

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR

AKRÉ SIMONE ANNE ADJA

**DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE PROCÉDÉ POUR ANALYSER LA
PERFORMANCE D'UN FOUR HORIZONTAL DE CUISSON D'ANODES**

Mai 2018

DÉDICACE

A mes parents, avec tout mon amour.

AVANT-PROPOS

Le projet de recherche de maîtrise a porté sur le développement d'un modèle de procédé dynamique pour l'analyse de la performance d'un four de cuisson d'anodes horizontal. Il a été réalisé dans le cadre des activités de la Chaire de recherche industrielle entre l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et l'Aluminerie Alouette Inc. (AAI). Cette chaire exerçait particulièrement dans le cadre de projet sur l'utilisation du carbone pour la production de l'aluminium de première fusion. Ce projet a consisté en le développement d'un modèle de procédé de la cuisson des anodes dans des fours horizontaux et la réalisation d'une étude paramétrique dans le but d'améliorer la performance de ces fours. Ainsi, la simulation devient moins coûteuse que les campagnes expérimentales. Les résultats sont présentés en majorité sous formes de données normalisées en raison de la confidentialité qui implique la chaire.

RÉSUMÉ

La production des anodes de carbone utilisées dans les cuves d'électrolyse pour la réduction de l'alumine est très complexe et énergivore. Leur cuisson a lieu dans des fours spécialisés dont le fonctionnement nécessite beaucoup d'attention afin d'en améliorer la performance. C'est dans cette optique que s'inscrit le présent projet de recherche rendu compte tout au long de ce mémoire. Cependant, l'évaluation des coûts de travaux pour la recherche de moyens d'amélioration a orienté cette étude vers la modélisation mathématique du procédé comme outil de travail. Ce projet fait partie des travaux réalisés dans le cadre des activités de la Chaire de recherche UQAC-AAI sur le carbone.

Le modèle de procédé développé au cours de cette étude nous a permis d'évaluer les effets de plusieurs paramètres qui interviennent dans le fonctionnement des fours. Ceux-ci jouent un rôle important dans la qualité des anodes de carbone parce que la cuisson est la dernière étape où les propriétés des anodes sont fixées. Le modèle est basé sur la solution des équations des bilans de masse et d'énergie dans les différentes parties du four. L'écoulement des gaz a été considéré bidirectionnel, une simplification qui est réaliste, mais qui a aussi permis d'éviter la solution complexe des équations de la quantité de mouvement. L'approche simplifiée utilisée dans ce modèle a réduit le temps de calcul tout en permettant la représentation de tous les phénomènes importants du procédé de cuisson des anodes. L'intérêt fut porté vers les paramètres énergétiques de cuisson des anodes que représentent la quantité de carburant injectée et la quantité de matières volatiles contenus dans les anodes. L'impact de certains paramètres de caractéristiques géométriques et physiques des fours de cuissons a été également évalué.

Les résultats obtenus ont été consolidés par les travaux antérieurs sur d'autres fours en général. Ainsi, cette analyse a été enrichissante car elle a permis de prévoir l'effet que certains paramètres pourraient engendrer sur la cuisson des anodes. De même, à l'issue de cette étude, il est plus aisé de prédire le comportement d'un four de cuisson en fonctionnement sous des contraintes de productions différentes. Elle a toutefois permis d'approfondir nos connaissances du point de vue énergétiques et de mieux comprendre le procédé de cuisson des anodes de carbones dans les fours.

ABSTRACT

The production of carbon anodes used in electrolysis cells for the reduction of alumina is highly complex and energy-intensive. These carbon anodes are baked in specialized furnaces, which require a great deal of attention in order to improve their performance. It is with this principle in mind that this research project has been carried out in this master's thesis. The assessment, based on the cost, of work required for the improvement of the furnace operation has oriented this project towards the mathematical modeling of the process as a working tool. This master's project is part of the work carried out within the framework of the activities of the UQAC-AAI research chair on carbon.

The process model developed during this study allowed the evaluation of the effects of several parameters entailed in the operation of baking furnaces. These play an important role in the quality of baked carbon anodes because baking is the last step where the anode properties are fixed. The model is based on the solution of the mass and heat balance equations in different parts of the furnace. The gas flow was considered two dimensional, a simplification that is realistic and also one that allowed avoiding the complex solution of momentum equations. The simplified approach used in this model helped reduce the computation time while allowing the representation of all important phenomena of the anode baking process. The focus was kept on the energy parameters of anode baking, which are represented by the quantity of fuel injected and the amount of volatile matter contained in the anodes. The impact of some parameters of geometrical and physical characteristics of the baking furnaces was also evaluated.

