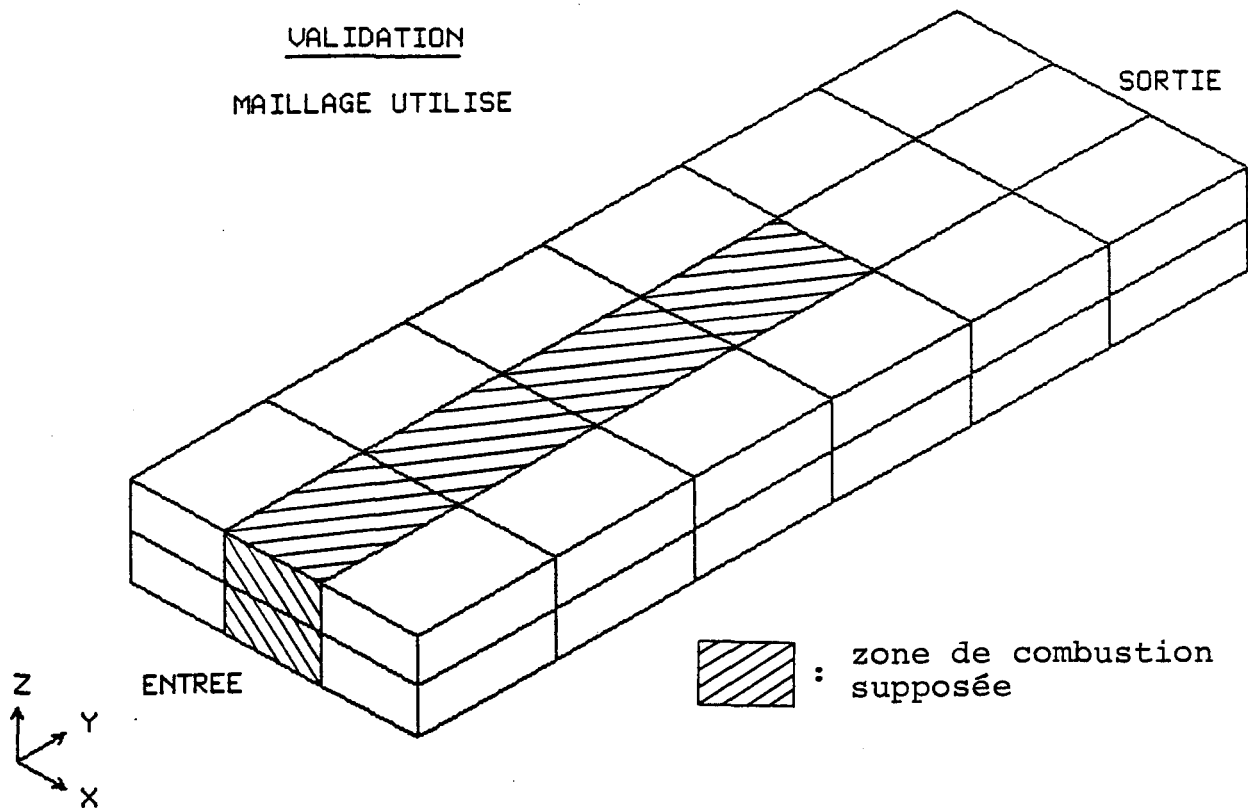


Figure A1.1: Maillage utilisé et distribution supposee de l'énergie de combustion pour la validation

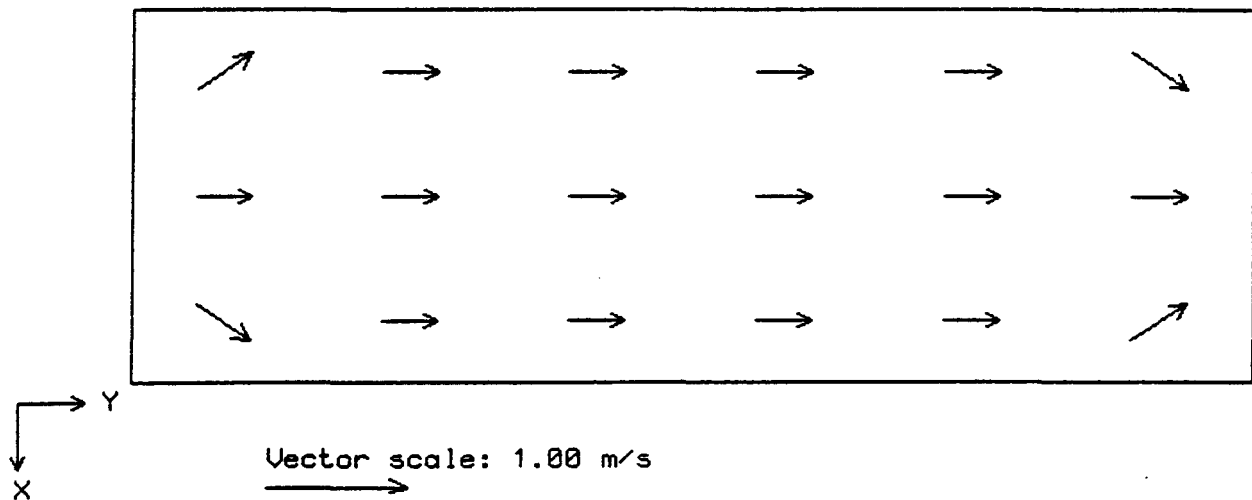


Figure A1.2: Distribution de vitesse supposee pour la validation

pour les plans $Z = 1$ et 2 . Il n'y a pas de transfert de masse entre ces deux plans (les vitesses selon l'axe Z sont nulles).

- 3) Les entrées et sorties du fluide sont opposées et centrées de sorte que l'écoulement est parfaitement symétrique.
- 4) Les maillages de PHOENICS et de ZONE sont identiques: $2 \times 3 \times 6$ éléments.
- 5) Pour chacune des simulations, la chaleur spécifique est fonction de la température.

On peut retrouver au tableau 18 les flux de chaleur et les températures tels que calculés par la méthode de zones développée par Y. Kocaefe. Les tableaux 19 et 20 donnent les mêmes valeurs mais calculées respectivement par les versions 1.0 et 2.0 du modèle couplé.

On peut facilement vérifier qu'il n'existe pas de différence significative entre les 3 simulations, les écarts de température étant inférieurs à 0.7 kelvin pour chacun des 36 éléments de volume du maillage et les écarts de flux inférieurs à 1 kW pour chacune des surfaces considérées. Les erreurs d'arrondissement ou encore la nature itérative du processus de convergence peuvent facilement être la cause de ces très faibles variations.

TABLEAU 18

FLUX DE CHALEUR ET TEMPERATURES OBTENUES
PAR APPLICATION DIRECTE DE LA MÉTHODE DE ZONES

```

RZONE2366.DAT
HEAT TRANSFER TO SURFACES(KW)
1 ROOF
2 FLOOR
3 SIDES TOTAL(DOORS AND OPPOS)
4 SIDES TOTAL(BURNER AND ACROSS)
RADIATIVE  0.25843E+03  0.16911E+04  0.31800E+02  -0.73235E+02
CONVECTIV  0.70421E+02  0.23673E+03  -0.34444E+02  -0.47640E+02
TOTAL      0.32885E+03  0.19278E+04  -0.26438E+01  -0.12088E+03
OVERALL RAD CONV TOTAL
          0.19081E+04      0.22507E+03      0.21332E+04
VOLUME ZONES

```

1	1	1	1060.1
1	1	2	1145.9
1	1	3	1206.2
1	1	4	1236.3
1	1	5	1235.7
1	1	6	1224.0
1	2	1	916.1
1	2	2	1625.0
1	2	3	1827.6
1	2	4	1879.4
1	2	5	1514.3
1	2	6	1293.0
1	3	1	1060.7
1	3	2	1147.0
1	3	3	1204.7
1	3	4	1236.3
1	3	5	1234.9
1	3	6	1224.6
2	1	1	1034.9
2	1	2	1114.1
2	1	3	1173.1
2	1	4	1207.5
2	1	5	1203.6
2	1	6	1191.9
2	2	1	905.5
2	2	2	1612.6
2	2	3	1816.5
2	2	4	1868.8
2	2	5	1497.8
2	2	6	1266.9
2	3	1	1034.5
2	3	2	1114.2
2	3	3	1175.5
2	3	4	1208.1
2	3	5	1203.2
2	3	6	1193.5

TABLEAU 19

FLUX DE CHALEUR ET TEMPÉRATURES OBTENUES
PAR PHOENICS-ZONE version 1.0

RV11.DAT
HEAT TRANSFER TO SURFACES(KW)

1	ROOF				
2	FLOOR				
3	SIDES TOTAL(DOORS AND OPPOS)				
4	SIDES TOTAL(BURNER AND ACROSS)				
	RADIATIVE	0.25875E+03	0.16914E+04	0.32066E+02	-0.73306E+02
	CONVECTIVE	0.70509E+02	0.23682E+03	-0.34322E+02	-0.47653E+02
	TOTAL	0.32926E+03	0.19282E+04	-0.22562E+01	-0.12096E+03

OVERALL	RAD.	CONV.	TOTAL
	0.19089E+04	0.22536E+03	0.21342E+04

AREA AND VOLUME TEMPERATURES (K)