The results obtained have been corroborated by previous works on other horizontal furnaces in general. This analysis was worthwhile because it allowed predicting the effect that

certain parameters could have on the baking of anodes. Also, with the model developed, it is now possible to predict the behavior of a baking furnace in operation under constraints of different production scenarios. This work has enriched our knowledge from the point of view of energy use as well as in terms of a better understanding of the anode baking process in these furnaces.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	ii
AVANT-PROPOS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
NOMENCLATURE.....	xv
REMERCIEMENTS	xvii
Chapitre 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1-1. Introduction.....	1
1-2. Problématique	3
1-3. Objectifs de l'étude	6
1-4. Méthodologie	7
1-5. Contenu du mémoire.....	8
Chapitre 2	9
REVUE DE LA LITTERATURE.....	9
2-1. Introduction.....	9
2-2. Industrie de l'aluminium primaire : Sa production.....	9
2-2.1. Fabrication de l'aluminium primaire.....	11
2-2.2. Production des anodes de carbones.....	14
2-3. Fours de cuisson d'anodes	26
2-3.1. Technologie des fours de cuisson : type et constitutions	27
2-3.2. Opérations liées à l'exploitation du four durant la cuisson.....	32
2-4. Travaux d'améliorations des fours de cuisson d'anodes.....	43

2-4.1. Simulation du procédé de cuisson.....	43
2-4.2. Simulation du contrôle du four.....	58
Chapitre 3	60
MODÈLE DE PROCÉDÉ DYNAMIQUE DE CUISSON DES ANODES	60
3-1. Introduction	60
3-2. Description du modèle de procédé développé	60
3-2.1. Caractéristiques du modèle	60
3-2.2. Équations mathématiques.....	63
3.3. Discrétisation des équations du modèle	70
3.4. Architecture du modèle	72
Chapitre 4	76
RESULTATS ET DISCUSSION	76
4-1. Introduction.....	76
4-2. Validation du modèle développé.....	78
4-3. Influence du débit de carburant.....	79
4-4. Influence des volatiles.....	95
4-5 Influence du diamètre hydraulique	111
4-6. Influence de la conductivité thermique des matériaux.....	120
Chapitre 5	134
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	134
5-1. Conclusions	134
5-2. Recommandations	136
REFERENCES.....	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1: Valeurs et méthodes de détermination des propriétés du brai de houille [3].....	15
Tableau 2-2: Valeurs et méthode de détermination des propriétés du coke de pétrole calciné [3].	15
Tableau 2-3: Impact des impuretés du coke de pétrole [3]	17
Tableau 2-4 : Propriétés standards des anodes précuites [3].....	26
Tableau 2-5 : Définitions et rôle des rampes constituant un feu de cuisson [3, 51]	34
Tableau 2-6 : Modèles (de procédé et de design) tirés de la littérature.....	45
Tableau 4-1 : Plans de présentation des résultats de l'étude paramétrique (voir les figures 4-1 et 4-2)	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Four horizontal de cuisson d'anodes (vue du dessus) [11]	3
Figure 1-2 : Répartition typique des coûts de production de l'aluminium jusqu'à la fin du 20ième siècle [3]	4
Figure 2-1 : Schéma du cycle de production de l'aluminium [15]	10
Figure 2-2 : Schémas des cuves d'électrolyse de l'aluminium : a) Technologie à anodes précuites [22] ; b) Technologie Soderberg [23].....	13
Figure 2-3: Schéma montrant le processus de cuisson des anodes de carbone dans un four	19
Figure 2-4 : Répartition de l'apport d'énergie lors de la combustion d'une tonne d'anode [3]	22
Figure 2-5 : Dépense d'énergie dans un four de cuisson par tonnes d'anodes produites [3]	23
Figure 2-6 : Four vertical de cuisson d'anodes (Rhiedhammer) [48].....	29
Figure 2-7: Four horizontal de cuisson d'anodes [49]	30
Figure 2-8: Représentation schématique d'une alvéole et d'une cloison dans un four horizontal [50]	31
Figure 2-9:Aperçu de la disposition des équipements et la distribution de la température à l'intérieur d'un four horizontal à un moment donné [3].....	33
Figure 2-10: Schéma d'une zone de refroidissement montrant le sens de circulation d'air (chaud en orangée et froid en bleu) [3]	36
Figure 2-11: Étapes typiques de permutation des rampes d'un feu disposant d'une seule rampe d'aspiration.....	38
Figure 2-12: Procédures de permutation avec une rampe de soufflage de rechange [3].....	39
Figure 2-13: Exemple typique de système de contrôle de procédé de cuisson d'anodes [3].....	42
Figure 2-14 : Profils de cuisson des anodes avec diminution du débit d'aspiration des gaz [58] ..	47
Figure 2-15 : Subdivision d'une coupe transversale d'un four [58]	48
Figure 2-16: Discrétisation des modèles de gaz et de solide montrant les volumes de contrôle [59]	50
Figure 2-17 : Profils de température des anodes et du mur calculés en comparaison avec les profils expérimentaux [59]	50
Figure 2-18 : Représentation schématique de la structure du modèle globale [65]	54
Figure 3-1: Représentation schématique de l'écoulement du gaz à travers la cloison le long du four	61



Figure 3-2 : Représentation schématique d'un four annulaire à ciel ouvert [84].....	61
Figure 3-3 : Représentation schématique détaillée d'un four horizontal [84].....	64
Figure 3-4: Vue en trois dimensions d'un volume de contrôle ΔV	65
Figure 3-5 : Discrétisation d'une section du four.....	70
Figure 3-6 : Schéma d'une coupe transversale d'une section élémentaire incluant la cloison et l'alvéole ( chauffage des solides et  refroidissement des solides).....	72
Figure 3-7 : Architecture du modèle de procédé dynamique de cuisson des anodes.....	73
Figure 3-8 : Schéma explicatif de la permutation des rampes.....	74
Figure 4-1 : Les 10 sections du four sur lequel l'étude paramétrique a été réalisée (les températures de gaz prédites dans la cloison sont présentées dans les sections montrées en jaune et le sens de l'écoulement des gaz sur les figures qui présentent les résultats pour les gaz est indiqué sur le dessin inférieur).....	77
Figure 4-2 : Les plans dans une section où le transfert de chaleur dans les solides est solutionné (les températures de solides prédites sont présentées sur le plan P1 montré en jaune).....	78
Figure 4-3 : Comparaison du profil de température des gaz prédit par le modèle avec celui mesuré à l'usine.....	79
Figure 4-4 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement.....	81
Figure 4-5 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température dans les solides pour la zone de refroidissement.....	82
Figure 4-6: Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage.....	84
Figure 4-7 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage.....	85
Figure 4-8 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage.....	87
Figure 4-9 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage.....	88
Figure 4-10 : Graphes montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une baisse du débit de carburant de 20% par rapport au débit utilisé dans des conditions.....	90
Figure 4-11 : Graphe montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une baisse du débit de carburant de 10% par rapport au débit utilisé dans des conditions standards...91	91
Figure 4-12 : Graphe montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une hausse du débit de carburant de 10 % par rapport au débit utilisé dans des conditions standards.92	92

Figure 4-13 : Graphes montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une hausse du débit de carburant de 20% par rapport au débit utilisé dans des conditions standards..	93
Figure 4-14 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement	96
Figure 4-15 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement.....	97
Figure 4-16 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement (la figure 4-15 est visualisée sur une autre échelle)	98
Figure 4-17 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage.....	100
Figure 4-18 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage	101
Figure 4-19 : Distribution de la température (en °C) des gaz dans la zone de chauffage montrant a) l'influence des volatiles et b) l'influence du carburant.....	102
Figure 4-20 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage.....	104
Figure 4-21 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage	105
Figure 4-22 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une baisse de 20% de la quantité de volatiles	107
Figure 4-23 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une baisse de 10% de la quantité de volatiles	108
Figure 4-24 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une hausse de 10% de la quantité de matières volatiles dégagée	109
Figure 4-25 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une hausse de 20% de la quantité de matières volatiles dégagée	110
Figure 4-26 : Schéma d'une coupe longitudinale présentant l'intérieur d'une cloison dans un four horizontal de cuisson d'anodes	111
Figure 4-27 : Influence du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement.....	114
Figure 4-28 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement	115
Figure 4-29 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage	116

Figure 4-30 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage	117
Figure 4-31 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage	118
Figure 4-32 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage	119
Figure 4-33 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement	122
Figure 4-34 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement	123
Figure 4-35 Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage.....	124
Figure 4-36 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage	125
Figure 4-37 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage.....	126
Figure 4-38 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage	127
Figure 4-39 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement	128
Figure 4-40 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement.....	129
Figure 4-41 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage.....	130
Figure 4-42 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage	131
Figure 4-43 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température dans les gaz pour la zone de préchauffage	132
Figure 4-44 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage	133