X	Y	Z	VOLUME	X-SURF	Y-SURF	Z-SURF
1	1	1	1060.3	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	2	1146.1	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	3	1206.4	1223.0	1223.0	0.0
1	1	4	1236.4	1223.0	1223.0	0.0
1	1	5	1235.7	1223.0	1223.0	0.0
1	1	6	1224.0	1223.0	1223.0	0.0
1	2	1	916.4	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	2	1625.3	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	3	1827.8	1223.0	1223.0	0.0
1	2	4	1879.4	1223.0	1223.0	0.0
1	2	5	1514.2	1223.0	1223.0	0.0
1	2	6	1291.7	1223.0	1223.0	0.0
1	3	1	1061.4	1223.0	0.0	1223.0
1	3	2	1147.4	1223.0	0.0	1223.0
1	3	3	1205.0	1223.0	0.0	0.0
1	3	4	1236.5	1223.0	0.0	0.0
1	3	5	1234.9	1223.0	0.0	0.0
1	3	6	1224.5	1223.0	0.0	0.0
2	1	1	1035.5	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	2	1114.5	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	3	1173.4	1033.0	1223.0	0.0
2	1	4	1207.6	1033.0	1223.0	0.0
2	1	5	1203.6	1033.0	1223.0	0.0
2	1	6	1191.9	1033.0	1223.0	0.0
2	2	1	905.8	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	2	1613.0	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	3	1816.6	1033.0	1223.0	0.0
2	2	4	1868.9	1033.0	1223.0	0.0
2	2	5	1497.7	1033.0	1223.0	0.0
2	2	6	1265.6	1033.0	1223.0	0.0
2	3	1	1034.7	1033.0	0.0	1223.0
2	3	2	1114.4	1033.0	0.0	1223.0
2	3	3	1175.7	1033.0	0.0	0.0
2	3	4	1208.2	1033.0	0.0	0.0
2	3	5	1203.2	1033.0	0.0	0.0
2	3	6	1193.5	1033.0	0.0	0.0

TABLEAU 20

FLUX DE CHALEUR ET TEMPÉRATURES OBTENUES
PAR PHOENICS-ZONE version 2.0

RV21.DAT
HEAT TRANSFER TO SURFACES(KW)

1	ROOF				
2	FLOOR				
3	SIDES TOTAL(DOORS AND OPPOS)				
4	SIDES TOTAL(BURNER AND ACROSS)				
	RADIATIVE	0.25863E+03	0.16913E+04	0.31995E+02	-0.73306E+02
	CONVECTIVE	0.70506E+02	0.23682E+03	-0.34338E+02	-0.47634E+02
	TOTAL	0.32913E+03	0.19281E+04	-0.23428E+01	-0.12094E+03
	OVERALL				
		0.19086E+04	0.22535E+03	0.21339E+04	

AREA AND VOLUME TEMPERATURES (K)

X	Y	Z	VOLUME	X-SURF	Y-SURF	Z-SURF
1	1	1	1060.5	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	2	1146.2	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	3	1206.4	1223.0	1223.0	0.0
1	1	4	1236.4	1223.0	1223.0	0.0
1	1	5	1235.7	1223.0	1223.0	0.0
1	1	6	1224.0	1223.0	1223.0	0.0
1	2	1	916.8	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	2	1625.3	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	3	1827.7	1223.0	1223.0	0.0
1	2	4	1879.3	1223.0	1223.0	0.0
1	2	5	1514.2	1223.0	1223.0	0.0
1	2	6	1291.6	1223.0	1223.0	0.0
1	3	1	1061.1	1223.0	0.0	1223.0
1	3	2	1147.3	1223.0	0.0	1223.0
1	3	3	1204.9	1223.0	0.0	0.0
1	3	4	1236.4	1223.0	0.0	0.0
1	3	5	1234.9	1223.0	0.0	0.0
1	3	6	1224.5	1223.0	0.0	0.0
2	1	1	1035.3	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	2	1114.4	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	3	1173.3	1033.0	1223.0	0.0
2	1	4	1207.6	1033.0	1223.0	0.0
2	1	5	1203.6	1033.0	1223.0	0.0
2	1	6	1191.8	1033.0	1223.0	0.0
2	2	1	906.2	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	2	1613.0	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	3	1816.6	1033.0	1223.0	0.0
2	2	4	1868.8	1033.0	1223.0	0.0
2	2	5	1497.7	1033.0	1223.0	0.0
2	2	6	1265.5	1033.0	1223.0	0.0
2	3	1	1034.9	1033.0	0.0	1223.0
2	3	2	1114.5	1033.0	0.0	1223.0
2	3	3	1175.7	1033.0	0.0	0.0
2	3	4	1208.2	1033.0	0.0	0.0
2	3	5	1203.2	1033.0	0.0	0.0
2	3	6	1193.5	1033.0	0.0	0.0

Les mécanismes du couplage fonctionnent donc adéquatement pour les deux versions élaborées.

À titre d'exemple, le lecteur peut retrouver dans les pages suivantes le listage des fichiers de contrôle Q1.DAT des versions 1.0 et 2.0 tels qu'utilisés pour cette validation. On donne aussi le fichier de contrôle de ZONE, commun aux deux versions. Pour en comprendre le sens, le lecteur doit se référer à l'annexe 2.

FICHER DE CONTRÔLE DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE VERSION 1.0
UTILISÉ POUR LA VALIDATION

```

THI>TY Q33.DAT
  TALK=F; RUN( 1, 1);VDU= 0
  GROUP 1.
TEXT(3-D MELTING FURNACE)
REAL(VIN)
VIN=1.18
  GROUP 2. Transience; time-step specification
  GROUP 3.
GRDPWR(X,3,3.75,1.0)
  GROUP 4.
GRDPWR(Y,6,10.75,1.0)
  GROUP 5.
GRDPWR(Z,2,1.2,1.0)
  GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
  GROUP 7.
SOLVE(U1,V1,W1,P1)
SOLUTN(P1,Y,Y,Y,N,N,N)
STORE(ENUL)
STORE(RH01)
STORE(TMP1)
  GROUP 8.
  GROUP 9.
ENULA=-2.54E-5;ENULB=1.3714E-7
RH01A=0.99;RH01B=0.0
TMP1=GRND9
RH01=GRND4;ENUL=GRND1
  GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties
  GROUP 11.
  RESTRT(ALL)
FIINIT(TMP1)=1200.
  GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
  GROUP 13.
  **KEEP V1 CONSTANT OVER VOLUME
PATCH(KEEPV1,CELL,1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(KEEPV1,V1,FIXVAL,0.393)
  **INLET
PATCH(INLET,SOUTH,2,2,1,1,1,2,1,1)
COVAL(INLET,P1,FIXFLU,0.99*VIN)
COVAL(INLET,V1,ONLYMS,VIN)
  **OUTLET
PATCH(OUTLET,NORTH,2,2,NY,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(OUTLET,P1,FIXVAL,0.0)
  GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
  GROUP 15.
LSWEEP=50
  GROUP 16. Termination of iterations
  GROUP 17.
RELAX(U1,FALSDT,1.0)
RELAX(V1,FALSDT,1.0)
RELAX(W1,FALSDT,1.0)
RELAX(P1,FALSDT,1.0)
  GROUP 18. Limits on variables or increments to them
  GROUP 19.
USEGRD=T;USEGRX=T;NAMGRD=RADI

```

GROUP 20.
ECHO=F
GROUP 21. Print-out of variables
GROUP 22. Spot-value print-out
GROUP 23. Field print-out and plot control
GROUP 24.
STOP

FICHER DE CONTRÔLE DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE VERSION 2.0
UTILISÉ POUR LA VALIDATION

```

THI>TY Q3.DAT
  TALK=F;RUN( 1, 1);VDU= 0
  GROUP 1.
TEXT(3-D MELTING FURNACE)
REAL(VIN)
VIN=1.18
  GROUP 2. Transience; time-step specification
  GROUP 3.
GRDPWR(X,3,3.75,1.0)
  GROUP 4.
GRDPWR(Y,6,10.75,1.0)
  GROUP 5.
GRDPWR(Z,2,1.2,1.0)
  GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
  GROUP 7.
SOLVE(U1,V1,W1,P1,H1)
SOLUTN(P1,Y,Y,Y,N,N,N)
STORE(ENUL)
STORE(RH01)
STORE(TMP1)
  GROUP 8.
TERMS(H1,N,Y,N,N,Y,N)
HUNIT=1E-3
  GROUP 9.
ENULA=-2.54E-5;ENULB=1.3714E-7
RH01A=0.99;RH01B=0.0
TMP1=GRND8
RH01=GRND4;ENUL=GRND1
PRNDTL(H1)=0.71
  GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties
  GROUP 11.
RESTRT(ALL)
FIINIT(H1)=700.
  GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
  GROUP 13.
  **KEEP V1 CONSTANT OVER VOLUME
PATCH(KEEPV1,CELL,1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(KEEPV1,V1,FIXVAL,0.393)
  **INLET
PATCH(INLET,SOUTH,2,2,1,1,1,2,1,1)
COVAL(INLET,P1,FIXFLU,0.99*VIN)
COVAL(INLET,V1,ONLYMS,VIN)
COVAL(INLET,H1,ONLYMS,35.*1.14)
  **OUTLET
PATCH(OUTLET,NORTH,2,2,NY,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(OUTLET,P1,FIXVAL,0.0)
COVAL(OUTLET,H1,ONLYMS,SAME)
  **WEST WALL
  ** CONVECTION AND OVERALL SOURCES
PATCH(WEST,WEST,1,1,1,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(WEST,H1,FIXFLU,GRND9)
PATCH(EAST,EAST,NX,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(EAST,H1,FIXFLU,GRND9)
PATCH(HIGH,HIGH,1,NX,1,NY,NZ,NZ,1,1)

```

```

COVAL(HIGH,H1,FIXFLU,GRND9)
PATCH(SOUTH,SOUTH,1,NX,1,1,1,NZ,1,1)
COVAL(SOUTH,H1,FIXFLU,GRND9)
PATCH(NORTH,NORTH,1,NX,NY,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(NORTH,H1,FIXFLU,GRND9)
PATCH(LOW,LOW,1,NX,1,NY,1,1,1,1)
COVAL(LOW,H1,FIXFLU,GRND9)
  **RADIATION SOURCE
PATCH(RADSOR,VOLUME,1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
COVAL(RADSOR,H1,FIXFLU,GRND4)
  **COMBUSTION SOURCE
PATCH(COMBUS,VOLUME,2,2,1,4,1,NZ,1,1)
COVAL(COMBUS,H1,FIXFLU,391.83)
  GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
  GROUP 15.
LSWEEP=150
  GROUP 16. Termination of iterations
  GROUP 17.
RELAX(U1,FALSDT,1.0)
RELAX(V1,FALSDT,1.0)
RELAX(W1,FALSDT,1.0)
RELAX(P1,FALSDT,1.0)
RELAX(DEN1,FALSDT,1.0)
RELAX(H1,FALSDT,0.2)
  GROUP 18. Limits on variables or increments to them
VARMIN(H1)=100.
VARMAX(H1)=3000.
  GROUP 19.
USEGRD=T;USEGRX=T;NAMGRD=RADI
  GROUP 20.
ECHO=F
  GROUP 21. Print-out of variables
  GROUP 22. Spot-value print-out
  GROUP 23. Field print-out and plot control
  GROUP 24.
STOP

```

FICHER DE CONTRÔLE DE ZONE (VERSIONS 1.0 ET 2.0)
UTILISÉ POUR LA VALIDATION

THI>TY ZONEA.DAT

3,10

1,1,1

4

1,2,1,3

2,2,1,3

1,2,6,4

2,2,6,4

1.2,3.75,10.75,2,3,6

4,2,1

0.6,0.6,0.6,0.6,0.5,0.6

0.025,0.025,0.05,0.05,0.025,0.025

0.00086,0.0013,0.00075,0.00075,0.00137,0.00137

1223.,1223.,1223.,1223.,1033.,1223.