NOMENCLATURE

C_{pg}	Chaleur spécifique du gaz dans la cloison ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
C_{pgi}	Chaleur spécifique des constituants volatiles en phase gazeuse ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
\dot{m}_g	Flux massique local de gaz dans la cloison ($kg \cdot s^{-1}$)
\dot{m}_{gi}	Débit massique des constituants gazeux (goudron, méthane, hydrogène ou carburant injecté) dans la cloison ($kg \cdot s^{-1}$)
T_g	Température du gaz dans la cloison ($^\circ C$)
T_{gi}	Température de volatilisation des constituants gazeux (goudron, méthane, hydrogène) contenus dans le brai dans la cloison ($^\circ C$)
h_T	Coefficient d'échange thermique global entre le gaz et le mur de cloison
A	Surface d'échange thermique entre le mur et le gaz dans la cloison (m^2)
A_T	Aire transversale entre deux chicanes adjacentes (m^2)
b_{vol}	Constante pour la dévolatilisation du brai
b_{chauff}	Constante pour la zone de chauffage où il y a injection de carburant
\dot{m}_{vol}	Flux massique des matières volatiles par élément de cloison de four ($kg \cdot s^{-1}$)
H_{vol}	Chaleur totale de combustion des matières volatiles ($J \cdot kg$).
\dot{m}_{carb}	Flux massique de carburant injecté par unité de longueur de four ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)
H_{carb}	Chaleur de combustion du carburant injecté ($J \cdot kg$).
Q_{PGC}	Perte de chaleur du gaz au niveau de la fondation et à la surface de la cloison (J).
T_{surf}	Température du gaz à la surface de la cloison ($^\circ C$)
T_{air}	Température ambiante ($^\circ C$)
T_a	Température de l'anode
T_s	Température du mur de la cloison ($^\circ C$)
h_{eq}	Coefficient d'échange convectif entre l'air environnement et la surface de la cloison ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)
\dot{m}_{air}	Masse d'air infiltré ($kg \cdot s^{-1}$)
h_{Conv}	Coefficient de transfert convectif de chaleur entre le gaz et la paroi de la cloison ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)

h_{rad}	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement de gaz dans cloison ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
k_g	Conductivité thermique de gaz ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$k_s(x,y)$	Conductivité thermique du solide situé aux coordonnées x et y ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Re	Nombre adimensionnel de Reynold
Pr	Nombre adimensionnel de Prandtl
D_h	Diamètre hydraulique
σ	Constante de Stefan-Boltzmann = 5.67×10^{-8} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
ε_g	Emissivité des gaz
μ	Viscosité dynamique en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits = $8.3415 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

REMERCIEMENTS

Des personnes qui nourrissent l'esprit, insufflent la passion dans l'apprentissage, c'est ce que vous avez été. Ainsi, je tiens avant tout à exprimer ma gratitude à mes professeurs et directeurs de recherches ; Professeur Yasar Kocafe et Professeure Duygu Kocafe pour avoir teinté d'humanisme leur soutien et leurs précieux conseils. Leurs mots d'encouragement et leur soutien moral tout au long de ces années académiques ont été d'une grande aide. Votre patience, votre compréhension et surtout la passion que vous transmettez nous aide à repousser nos limites.

Je remercie M. Noura Oumarou pour le soutien technique qu'il m'a apporté dans le cadre de ce projet et également pour ses conseils et encouragements. Un merci à l'endroit de M. Dipankar Bhattacharyay pour toute son implication dans la bonne réalisation de mon projet.

Un merci à l'endroit de Mme Brigitte Morais pour sa contribution enrichissante par le partage de ses expériences de travail à l'usine, et surtout pour nous avoir facilité les formations à l'usine.

Une mention spéciale au Professeur Issouf Fofana pour sa recommandation et également pour avoir été une source de motivation pour nous et M. Amidou Betié pour sa présence et son soutien moral.

Mes mots de remerciements vont également à l'endroit du personnel administratif plus particulièrement la direction du module en la personne de Monsieur Éric Réналd .

Le soutien technique et financier de l'Aluminerie Alouette Inc. ainsi que le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), du Développement Économique Sept-Îles (DESI), de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi (FUQAC) sont grandement appréciés.

J'adresse également mes mots de profondes gratitude à toute ma famille et mes amis pour leur appui moral durant ces années enrichissantes en savoir.