1,1280.

1,2,2,2,1,4,4213.

333.,298.,0.05,0.05,80

6

1,2,3,4,5,6

0,1.2

2,2,10000,10000,98131,5.67E-11

ANNEXE 2

GUIDE D'UTILISATION DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE

GUIDE D'UTILISATION DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE

Pour pouvoir activer le modèle couplé PHOENICS-ZONE, l'utilisateur doit absolument connaître le fonctionnement du logiciel PHOENICS puisque celui-ci sert de locomotive à l'ensemble. Rosten (1986) et Edwards (1986) donnent un bon aperçu de PHOENICS.

A2.1: LES FICHIERS DE DONNÉES

Trois fichiers de données sont essentiels au fonctionnement du modèle couplé:

- 1- Q1.DAT, le fichier de contrôle de PHOENICS qui contient tous les paramètres reliés à l'écoulement fluide ou au transfert de chaleur. L'utilisateur doit le construire lui-même, en langage PIL (PHOENICS INPUT LANGUAGE) selon les règles syntaxiques propres à tout fichier de contrôle de PHOENICS. L'annexe 1 donne deux exemples de fichier Q1.DAT.
- 2- DATA10.DAT est un fichier de données créé par ZONE et qui contient les aires d'échange dirigé calculées par le sous-programme FACTOR de ZONE. Le très grand nombre d'aires d'échange nécessite leur stockage sur fichier plutôt qu'en mémoire vive. Ce fichier est ouvert sur l'unité logique 33, lu et fermé par ZONE. A chaque fois que l'utilisateur modifie la géométrie de la chambre de combustion le maillage de ZONE ou encore l'émissivité des parois, un nouveau

fichier DATA10.DAT devrait être recalculé. Ce fichier peut alors être conservé et réutilisé pour chaque simulation ayant même géométrie, maillage et émissivité.

- 3- ZONE.DAT est le fichier de contrôle de la méthode de zones. Ce fichier doit contenir tous les paramètres reliés au transfert de chaleur par rayonnement: particularités du maillage de ZONE, émissivités etc. On peut retrouver à l'annexe 1 un exemple de fichier ZONE.DAT. La signification de chacune des variables contenues dans ce fichier est donnée à la section A2.4. Pour être lu, le fichier ZONE.DAT doit être assigné à l'unité logique 55.

A2.2 CONSTRUCTION DU FICHIER Q1.DAT

Il n'est pas dans notre intention d'expliquer en détail la construction des fichiers de contrôle de PHOENICS. Le manuel de l'utilisateur de PHOENICS (Rosten 1986) en donne une description suffisamment détaillée. A l'annexe 1, on retrouve les fichiers Q1.DAT propres aux versions 1.0 et 2.0 du couplage. Certains points méritent d'être soulignés:

- A) Pour la version 1.0 le fichier Q1.DAT doit absolument contenir les instructions suivantes:

GROUPE 9: TMP1 = GRND9

GROUPE 19: NAMGRD = RADI

La première commande indique à PHOENICS comment évaluer la température à partir des températures de ZONE.

La seconde commande sert à appeler le sous-programme RAD1 qui gère les échanges entre ZONE et PHOENICS. On remarque que ce fichier Q1.DAT ne contient que les paramètres reliés à l'écoulement fluide. Les transferts de chaleur sont traités par ZONE et leurs caractéristiques sont données dans le fichier ZONE.DAT.

B) Pour la version 2.0, les commandes suivantes sont essentielles:

 GROUPE 9: TMP1 = GRND8

Cette commande permet d'évaluer les températures à partir des enthalpies.

 GROUPE 13: PATCH (WEST, WEST, 1,1,1,NY,1,NZ,1,1)

 COVAL (WEST,H1, FIXFLU, GRND9)

Pour transférer les flux convectifs internes de ZONE vers PHOENICS. Les termes WEST, EAST, HIGH etc. indiquent de quelle surface il s'agit et doivent être conservés tels quels autrement PHOENICS ne pourra plus déterminer de quelle surface il est question.

 GROUPE 13: PATCH (RADSOR, VOLUME, 1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)

 COVAL (RADSOR, H1, FIXFLU, GRND4)

Cette commande permet de transférer les flux radiatifs calculés par ZONE vers PHOENICS.

GROUPE 19: NAMGRD = RAD1

Pour appeler le sous-programme RAD1 qui gère les échanges d'information entre PHOENICS et ZONE version 2.0.

A2.3: CONSTRUCTION DU FICHIER DATA10.DAT

L'utilisateur n'a pas à se préoccuper du fichier DATA10.DAT, celui-ci étant généré et contrôlé par le sous-programme ZONE. La variable INTER contenue dans le fichier ZONE.DAT permet de calculer un nouveau fichier DATA10.DAT ou d'utiliser une vieille version.

A2.4: CONSTRUCTION DU FICHIER ZONE.DAT

Ce fichier contient les paramètres de contrôle nécessaires au fonctionnement du sous-programme ZONE. Voici la définition de chacune des variables apparaissant dans ce fichier. On peut retrouver à l'annexe 1 un exemple du fichier ZONE.DAT.

```

1      ligne 1:
      variable:  INTER , NISWEEP
      type:      I      I
      format:    1I5    1I5
  
```

INTER: indice définissant le type de simulation effectué par ZONE.
 INTER = 1 → calcul des aires d'échange, des bilans énergétiques et des températures.

INTER = 2 → seules les aires d'échange sont calculées et le programme s'arrête.

INTER = 3 → les aires d'échange sont déjà disponibles sur DATA10.DAT et seuls les bilans énergétiques et températures sont calculés.

NISWEEP: nombre d'itérations effectuées par PHOENICS entre chaque appel de ZONE.

N.B. il est nécessaire pour l'impression des résultats que LSWEET (le nombre total d'itérations effectuées par PHOENICS) soit un multiple de NISWEEP.

2 ligne 2:

variable: NXFAC , NYFAC , NZFAC

type: I I I

format: 1I5 1I5 1I5

NXFAC: rapport entre le nombre de divisions de PHOENICS et le nombre de divisions de ZONE selon l'axe ouest-est.

NYFAC: rapport entre le nombre de divisions de PHOENICS et le nombre de divisions de ZONE selon l'axe sud-nord.

NZFAC: rapport entre le nombre de divisions de PHOENICS et ZONE selon l'axe bas-haut.

3 ligne 3:
 variable: NIO
 type: I
 format: 1I5

NIO: nombre de surfaces du maillage ZONE à travers lesquelles
 s'effectue une entrée ou une sortie de fluide. Suivront NIO
 lignes définissant chaque surface à travers laquelle s'effec-
 tue un transfert de masse.

4 ligne 4 à 7:
 variable: INX(I) , INY(I) , INZ(I) , IOR(I)
 type: I I I I
 format: 1I5 1I5 1I5 1I5

INX(I): indice en X (selon le référentiel ZONE) de la maille qui
 contient la surface I de transfert de masse.

INY(I): indice en Y de la maille qui contient la surface I de trans-
 fert de masse.

INZ(I): indice en Z de la maille qui contient la surface I de trans-
 fert de masse.

IOR(I): orientation de la surface I. Le code utilisé est:

ouest	= 1
est	= 2
sud	= 3
nord	= 4
bas	= 5
haut	= 6

5 ligne 8:

variable:	XXMAX	, YYMAX	, ZZMAX	, IIMAX	, JJMAX	, KKMAX
type:	F	F	F	I	I	I
format:	1F17.7	1F17.7	1F17.7	1I10	1I10	1I10

XXMAX: dimension (m) de la chambre de combustion selon l'axe X (référentiel ZONE).

YYMAX: dimension (m) de la chambre de combustion selon l'axe Y.

ZZMAX: dimension (m) de la chambre de combustion selon l'axe Z.

IIMAX: nombre de divisions de ZONE selon l'axe X.

JJMAX: nombre de divisions de ZONE selon l'axe Y.

KKMAX: nombre de divisions de ZONE selon l'axe Z.

6 ligne 9:

variable:	ISOLID	, IMODEL	, IUNIF
type:	I	I	I
format:	1I10	1I10	1I10

ISOLID: indice décrivant le type de particules solides contenues dans l'écoulement gazeux.

ISOLID = 1 → utilisation du modèle de particules solides non dispersées (suie).

ISOLID = 2 → utilisation du modèle de particules solides dispersées (cendres).

ISOLID = 3 → utilisation du modèle à deux solides (suie et cendres).

ISOLID = 4 → il n'y a pas de particules solides dans l'écoulement gazeux.

IMODEL: indice décrivant le type de modèle utilisé pour déterminer les propriétés radiatives du gaz.

IMODEL = 1 → utilisation du modèle de Hottel et Sarofim

IMODEL = 2 → utilisation du modèle à un gaz gris.

IMODEL = 3 → utilisation du modèle de Smith.

IUNIF: IUNIF = 1 → concentrations uniformes

IUNIF = 2 → concentrations non-uniformes.

7 ligne 10:

variable: EMWE , EMEA , EMSO , EMNO , EMLO, EMHI

type: F F F F F F

format: 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9

Les variables EMWE, EMEA, EMSO, EMNO, EMLO et EMHI représentent les émissivités des surfaces orientées respectivement ouest, est, sud, nord, bas et haut.

8 ligne 11:

variable: HTCWE , HTCEA , HTCSO , HTCNO , HTCLO , HTCHI

type: F F F F F F

format: 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9 1F16.9

Les variables HTCWE, HTCEA, HTCSO, HTCNO, HTCL0, HTCHI représentent les coefficients de transfert de chaleur par convection (en kW/m²K) associés à chacune des surfaces internes orientées respectivement ouest, est, sud, nord, bas et haut.

9 ligne 12:

variable:	OVWE	, OVEA	, OVSO	, OVNO	, OVLO	, OVHI
type:	F	F	F	F	F	F
format:	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9

Les variables OVWE, OVEA, OVSO, OVNO, OVLO et OVHI représentent les coefficients de transfert de chaleur globaux (en kW/m² K) entre l'air ambiant et la surface interne de la chambre de combustion. Ils s'appliquent respectivement aux surfaces orientées ouest, est, sud, nord, bas et haut. N.B. Si une température est fixée alors le coefficient global de transfert correspondant est ignoré.

10 ligne 13:

variable	TEMPWE	, TEMPEA	, TEMPSO	, TEMPNO	, TEMPLO	, TEMPHI
type:	F	F	F	F	F	F
format:	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9	1F16.9

Les variables TEMPWE, TEMPEA, TEMPSO, TEMPNO, TEMPLO et TEMPHI représentent les températures (en degrés K) des surfaces orientées respectivement ouest, est, sud, nord, bas et haut.

N.B.: Ces températures servent de supposition initiale pour les bilans énergétiques aux parois. Elles sont recalculées par ZONE en fonction du coefficient global de transfert de chaleur que l'on impose à ces surfaces. Si l'on désire plutôt fixer et imposer une ou plusieurs de ces températures on procède comme aux lignes 17 et 18.

11 ligne 14:

variable: ICOMB , TMPVOL

type I F

format: 1I10 1F16.7

ICOMB: nombre de zones de combustion considérées. Suivront ICOMB lignes donnant la position et l'énergie produite pour chacune de ces zones.

TMPVOL: température uniforme (en degrés K) supposée du volume gazeux dans la chambre de combustion. Cette température est recalculée par ZONE pour chaque élément du maillage.

12 ligne 15:

variable: IC01(I), IC02(I), JC01(I), JC02(I), KC01(I), KC02(I), QCOMB(

type: I I I I I I F

format: 1I10 1I10 1I10 1I10 1I10 1I10 1F16.

La zone de combustion I s'étend de l'élément IC01 à l'élément IC02 en X, de l'élément JC01 à l'élément JC02 en Y et de l'élément KC01 à

l'élément KC02 en Z. L'énergie totale (kW) libérée dans cette zone est donnée par QCOMB(I).

N.B.: Si cette zone de combustion contient plusieurs éléments volumiques du maillage alors l'énergie totale est répartie uniformément entre chacun de ces éléments.

13 ligne 16:

variable: TIN, TAMB, TOLER1, TOLER2, MAXIT

type: F F F F F

format: 1F14.7 1F14.7 1F14.7 1F14.7 1I10

TIN: Température (K) d'entrée du mélange air-combustible dans la chambre de combustion.

TAMB: température (K) de l'air ambiant.

TOLER1: différence maximale de température (K) permise lors du calcul par la méthode de Newton-Raphson des températures de chaque élément de ZONE. En général, on pose TOLER1 < 1.

TOLER2: différence maximale de température (K) permise lors de l'évaluation de l'erreur moyenne sur tous les éléments de ZONE. En général on pose TOLER2 < 1.

MAXIT: nombre maximal d'itérations permis lors de l'application de la méthode de Newton-Raphson.

14 ligne 17:

variable: NTIMP

type: I

format: 1I10

NTIMP: nombre de surfaces où les températures sont imposées. Il faut
que $NTIMP \leq 6$. Suivront NTIMP orientations de surfaces.

15 ligne 18

variable: IORT(I)

type: I

format: 10I5

IORT(I): orientations des NTIMP surfaces où la température est imposée.

Le code utilisé est: ouest = 1

 est = 2

 sud = 3

 nord = 4

 bas = 5

 haut = 6

16 ligne 19:

variable: ICPC , CPCONS

type: I F

format: 1I10 1F14.5

ICPC: Si ICPC = 1 alors la chaleur spécifique des gaz est considérée constante et égale à CPCONS.

Si ICPC \neq 1 la chaleur spécifique est considérée variable et calculée par ZONE en fonction des constituants chimiques de l'écoulement. La valeur de CPCONS est alors ignorée.

CPCONS: Chaleur spécifique (kJ/kgK) constante des gaz utilisée lorsque ICPC = 1.

17 ligne 20:

variable:	ISXMAX,	JSYMAX,	NBUNA,	NBUNV,	IY,	SIGMA
type:	I	I	I	I	I	E
format:	1I15	1I15	1I15	1I15	1I15	1E10.5

ISXMAX: indice utilisé pour représenter la symétrie ou l'absence de symétrie en direction X.

ISXMAX = 1 \rightarrow symétrie en X

ISXMAX = 2 \rightarrow non symétrique en X.

JSYMAX: indice utilisé pour représenter la symétrie ou l'absence de symétrie en direction Y.

JSYMAX = 1 \rightarrow symétrie en Y

JSYMAX = 2 \rightarrow non symétrique en Y.

NBUNA: nombre de faisceaux d'énergie radiative libérés à partir d'une surface lors de l'application de la méthode de Monte-Carlo.

- NBUNV: nombre de faisceaux d'énergie radiative libérés à partir d'un volume élémentaire lors de l'application de la méthode de Monte-Carlo.
- IY: ''graine'' utilisée par la fonction RAN pour générer des nombres aléatoires. IY est un entier dont la valeur doit être élevée.
- SIGMA: constante de Stefan-Boltzmann ($\text{kW/m}^2 \text{K}^4$).

A2.5 EXÉCUTION DU MODÈLE COUPLÉ PHOENICS-ZONE

La figure A2.1 donne le schéma de fonctionnement lors de l'exécution du modèle couplé PHOENICS-ZONE.

Pour exécuter le modèle couplé, l'utilisateur doit commencer par compiler le fichier GROUNDVI.FOR ou GROUNDV2.FOR (V1 pour version 1.0 et V2 pour 2.0) qui contient les sous-programmes RADI, ZONE, PREPV, PREPT etc. Lors de cette compilation, la librairie PHOENICS et tout ce qu'elle contient doit être accessible.

Il s'agit ensuite de charger le fichier GROUNDV1.OBJ ou GROUNDV2.OBJ ainsi créé avec le module EARTH de PHOENICS en suivant la procédure décrite dans le guide de l'utilisateur de PHOENICS. Le programme EARTH est maintenant prêt à être exécuté.

Il ne reste plus qu'à compiler le fichier Q1.DAT à l'aide du programme PIPPA contenu dans la librairie PHOENICS et à assigner ZONE.DAT à l'unité logique 55. L'utilisateur n'a pas à se soucier de DATA10.DAT celui-ci étant contrôlé par ZONE. On exécute alors le programme EARTH.

Le fichier DF10.DAT est un fichier de transfert qui contient toutes les informations de Q1.DAT une fois compilées et interprétées par le pré-processeur PIPPA.