Chapitre 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1-1. Introduction

Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville en 1854, obtenu quelques kilogrammes d'aluminium pur en réduisant le chlorure de potassium [1]. Cette découverte marqua le début de la fabrication de l'aluminium à l'échelle industrielle. Cependant, elle offrait une production annuelle au prix dérisoire et inférieure à trois tonnes par an. En 1886, l'invention d'un nouveau procédé de fabrication a favorisé de son expansion économique. C'est l'électrolyse de l'alumine découvert simultanément par Paul Louis-Toussaint Héroult et Charles Martin Hall qui a permis d'atteindre 6000 tonnes de production annuelle en 1900 et 25 millions en 2003 [2].

Ce procédé met en jeu des anodes de carbones pour la réduction de l'alumine dissoute dans un bain électrolytique en présence du courant électrique. La réaction a lieu dans des cuves dédiées à l'électrolyse de l'aluminium.

Le carbone utilisé dans les cuves d'électrolyse provient essentiellement d'anodes en carbones. Ces anodes sont formées par mélange de 60-70% de coke de pétrole calciné, de 15-25% de mégots d'anodes recyclés et de 13-15% de brai qui joue le rôle de liant des particules [3]. Des contraintes spécifiques lui sont appliquées pour donner la forme et les propriétés requises avant la cuisson. Puis, elles sont portées à cuisson dans de grands fours spécialisés afin de répondre aux besoins énergétiques, économiques et environnementaux de l'industrie de l'aluminium primaire [4]. Dans la cuve, la réaction électrochimique nécessite théoriquement la

présence de 0.334 tonnes d'anodes de carbones et 1.89 tonnes d'alumine pour l'extraction d'une tonne d'aluminium [5]. Mais, en réalité, une plus grande quantité de carbone est introduite dans les cuves d'électrolyse, en raison des réactions parasites dont elles sont également le siège. Ces réactions secondaires sont dues aux propriétés physiques de l'anode obtenue après cuisson qui induisent des propriétés réactives des anodes au dioxyde de carbone dégagé durant l'électrolyse et à l'air entraînant ainsi la diminution du rendement de la production. Ainsi, une anode qui possède une faible densité augmente la consommation de l'énergie électrique et le risque de réactivités à l'air et au CO₂. Ces conséquences ont pour effet d'augmenter la consommation énergétique des cuves et d'entraîner une consommation plus rapide des anodes de carbones par la réaction de Boudouard [6]. La durée de vie des anodes de carbones estimée entre 20-28 jours dans les cellules électrolytiques se trouve donc diminuée [7, 8]. L'industrie de l'aluminium se révèle alors être une grande consommatrice d'anodes de carbone.

Autrement dit, pour qu'elle soit introduite dans la cuve, une anode doit posséder des hautes conductivités thermique et électrique spécifiques, une densité élevée, une bonne résistance mécanique et de basses propriétés réactives à l'air et au CO₂ [9].

L'étape de cuisson de ces anodes de carbone joue dès lors un rôle primordial dans le long processus de fabrication des anodes. Il s'agit également d'un procédé délicat dans sa mise en œuvre et dans son suivi [10]. Les fours de cuisson d'anodes peuvent être décrits comme de grandes installations disposant de puits à l'intérieur desquels peuvent être enfouis les anodes dont la cuisson se fait grâce à un échange thermique. La figure 1-1 ci-dessous donne un aperçu de l'envergure d'un four horizontal de cuisson d'anodes à des fins d'illustrations. On distingue entre autres, des fours de type vertical encore appelé Rhiedhammer qui disposent de couvercles avec des cloisons à circulation verticale de gaz contrairement au four de type horizontal. Cette étude

porte sur les fours de cuisson d'anodes de type horizontal ou annulaire dont le fonctionnement est abordé dans la suite. D'une manière générale, les fours sont constitués de sections ou chambres munies en elles-mêmes d'alvéoles et de cloisons. Dans ces cloisons circulent les gaz dont la circulation à travers les fours est assurée par le fonctionnement en coordination des rampes de soufflage et d'aspiration qui y sont installées, telle que présentée à la figure 1-1.

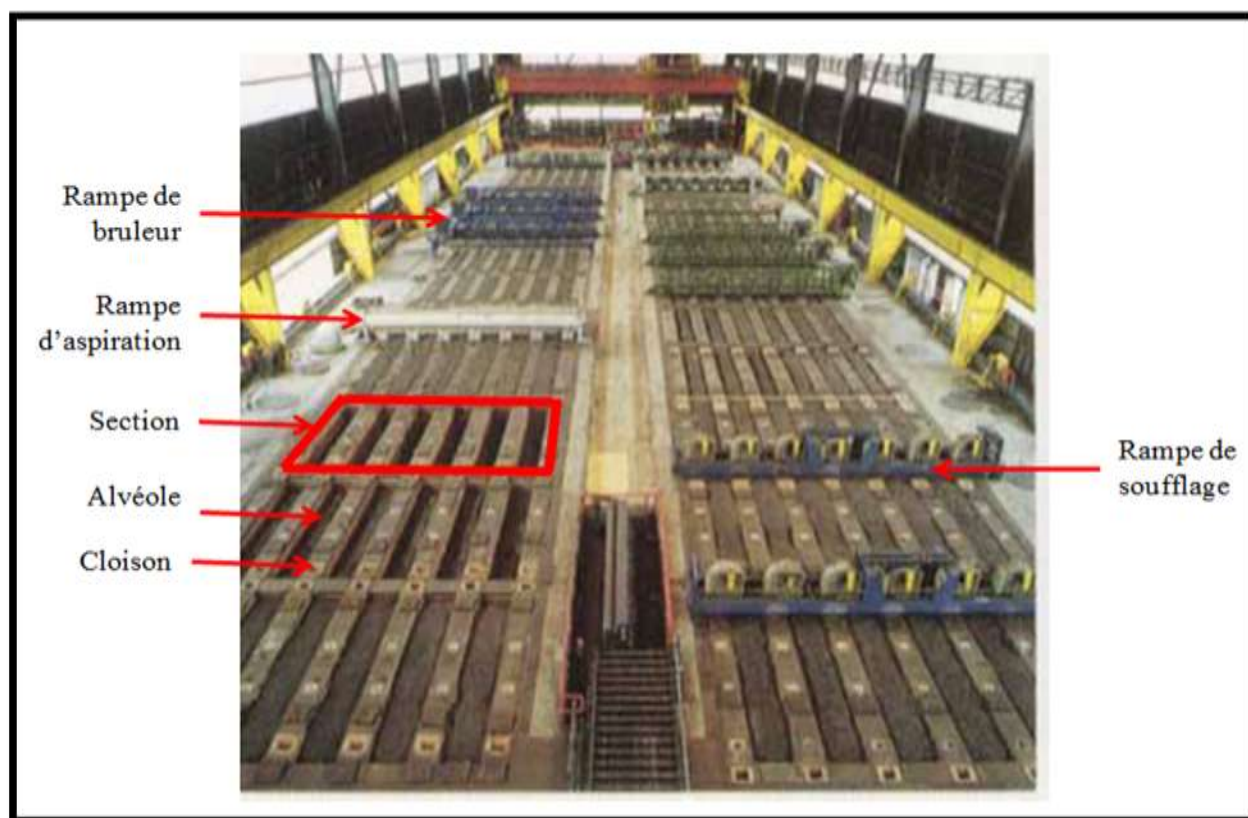


Figure 1-1 : Four horizontal de cuisson d'anodes (vue du dessus) [11]

1-2. Problématique

L'industrie de l'aluminium est constamment à la recherche de moyen pour l'amélioration de sa compétitivité depuis les années 1900. Ce besoin favorise continuellement la naissance de projets. Ceux-ci visent à garantir le respect des contraintes énergétiques et environnementales pour lui assurer une production économiquement rentable. En observant une

répartition des coûts liés à la production de l'aluminium, on remarque que l'usine d'anodes occupe une part considérable de la production comme le montre la figure 1-2. Elle est la troisième part la plus importante dans la production de l'aluminium estimée à 17% [3].

En effet, l'énergie dépensée pour la production de l'aluminium couvre l'énergie électrique utilisée pour l'électrolyse d'une part et la cuisson des anodes d'autre part. La part de l'énergie dû à la consommation électrique dans les cuves pouvant être réduite avec la production d'anodes de bonne qualité. Grâce à leurs propriétés, il est possible de réduire la quantité d'énergie électrique apportée pour l'électrolyse [9]. Durant la cuisson, des transformations chimiques et physiques ont lieu. La cuisson des anodes est faite grâce à la combustion des gaz dans la cloison. Ces réactions de combustion des volatiles contenus dans le brai des anodes qui se dégagent durant la cuisson sont exothermiques. De plus, la cuisson en elle-même nécessite un apport supplémentaire et variable d'énergie, fournie par la combustion du carburant (l'huile ou le gaz naturel), en raison des pertes de chaleur [12, 13].