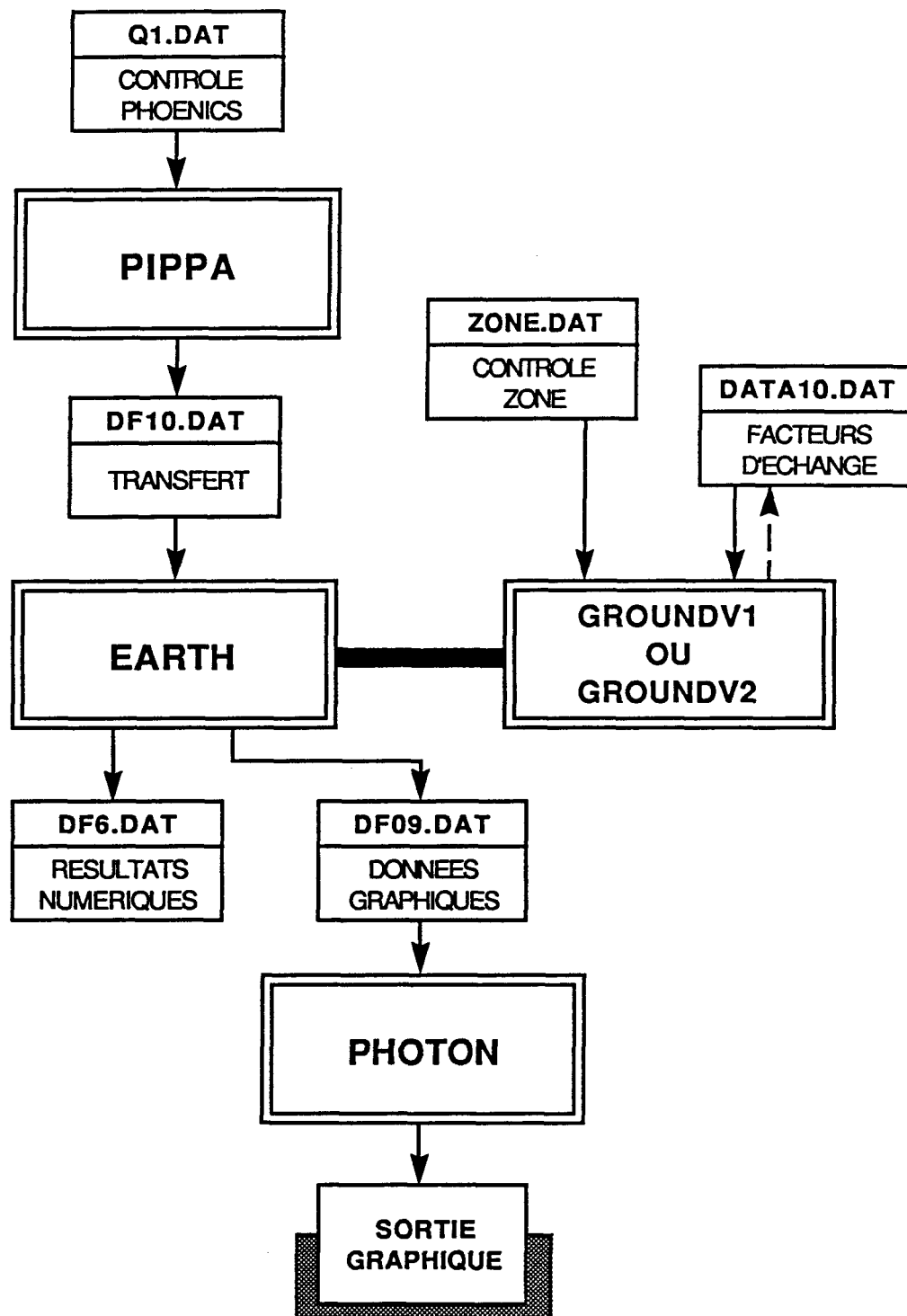


Figure A2.1: Schéma de fonctionnement du modèle couplé PHOENICS-ZONE lors de l'exécution

DF6.DAT contient tous les résultats numériques pour une simulation donnée. Pression, vitesse, température etc. en chaque point du maillage considéré.

DF09.DAT contient toute l'information nécessaire au traitement graphique des résultats par le post-processeur PHOTON inclus dans la librairie PHOENICS. Les sorties graphiques présentées tout au long de ce mémoire ont été obtenues avec PHOTON.

A2.6 LE TEMPS DE CALCUL

Pour donner un ordre de grandeur du temps CPU nécessaire sur un VAX 11/785 pour réaliser une simulation comme le cas 9, section 3.3, mentionnons que ce temps peut varier grandement en fonction:

- a) du nombre total d'itérations de PHOENICS.
- b) du maillage de PHOENICS et de ZONE.
- c) du nombre total d'appels du sous-programme ZONE.
- d) du modèle de gaz utilisé par ZONE (gaz gris, Smith ou Hottel)
- e) du calcul ou non des aires d'échange dirigé.

Pour le cas 9, le maillage de PHOENICS était de $9 \times 12 \times 8$ et le maillage de ZONE de $2 \times 3 \times 6$. 400 itérations de PHOENICS ont permis d'atteindre la convergence. ZONE (gaz gris) a été appelée 40 fois, à toutes les 10 itérations. Les aires d'échange avaient déjà été calculées. Le temps CPU total est de 1 heure 45 minutes 10 secondes. Si l'on calcule les aires d'échange, on peut ajouter une demi-heure CPU pour un grand total d'environ 2 heures 15 minutes.

ANNEXE 3

LISTAGE DES SOUS-PROGRAMMES DE TRANSFERT
ENTRE PHOENICS ET ZONE

SOUS-PROGRAMME PREPV.FOR

THI>TY PREPV.FOR

SUBROUTINE PREPV

COMMON/CFLOW/FLOWX(7,6,10,2),FLOWY(6,7,10,2),FLOWZ(6,6,11,2)

COMMON/CVEL/VELX(10,15,10),VELY(10,15,10),VELZ(10,15,10)

1,DENS(10,15,10)

COMMON/CZONE/INX(20),INY(20),INZ(20),IOR(20),NIO

1,NXFAC,NYFAC,NZFAC,IISWEEP,ILSWEEP,NISWEEP

COMMON/CTRAN/TVOL(10,15,10),NXD,NYD,NZD,AREAX,AREAY,AREAZ

C

C

C

INITIALISATION OF PARAMETERS

NX=NXD

NY=NYD

NZ=NZD

C

C

C

INITIALISATION OF FLOW VALUES

DO 10 I=1,NZ/NZFAC+1

DO 10 J=1,NX/NXFAC+1

DO 10 K=1,NY/NYFAC+1

DO 10 L=1,2

FLOWX(I,J,K,L)=0.0

FLOWY(I,J,K,L)=0.0

FLOWZ(I,J,K,L)=0.0

10 CONTINUE

C

C

C

EVALUATION OF FLOWX VALUES

DO 250 K=NZFAC,NZ-1,NZFAC

NYVAL=1

DO 240 L=1,NY/NYFAC

NXVAL=1

DO 230 M=1,NX/NXFAC

SUMN=0.

SUMP=0.

DO 220 I=NXVAL,NXVAL+NXFAC-1

DO 220 J=NYVAL,NYVAL+NYFAC-1

IF(VELZ(I,J,K).GE.0.) THEN

SUMP=SUMP+DENS(I,J,K)*AREAZ*VELZ(I,J,K)

ENDIF

IF(VELZ(I,J,K).LT.0.) THEN

SUMN=SUMN+DENS(I,J,K+1)*AREAZ*VELZ(I,J,K)

ENDIF

220 CONTINUE

FLOWX((NZ-K)/NZFAC+1,NX/NXFAC-M+1,L,1)=-SUMN

FLOWX((NZ-K)/NZFAC+1,NX/NXFAC-M+1,L,2)=SUMP

NXVAL=NXVAL+NXFAC

230 CONTINUE

NYVAL=NYVAL+NYFAC

240 CONTINUE

250 CONTINUE

C

C

C

EVALUATION OF FLOWY VALUES

```

DO 150 I=NXFAC,NX-1,NXFAC
NZVAL=1
DO 140 L=1,NZ/NZFAC
NYVAL=1
DO 130 M=1,NY/NYFAC
SUMN=0.
SUMP=0.
DO 120 J=NYVAL,NYVAL+NYFAC-1
DO 120 K=NZVAL,NZVAL+NZFAC-1
IF(VELX(I,J,K).GE.0.) THEN
SUMP=SUMP+DENS(I,J,K)*AREAX*VELX(I,J,K)
ENDIF
IF(VELX(I,J,K).LT.0.) THEN
SUMN=SUMN+DENS(I+1,J,K)*AREAX*VELX(I,J,K)
ENDIF
120 CONTINUE
FLOWY(NZ/NZFAC-L+1,(NX-I)/NXFAC+1,M,1)=-SUMN
FLOWY(NZ/NZFAC-L+1,(NX-I)/NXFAC+1,M,2)=SUMP
NYVAL=NYVAL+NYFAC
130 CONTINUE
NZVAL=NZVAL+NZFAC
140 CONTINUE
150 CONTINUE

```

C
C
C

EVALUATION OF FLOWZ VALUES

```

DO 50 J=NYFAC,NY-1,NYFAC
NXVAL=1
DO 40 L=1,NX/NXFAC
NZVAL=1
DO 30 M=1,NZ/NZFAC
SUMN=0.
SUMP=0.
DO 20 I=NXVAL,NXVAL+NXFAC-1
DO 20 K=NZVAL,NZVAL+NZFAC-1
IF(VELY(I,J,K).GE.0.) THEN
SUMP=SUMP+DENS(I,J,K)*AREAY*VELY(I,J,K)
ENDIF
IF(VELY(I,J,K).LT.0.) THEN
SUMN=SUMN+DENS(I,J+1,K)*AREAY*VELY(I,J,K)
ENDIF
20 CONTINUE
FLOWZ(NZ/NZFAC-M+1,NX/NXFAC-L+1,J/NYFAC+1,1)=SUMP
FLOWZ(NZ/NZFAC-M+1,NX/NXFAC-L+1,J/NYFAC+1,2)=-SUMN
NZVAL=NZVAL+NZFAC
30 CONTINUE
NXVAL=NXVAL+NXFAC
40 CONTINUE
50 CONTINUE

```

C
C
C
C

EVALUATE INFLOWS AND OUTFLOWS USING MASS BALANCE ON SPECIFIED CELLS

```

DO 350 M=1,NIO
I=INX(M)