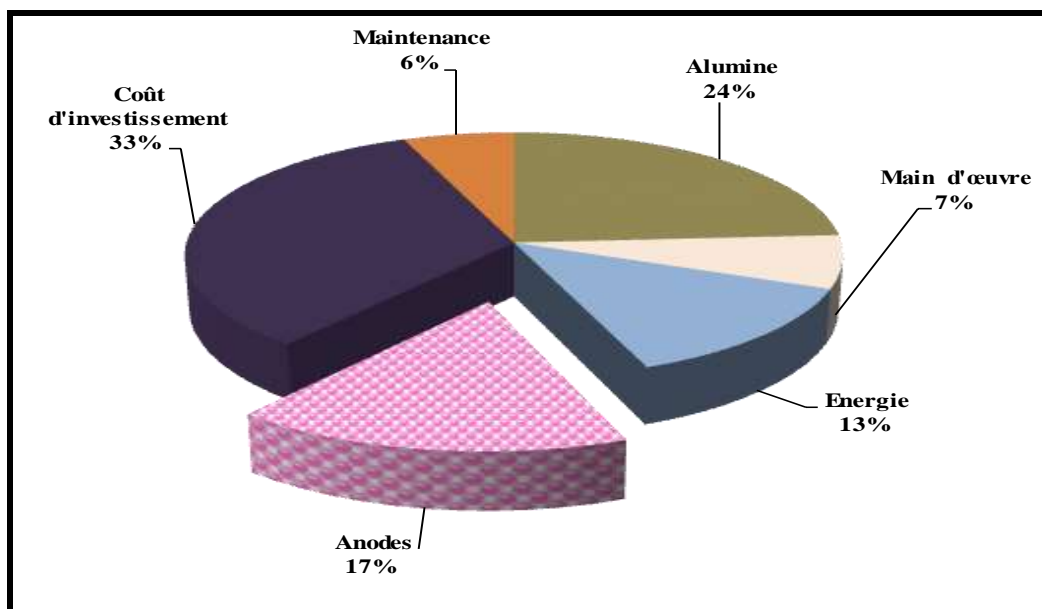


Figure 1-2 : Répartition typique des coûts de production de l'aluminium jusqu'à la fin du 20^{ième} siècle [3]

En effet, le four de type horizontal ne dispose pas de couvercle. Ainsi, le coke qui garnit la surface supérieure des anodes est exposé à l'air environnant. Ce qui engendre une perte de l'énergie de combustion transférée par les gaz d'abord aux briques réfractaires par convection et rayonnement. Ensuite, le transfert se poursuit par conduction dans le coke puis les anodes. Le chauffage des réfractaires donc consomme également l'énergie de combustion. Pour cette raison, il faut apporter une énergie en compensation par injection de gaz ou d'huile combustible par les brûleurs dans la zone de chauffage. Le caractère variable de l'énergie apporté ici est fonction des conditions de cuisson des anodes. Autrement dit, des changements sur la composition des anodes, du changement d'un régime de fonctionnement des rampes, des paramètres géométriques du four peuvent résulter une variation du carburant supplémentaire à ajouter. En conséquence, le rendement de la cuisson d'anodes se trouverait modifiée, d'où la recherche de meilleures conditions de fonctionnement des fours pour la cuisson des anodes.

À côté, des coûts de réalisation très élevés peuvent être engendrés par des travaux de recherches de nature expérimentale sur les fours lorsque les dimensions de ces installations sont considérées. Encore, le coût onéreux du carburant ajouté comme supplément poussent les producteurs à opter pour le développement de méthodes prévisionnelles du comportement du four de cuisson. Ces méthodes reposent essentiellement sur le développement d'outils mathématiques capable de simuler le procédé de cuisson. Il s'agit de modèles mathématiques mis au point à partir des équations des phénomènes de transfert de chaleur et de matières qui ont lieu durant la cuisson.

L'intérêt industriel que suscite l'utilisation des modèles de four de cuisson d'anodes pour en analyser la performance est multiple. Ces outils renseignent sur la distribution des températures des gaz, des anodes, des murs dans le four durant la cuisson, de la dépression dans

les cloisons, de la combustion des volatiles et du carburant. Ainsi, en variant la consommation énergétique et en modifiant les conditions opératoires des fours, il devient possible alors de déterminer les facteurs susceptibles d'influencer la qualité des anodes et d'en mesurer leur impact.