```

```

J=INY(M)
K=INZ(M)
IO=IOR(M)
OUTFL=FLOWX(I,J,K,2)+FLOWX(I+1,J,K,1)+FLOWY(I,J,K,2)
1+FLOWY(I,J+1,K,1)+FLOWZ(I,J,K,2)+FLOWZ(I,J,K+1,1)
FLIN=FLOWX(I,J,K,1)+FLOWX(I+1,J,K,2)+FLOWY(I,J,K,1)
1+FLOWY(I,J+1,K,2)+FLOWZ(I,J,K,1)+FLOWZ(I,J,K+1,2)
DIFF=OUTFL-FLIN
IF(IO.EQ.1.AND.DIFF.LT.0.) FLOWY(I,J+1,K,1)=-DIFF
IF(IO.EQ.1.AND.DIFF.GE.0.) FLOWY(I,J+1,K,2)=DIFF
IF(IO.EQ.2.AND.DIFF.LT.0.) FLOWY(I,J,K,2)=-DIFF
IF(IO.EQ.2.AND.DIFF.GE.0.) FLOWY(I,J,K,1)=DIFF
IF(IO.EQ.3.AND.DIFF.LT.0.) FLOWZ(I,J,K,2)=-DIFF
IF(IO.EQ.3.AND.DIFF.GE.0.) FLOWZ(I,J,K,1)=DIFF
IF(IO.EQ.4.AND.DIFF.LT.0.) FLOWZ(I,J,K+1,1)=-DIFF
IF(IO.EQ.4.AND.DIFF.GE.0.) FLOWZ(I,J,K+1,2)=DIFF
IF(IO.EQ.5.AND.DIFF.LT.0.) FLOWX(I+1,J,K,1)=-DIFF
IF(IO.EQ.5.AND.DIFF.GE.0.) FLOWX(I+1,J,K,2)=DIFF
IF(IO.EQ.6.AND.DIFF.LT.0.) FLOWX(I,J,K,2)=-DIFF
IF(IO.EQ.6.AND.DIFF.GE.0.) FLOWX(I,J,K,1)=DIFF
350 CONTINUE

C
C WRITES THE VALUES OF FLOWX,Y,Z
C
IF(IISWEEP.EQ.ILSWEEP) THEN
DO 260 I=1,NZ/NZFAC+1
DO 260 J=1,NX/NXFAC+1
DO 260 K=1,NY/NYFAC+1
DO 260 L=1,2
C WRITE(6,270) I,J,K,L,FLOWX(I,J,K,L),FLOWY(I,J,K,L)
C 1,FLOWZ(I,J,K,L)
C WRITE(6,*) I,J,K,L,FLOWY(I,J,K,L),VELX(I,J,K)
260 CONTINUE
ENDIF
270 FORMAT(5X,4I5,3F12.6)

C
C MASS FLOW BALANCE ON EACH CELL TO VERIFY
C FLOWX,Y,Z VALUES
C
IF(IISWEEP.NE.ILSWEEP) GO TO 4444
DO 280 I=1,NZ/NZFAC
DO 280 J=1,NX/NXFAC
DO 280 K=1,NY/NYFAC
OUTFL=FLOWX(I,J,K,2)+FLOWX(I+1,J,K,1)+FLOWY(I,J,K,2)
1+FLOWY(I,J+1,K,1)+FLOWZ(I,J,K,2)+FLOWZ(I,J,K+1,1)
FLIN=FLOWX(I,J,K,1)+FLOWX(I+1,J,K,2)+FLOWY(I,J,K,1)
1+FLOWY(I,J+1,K,2)+FLOWZ(I,J,K,1)+FLOWZ(I,J,K+1,2)
DIFF=ABS(OUTFL-FLIN)
IF(DIFF.GT.1E-2) THEN
WRITE(6,285) I,J,K,DIFF
285 FORMAT(4X,'WARNING: UNBALANCED MASS FLOW AT ZONE CELL:',3I3
1,2X,'DIFF=',1F12.4)
ENDIF
C WRITE(6,*) I,J,K,DIFF
280 CONTINUE

```

4444 CONTINUE
RETURN
END

SOUS-PROGRAMME PREPT.FOR

THI>TY PREPT.FOR

```

      SUBROUTINE PREPT
      COMMON/CZONE/INX(10),INY(10),INZ(10),IOR(10),NIO
1,NXFAC,NYFAC,NZFAC,IISWEEP,ILSWEEP,NISWEEP
      COMMON/CTEMP/TEMPV(6,6,10),TEMPX(2,6,10),TEMPY(6,2,10)
1,TEMPZ(6,2,2)
      COMMON/CTRAN/TVOL(10,15,10),NXD,NYD,NZD,AREAX,AREAY,AREAZ
      NX=NXD
      NY=NYD
      NZ=NZD
      DO 30 I=1,NX/NXFAC
      DO 30 J=1,NY/NYFAC
      DO 30 K=1,NZ/NZFAC
      DO 20 L=(I-1)*NXFAC+1,I*NXFAC
      DO 20 M=(J-1)*NYFAC+1,J*NYFAC
      DO 20 N=(K-1)*NZFAC+1,K*NZFAC
      TVOL(NX-L+1,M,NZ-N+1)=TEMPV(K,I,J)
20 CONTINUE
30 CONTINUE
      DO 40 I=1,NX
      DO 40 J=1,NY
      DO 40 K=1,NZ
C      WRITE(6,*) I,J,K,TVOL(I,J,K)
40 CONTINUE
      RETURN
      END

```

SOUS-PROGRAMME PREPTEMP.FOR

THI>TY PREPTEMP.FOR

```

      SUBROUTINE PREPTEMP
      COMMON/CZONE/INX(20),INY(20),INZ(20),IOR(20),NIO
      1,NXFAC,NYFAC,NZFAC,IISWEEP,ILSWEEP,NISWEEP
      COMMON/CTRAN/TVOL(10,15,10),NXD,NYD,NZD,AREAX,AREAY,AREAZ
      COMMON/CTEMP/TEMPV(6,6,10),TEMPX(2,6,10),TEMPY(6,2,10),
      *TEMPZ(6,6,2)
      NX=NXD
      NY=NYD
      NZ=NZD
      TOTN=FLOAT(NXFAC*NYFAC*NZFAC)
      NZVAL=1
      DO 250 L=1,NZ/NZFAC
      NYVAL=1
      DO 240 M=1,NY/NYFAC
      NXVAL=1
      DO 230 N=1,NX/NXFAC
      SUM=0.
      DO 220 K=NZVAL,NZVAL+NZFAC-1
      DO 220 J=NYVAL,NYVAL+NYFAC-1
      DO 220 I=NXVAL,NXVAL+NXFAC-1
      SUM=SUM+TVOL(I,J,K)
220  CONTINUE
      TEMPV(NZ/NZFAC-L+1,NX/NXFAC-N+1,M)=SUM/TOTN
      NXVAL=NXVAL+NXFAC
230  CONTINUE
      NYVAL=NYVAL+NYFAC
240  CONTINUE
      NZVAL=NZVAL+NZFAC
250  CONTINUE
      IF(IISWEEP.EQ.ILSWEEP) THEN
      DO 40 I=1,NZ/NZFAC
      DO 40 J=1,NX/NXFAC
      DO 40 K=1,NY/NYFAC
C      WRITE(6,*) I,J,K,TEMPV(I,J,K)
      40  CONTINUE
      ENDIF
      RETURN
      END

```

SOUS-PROGRAMME PREPQ.FOR

THI>TY PREPQ.FOR

SUBROUTINE PREPQ

COMMON/CZONE/INX(20),INY(20),INZ(20),IOR(20),NIO
 1,NXFAC,NYFAC,NZFAC,IISWEEP,ILSWEEP,NISWEEP
 COMMON/CTRAN/TVOL(10,15,10),NXD,NYD,NZD,AREAX,AREAY,AREAZ
 COMMON/CQRAD/QRADV(6,6,10),QRADX(2,6,10),QRADY(6,2,10),
 *QRADZ(6,6,2)
 COMMON/CQCON/QCX(2,6,10),QCY(6,2,10),QCZ(6,6,2)
 COMMON/CQVOL/QRSOR(10,15,10),QWX(10,15,10),QWY(10,15,10)
 1,QWZ(10,15,10)
 NX=NXD
 NY=NYD
 NZ=NZD

C
C
C

INITIALISATION OF QWALL VALUES

DO 10 I=1,NX
 DO 10 J=1,NY
 DO 10 K=1,NZ
 QWX(I,J,K)=0.0
 QWY(I,J,K)=0.0
 QWZ(I,J,K)=0.0
 10 CONTINUE

C
C
C
C

EVALUATION OF RADIATIVE SOURCES FOR EACH
 VOLUME CELL OF PHOENICS

DO 30 I=1,NX/NXFAC
 DO 30 J=1,NY/NYFAC
 DO 30 K=1,NZ/NZFAC
 DO 20 L=(I-1)*NXFAC+1,I*NXFAC
 DO 20 M=(J-1)*NYFAC+1,J*NYFAC
 DO 20 N=(K-1)*NZFAC+1,K*NZFAC
 QRSOR(NX-L+1,M,NZ-N+1)=QRADV(K,I,J)
 20 CONTINUE
 30 CONTINUE

C
C
C
C

EVALUATION OF SURFACE FLUXES FOR PHOENICS
 Z DIRECTION

DO 70 I=1,NX/NXFAC
 DO 70 J=1,NY/NYFAC
 DO 80 L=(I-1)*NXFAC+1,I*NXFAC
 DO 80 M=(J-1)*NYFAC+1,J*NYFAC
 QWZ(NX-L+1,M,1)=-QCX(2,I,J)
 QWZ(NX-L+1,M,NZ)=-QCX(1,I,J)
 80 CONTINUE
 70 CONTINUE

C
C
C
C

EVALUATION OF SURFACE FLUXES FOR PHOENICS
 X DIRECTION

DO 90 J=1,NY/NYFAC
 DO 90 K=1,NZ/NZFAC

```

DO 100 M=(J-1)*NYFAC+1,J*NYFAC
DO 100 N=(K-1)*NZFAC+1,K*NZFAC
QWX(1,M,NZ-N+1)=-QCY(K,2,J)
QWX(NX,M,NZ-N+1)=-QCY(K,1,J)
100 CONTINUE
90 CONTINUE
C
C   EVALUATION OF SURFACE FLUXES FOR PHOENICS
C   Y DIRECTION
C
DO 110 I=1,NX/NXFAC
DO 110 K=1,NZ/NZFAC
DO 120 L=(I-1)*NXFAC+1,I*NXFAC
DO 120 N=(K-1)*NZFAC+1,K*NZFAC
QWY(NX-L+1,1,NZ-N+1)=-QCZ(K,I,1)
QWY(NX-L+1,NY,NZ-N+1)=-QCZ(K,I,2)
120 CONTINUE
110 CONTINUE
IF(IISWEEP.EQ.ILSWEEP) THEN
DO 40 K=1,NZ/NZFAC
DO 40 I=1,NX/NXFAC
DO 40 J=1,NY/NYFAC
C   WRITE(6,*) K,I,J,QRADV(K,I,J)
40 CONTINUE
DO 50 I=1,NX
DO 50 J=1,NY
DO 50 K=1,NZ
C   WRITE(6,*) I,J,K,QRSOR(I,J,K)
50 CONTINUE
ENDIF
RETURN
END

```

ANNEXE 4

RÉSULTATS NUMÉRIQUES PARTIELS DE LA MÉTHODE
DE ZONES APPLIQUÉE AU CAS 1

 RADIATIVE ZONE MODEL ACTIVATED

T.I.F. AVAILABLE ON DATA10.DAT: RADIATIVE HEAT BAL. PERFORMED
 ZONE SUBROUTINE CALLED AT EVERY 10 PHOENICS SWEEPS
 NO SOLIDS (ASH OR SOOT) IN GAS STREAM
 GRAY GAS MODEL USED FOR GAS RAD. PROPERTIES
 UNIFORM DISTRIBUTION OF CONCENTRATIONS
 CONSTANT HEAT CAPACITY USED (KJ/KG* K): 1.1000

VOLUME DIMENSIONS AND GRID SPECIFICATIONS

	X	Y	Z
DIMENSIONS (M):	1.2000	3.7500	10.7500
NBER OF DIVISIONS:	2	3	6
LENGTH OF DIVISION (M):	0.6000	1.2500	1.7917
PHOENICS-ZONE GRID FACTOR:	2	2	2

INFLOW-OUTFLOW SPECIFIED CELLS

X	Y	Z	ORIENT
1	2	1	3
2	2	1	3
1	3	6	1

BOUNDARY THERMAL PROPERTIES

	WEST 1	EAST 2	SOUTH 3	NORTH 4	LOW 5	HIGH 6
INIT. TEMP. (K):	1223.0	1223.0	1223.0	1223.0	1033.0	1223.0
EMISSIVITIES:	0.600	0.600	0.600	0.600	0.500	0.600
OVERALL H.T.C. (KW/SQM* K):	0.00086	0.00130	0.00075	0.00075	0.00137	0.00137
CONV. H.T.C. (KW/SQM* K):	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

FIXED TEMPERATURE AT BOUNDARY: 1 2 3 4 5 6

COMBUSTION ZONES

X1	X2	Y1	Y2	Z1	Z2	TOT. ENER. (KW)
1	2	2	2	1	4	4213.0

GAS TEMPERATURE AT INLET (K): 333.0

INITIAL GAS TEMPERATURE (K): 1600.0
 AMBIENT TEMPERATURE (K): 298.0
 RAD. HEAT BAL. PERFORMED ON 36. AREA AND VOL. ZONES
 TOLERANCE ON EACH TEMPERATURE DIFF. (K): 0.2
 TOLERANCE ON AVERAGE TEMPERATURE DIFF. (K): 0.2
 MAXIMUM NBER OF ITER. IN NEWTON-RAPHSON METHOD: 60
 NBER OF AREA AND VOLUME BUNDLES: 10000 10000
 STEFAN-BOLTZMANN CONS. (KW/SQM*K**4):.56700E-10
 RANDOM FUNCTION SEED: 98131

OVERALL ITER:CONVERGED

ITER NO. AVER.ERROR MAX.ERROR 9 0.17E+00 0.83E+00

NET ENERGY FOR VOLUME ZONES

X	Y	Z	RAD.(KW)	CONV.(KW)	TOTAL(KW)	PERCENT CONV.
1	1	1	-0.14117E+02	0.00000E+00	-0.14117E+02	0.0
1	1	2	-0.19924E+02	0.00000E+00	-0.19924E+02	0.0
1	1	3	-0.25063E+02	0.00000E+00	-0.25063E+02	0.0
1	1	4	-0.10425E+02	0.00000E+00	-0.10425E+02	0.0
1	1	5	-0.19927E+02	0.00000E+00	-0.19927E+02	0.0
1	1	6	-0.36958E+02	0.00000E+00	-0.36958E+02	0.0
1	2	1	0.45601E+02	0.00000E+00	0.45601E+02	0.0
1	2	2	-0.77520E+02	0.00000E+00	-0.77520E+02	0.0
1	2	3	-0.23821E+03	0.00000E+00	-0.23821E+03	0.0
1	2	4	-0.37655E+03	0.00000E+00	-0.37655E+03	0.0
1	2	5	-0.18724E+03	0.00000E+00	-0.18724E+03	0.0
1	2	6	-0.97907E+02	0.00000E+00	-0.97907E+02	0.0
1	3	1	0.19349E+02	0.00000E+00	0.19349E+02	0.0
1	3	2	-0.11351E+01	0.00000E+00	-0.11351E+01	0.0
1	3	3	-0.18608E+01	0.00000E+00	-0.18608E+01	0.0
1	3	4	-0.20501E+02	0.00000E+00	-0.20501E+02	0.0
1	3	5	-0.37606E+02	0.00000E+00	-0.37606E+02	0.0
1	3	6	-0.41886E+02	0.00000E+00	-0.41886E+02	0.0
2	1	1	-0.14325E+02	0.00000E+00	-0.14325E+02	0.0
2	1	2	-0.19980E+02	0.00000E+00	-0.19980E+02	0.0
2	1	3	-0.24143E+02	0.00000E+00	-0.24143E+02	0.0
2	1	4	-0.87127E+01	0.00000E+00	-0.87127E+01	0.0
2	1	5	-0.19934E+02	0.00000E+00	-0.19934E+02	0.0
2	1	6	-0.38428E+02	0.00000E+00	-0.38428E+02	0.0
2	2	1	0.43664E+02	0.00000E+00	0.43664E+02	0.0
2	2	2	-0.70399E+02	0.00000E+00	-0.70399E+02	0.0
2	2	3	-0.22833E+03	0.00000E+00	-0.22833E+03	0.0
2	2	4	-0.36858E+03	0.00000E+00	-0.36858E+03	0.0
2	2	5	-0.18591E+03	0.00000E+00	-0.18591E+03	0.0
2	2	6	-0.97296E+02	0.00000E+00	-0.97296E+02	0.0
2	3	1	0.13438E+02	0.00000E+00	0.13438E+02	0.0
2	3	2	-0.35724E+01	0.00000E+00	-0.35724E+01	0.0
2	3	3	-0.21949E+01	0.00000E+00	-0.21949E+01	0.0
2	3	4	-0.21232E+02	0.00000E+00	-0.21232E+02	0.0
2	3	5	-0.38445E+02	0.00000E+00	-0.38445E+02	0.0
2	3	6	-0.41320E+02	0.00000E+00	-0.41320E+02	0.0

NET ENERGY FOR AREA ZONES ON X SURFACE

X	Y	Z	RAD.(KW)	CONV.(KW)	TOTAL(KW)	PERCENT CONV.
1	1	1	-0.19894E+02	0.00000E+00	-0.19894E+02	0.0
1	1	2	-0.47070E+01	0.00000E+00	-0.47070E+01	0.0
1	1	3	0.19049E+02	0.00000E+00	0.19049E+02	0.0
1	1	4	0.28626E+02	0.00000E+00	0.28626E+02	0.0
1	1	5	0.18993E+02	0.00000E+00	0.18993E+02	0.0
1	1	6	0.13418E+02	0.00000E+00	0.13418E+02	0.0
1	2	1	-0.35354E+02	0.00000E+00	-0.35354E+02	0.0
1	2	2	0.63301E+01	0.00000E+00	0.63301E+01	0.0
1	2	3	0.67741E+02	0.00000E+00	0.67741E+02	0.0
1	2	4	0.11061E+03	0.00000E+00	0.11061E+03	0.0
1	2	5	0.63130E+02	0.00000E+00	0.63130E+02	0.0
1	2	6	0.27954E+02	0.00000E+00	0.27954E+02	0.0
1	3	1	-0.29487E+02	0.00000E+00	-0.29487E+02	0.0
1	3	2	-0.11731E+02	0.00000E+00	-0.11731E+02	0.0
1	3	3	0.12102E+02	0.00000E+00	0.12102E+02	0.0
1	3	4	0.32395E+02	0.00000E+00	0.32395E+02	0.0
1	3	5	0.25732E+02	0.00000E+00	0.25732E+02	0.0
1	3	6	0.13000E+02	0.00000E+00	0.13000E+02	0.0
2	1	1	0.65169E+02	0.00000E+00	0.65169E+02	0.0
2	1	2	0.78242E+02	0.00000E+00	0.78242E+02	0.0
2	1	3	0.98684E+02	0.00000E+00	0.98684E+02	0.0
2	1	4	0.10835E+03	0.00000E+00	0.10835E+03	0.0
2	1	5	0.98443E+02	0.00000E+00	0.98443E+02	0.0
2	1	6	0.88587E+02	0.00000E+00	0.88587E+02	0.0
2	2	1	0.54603E+02	0.00000E+00	0.54603E+02	0.0
2	2	2	0.90275E+02	0.00000E+00	0.90275E+02	0.0
2	2	3	0.14000E+03	0.00000E+00	0.14000E+03	0.0
2	2	4	0.17406E+03	0.00000E+00	0.17406E+03	0.0
2	2	5	0.13690E+03	0.00000E+00	0.13690E+03	0.0
2	2	6	0.10551E+03	0.00000E+00	0.10551E+03	0.0
2	3	1	0.56495E+02	0.00000E+00	0.56495E+02	0.0
2	3	2	0.72905E+02	0.00000E+00	0.72905E+02	0.0
2	3	3	0.93152E+02	0.00000E+00	0.93152E+02	0.0
2	3	4	0.10746E+03	0.00000E+00	0.10746E+03	0.0
2	3	5	0.10214E+03	0.00000E+00	0.10214E+03	0.0
2	3	6	0.93540E+02	0.00000E+00	0.93540E+02	0.0

NET ENERGY FOR AREA ZONES ON Y SURFACE

X	Y	Z	RAD.(KW)	CONV.(KW)	TOTAL(KW)	PERCENT CONV.
1	1	1	-0.50112E+01	0.00000E+00	-0.50112E+01	0.0
1	1	2	0.20333E+01	0.00000E+00	0.20333E+01	0.0
1	1	3	0.13089E+02	0.00000E+00	0.13089E+02	0.0
1	1	4	0.16283E+02	0.00000E+00	0.16283E+02	0.0
1	1	5	0.13446E+02	0.00000E+00	0.13446E+02	0.0
1	1	6	0.98134E+01	0.00000E+00	0.98134E+01	0.0
1	2	1	-0.94997E+01	0.00000E+00	-0.94997E+01	0.0
1	2	2	-0.16656E+01	0.00000E+00	-0.16656E+01	0.0
1	2	3	0.96869E+01	0.00000E+00	0.96869E+01	0.0
1	2	4	0.18347E+02	0.00000E+00	0.18347E+02	0.0

1	2	5	0.16489E+02	0.00000E+00	0.16489E+02	0.0
1	2	6	0.11359E+02	0.00000E+00	0.11359E+02	0.0
2	1	1	-0.81955E+01	0.00000E+00	-0.81955E+01	0.0
2	1	2	-0.56824E+00	0.00000E+00	-0.56824E+00	0.0
2	1	3	0.10796E+02	0.00000E+00	0.10796E+02	0.0
2	1	4	0.15441E+02	0.00000E+00	0.15441E+02	0.0
2	1	5	0.10310E+02	0.00000E+00	0.10310E+02	0.0
2	1	6	0.65703E+01	0.00000E+00	0.65703E+01	0.0
2	2	1	-0.12837E+02	0.00000E+00	-0.12837E+02	0.0
2	2	2	-0.36235E+01	0.00000E+00	-0.36235E+01	0.0
2	2	3	0.69511E+01	0.00000E+00	0.69511E+01	0.0
2	2	4	0.16590E+02	0.00000E+00	0.16590E+02	0.0
2	2	5	0.14946E+02	0.00000E+00	0.14946E+02	0.0
2	2	6	0.83939E+01	0.00000E+00	0.83939E+01	0.0

NET ENERGY FOR AREA ZONES ON Z SURFACE

X	Y	Z	RAD.(KW)	CONV.(KW)	TOTAL(KW)	PERCENT CONV.
1	1	1	-0.30790E+01	0.00000E+00	-0.30790E+01	0.0
1	1	2	0.72029E+01	0.00000E+00	0.72029E+01	0.0
1	2	1	-0.85781E+01	0.00000E+00	-0.85781E+01	0.0
1	2	2	0.12738E+02	0.00000E+00	0.12738E+02	0.0
1	3	1	-0.66503E+01	0.00000E+00	-0.66503E+01	0.0
1	3	2	0.74090E+01	0.00000E+00	0.74090E+01	0.0
2	1	1	-0.59383E+01	0.00000E+00	-0.59383E+01	0.0
2	1	2	0.43052E+01	0.00000E+00	0.43052E+01	0.0
2	2	1	-0.10743E+02	0.00000E+00	-0.10743E+02	0.0
2	2	2	0.10502E+02	0.00000E+00	0.10502E+02	0.0
2	3	1	-0.87999E+01	0.00000E+00	-0.87999E+01	0.0
2	3	2	0.62929E+01	0.00000E+00	0.62929E+01	0.0

HEAT TRANSFER TO SURFACES(KW)

1 ROOF

2 FLOOR

3 SIDES TOTAL(DOORS AND OPPOS)

4 SIDES TOTAL(BURNER AND ACROSS)

RADIATIVE	0.33791E+03	0.17645E+04	0.15914E+03	0.46618E+01
CONVECTIVE	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
TOTAL	0.33791E+03	0.17645E+04	0.15914E+03	0.46618E+01

OVERALL	RAD.	CONV.	TOTAL
	0.22662E+04	0.00000E+00	0.22662E+04

EXIT CP: 1.10 EXIT TEMP. (K): 1342.0

AREA AND VOLUME TEMPERATURES (K)

X	Y	Z	VOLUME	X-SURF	Y-SURF	Z-SURF
1	1	1	1239.0	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	2	1275.7	1223.0	1223.0	1223.0
1	1	3	1315.4	1223.0	1223.0	0.0

1	1	4	1295.0	1223.0	1223.0	0.0
1	1	5	1305.3	1223.0	1223.0	0.0
1	1	6	1330.0	1223.0	1223.0	0.0
1	2	1	1019.8	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	2	1399.5	1223.0	1223.0	1223.0
1	2	3	1653.5	1223.0	1223.0	0.0
1	2	4	1802.0	1223.0	1223.0	0.0
1	2	5	1596.2	1223.0	1223.0	0.0
1	2	6	1452.0	1223.0	1223.0	0.0
1	3	1	1129.4	1223.0	0.0	1223.0
1	3	2	1220.5	1223.0	0.0	1223.0
1	3	3	1253.6	1223.0	0.0	0.0
1	3	4	1321.5	1223.0	0.0	0.0
1	3	5	1347.5	1223.0	0.0	0.0
1	3	6	1343.0	1223.0	0.0	0.0
2	1	1	1229.8	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	2	1266.3	1033.0	1223.0	1223.0
2	1	3	1306.3	1033.0	1223.0	0.0
2	1	4	1288.9	1033.0	1223.0	0.0
2	1	5	1296.0	1033.0	1223.0	0.0
2	1	6	1322.0	1033.0	1223.0	0.0
2	2	1	1010.5	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	2	1381.1	1033.0	1223.0	1223.0
2	2	3	1638.8	1033.0	1223.0	0.0
2	2	4	1792.4	1033.0	1223.0	0.0
2	2	5	1590.6	1033.0	1223.0	0.0
2	2	6	1448.2	1033.0	1223.0	0.0
2	3	1	1133.8	1033.0	0.0	1223.0
2	3	2	1216.1	1033.0	0.0	1223.0
2	3	3	1251.3	1033.0	0.0	0.0
2	3	4	1318.7	1033.0	0.0	0.0
2	3	5	1341.0	1033.0	0.0	0.0
2	3	6	1335.3	1033.0	0.0	0.0

TOTAL HEAT FLUXES

X	Y	Z	VOLUME (KW/M**3)	X-SURF (KW/SQM)	Y-SURF (KW/SQM)	Z-SURF (KW/SQM)
1	1	1	-0.10506E+02	-0.88831E+01	-0.46616E+01	-0.41054E+01
1	1	2	-0.14827E+02	-0.21018E+01	0.18914E+01	0.96038E+01
1	1	3	-0.18651E+02	0.85055E+01	0.12175E+02	0.00000E+00
1	1	4	-0.77584E+01	0.12782E+02	0.15147E+02	0.00000E+00
1	1	5	-0.14829E+02	0.84807E+01	0.12508E+02	0.00000E+00
1	1	6	-0.27503E+02	0.59911E+01	0.91287E+01	0.00000E+00
1	2	1	0.33936E+02	-0.15786E+02	-0.88370E+01	-0.11438E+02
1	2	2	-0.57689E+02	0.28265E+01	-0.15494E+01	0.16984E+02
1	2	3	-0.17727E+03	0.30247E+02	0.90111E+01	0.00000E+00
1	2	4	-0.28023E+03	0.49389E+02	0.17067E+02	0.00000E+00
1	2	5	-0.13934E+03	0.28188E+02	0.15339E+02	0.00000E+00
1	2	6	-0.72861E+02	0.12482E+02	0.10567E+02	0.00000E+00
1	3	1	0.14399E+02	-0.13166E+02	0.00000E+00	-0.88671E+01
1	3	2	-0.84472E+00	-0.52381E+01	0.00000E+00	0.98787E+01
1	3	3	-0.13848E+01	0.54035E+01	0.00000E+00	0.00000E+00

1	3	4	-0.15257E+02	0.14465E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
1	3	5	-0.27986E+02	0.11490E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
1	3	6	-0.31171E+02	0.58048E+01	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	1	-0.10660E+02	0.29099E+02	-0.76237E+01	-0.79178E+01
2	1	2	-0.14869E+02	0.34936E+02	-0.52859E+00	0.57403E+01
2	1	3	-0.17967E+02	0.44064E+02	0.10043E+02	0.00000E+00
2	1	4	-0.64839E+01	0.48378E+02	0.14363E+02	0.00000E+00
2	1	5	-0.14835E+02	0.43956E+02	0.95903E+01	0.00000E+00
2	1	6	-0.28598E+02	0.39555E+02	0.61119E+01	0.00000E+00
2	2	1	0.32494E+02	0.24381E+02	-0.11941E+02	-0.14324E+02
2	2	2	-0.52390E+02	0.40309E+02	-0.33707E+01	0.14003E+02
2	2	3	-0.16992E+03	0.62513E+02	0.64661E+01	0.00000E+00
2	2	4	-0.27430E+03	0.77720E+02	0.15432E+02	0.00000E+00
2	2	5	-0.13835E+03	0.61125E+02	0.13903E+02	0.00000E+00
2	2	6	-0.72406E+02	0.47110E+02	0.78082E+01	0.00000E+00
2	3	1	0.10000E+02	0.25226E+02	0.00000E+00	-0.11733E+02
2	3	2	-0.26585E+01	0.32553E+02	0.00000E+00	0.83906E+01
2	3	3	-0.16334E+01	0.41593E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
2	3	4	-0.15801E+02	0.47981E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
2	3	5	-0.28611E+02	0.45609E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
2	3	6	-0.30750E+02	0.41767E+02	0.00000E+00	0.00000E+00

FLIT RUN NUMBER = 1

✓ COMPLETED AT 09:44:04 ON TUESDAY,31 MARCH 1987

MACHINE-CLOCK TIME OF RUN = 117 SECONDS.

1E/(VARIABLES*CELLS*STEPS*SWEEPS*ITS) = 7.523E-03

NORMAL STOP REACHED IN PROGRAM