Il y a différents types de modèles qui varient de 1D à 3D. Les modèles 3D donnent des informations très détaillées sur la distribution de toutes les variables en espace et en temps. Ces modèles permettent d'étudier les options de design, mais le temps de calcul est en général très élevé (dans l'ordre de plusieurs heures). En simplifiant certains phénomènes ou en les représentant de manière empirique, on diminue le nombre de dimensions. Ces modèles sont appelés 'modèle de procédé'. Ces derniers présentent des avantages temporels et offrent des possibilités d'ajout de modules comme un émulateur de contrôle et d'établir un simulateur de four appelé « four virtuel ». La situation du problème nous a permis de bien circonscrire les objectifs de l'étude.

1-3. Objectifs de l'étude

Ce projet a pour vision globale dès lors de faire une étude paramétrique pour aider à un approfondissement des connaissances sur le procédé proprement dit de cuisson des anodes dans les fours horizontaux. Donc, l'objectif de ce projet est de développer un modèle de procédé pour simuler le comportement dynamique des fours horizontaux de cuisson d'anodes. Le travail implique l'écriture d'un programme en Fortran. Le modèle permet alors plus précisément d'apporter des améliorations au procédé de cuisson des anodes en évaluant l'effet des paramètres sur la performance du four. Il fournit, par la même occasion, un outil de prédiction de la performance du four réel modélisé. Il s'agit pour le cas d'un autre régime de fonctionnement faisant appel à des contraintes de production variables. Cet outil qui se comporte comme un four

virtuel tient compte de tous les phénomènes importants dans le four. D'ordre spécifique, le procédé virtuel de cuisson développé pourrait servir aussi d'appui à la prise de décision quant à l'implémentation de nouvelles conditions de fonctionnement sur le four.

1-4. Méthodologie

Avant d'entrer dans le vif de tout sujet, il est primordial d'avoir la documentation requise afin de bien orienter les recherches qui permettra d'atteindre les objectifs de ce projet. Ainsi la première partie de nos travaux a été consacrée à la revue de la littérature. Elle a porté sur la connaissance du procédé de cuisson d'anode. Egalement, un recensement des travaux existant dans le domaine d'amélioration des fours de cuisson d'anodes a été effectué.

Prenant pour fil conducteur les objectifs définis, un cahier d'actions a été élaboré afin de résoudre la problématique. Tous les phénomènes importants du procédé de la cuisson d'anodes ont été déterminés et toute l'information sur la géométrie et l'opération du four a été compilée. Les phénomènes physiques ont été représentés par des équations appropriées selon l'approche choisie. En considérant un écoulement simplifié, la solution de l'équation de la quantité de mouvement a été éliminée. Les équations ont été solutionnées en utilisant des méthodes numériques appropriées. Le four est composé de deux parties avec des caractéristiques différentes : les gaz dans la cloison et les solides incluant les anodes, le coke et les réfractaires. Les équations de chaque partie ont été traitées dans un sous-modèle séparé. Après, ces sous-modèles ont été couplés pour former le modèle de procédé du four. Les équations tiennent compte des transferts de chaleur et de masse et incluent la dévolatilisation des anodes, la combustion des carburants et des volatiles, l'infiltration de l'air.

La validation du modèle a été réalisée en comparant le profil de température avec celle mesurée sur un four industriel. Ensuite, une étude de l'effet des paramètres d'opérations sur la

cuisson des anodes de carbone a été réalisée à l'aide du modèle de procédé validé. Ce modèle a été établi et transcrit en langage FORTRAN sous Visual studio 2015. Les détails sont présentés dans le chapitre 3.

1-5. Contenu du mémoire

Ce chapitre a proposé une généralité sur l'industrie de l'aluminium en passant par la définition de l'utilité des anodes de carbone dans cette industrie. La fabrication des anodes grâce à la présentation de l'usine d'anodes, les propriétés de ces anodes selon les normes en outre, le procédé de cuisson des anodes a été expliqué.

C'est l'essentiel du chapitre 2 qui fait également un état des travaux entrepris pour l'amélioration des fours de cuissons d'anodes. Le chapitre 3 consacre ses lignes à la description du modèle de procédé développé et l'étude paramétrique réalisée. On poursuivra par la présentation des résultats obtenus et les interprétations qui s'y prêtent dans le chapitre 4, incluant le travail sur la validation du modèle.

Le chapitre 5 donne les conclusions qui découlent des discussions du chapitre 4 et les recommandations en vue d'amélioration du modèle développé. Ces recommandations nous permettrons de faire une ouverture sur des travaux complémentaires qui pourraient contribuer à l'amélioration du modèle pour mieux prédire la performance des fours de cuisson d'anodes.

Chapitre 2

REVUE DE LA LITTERATURE

2-1. Introduction

« C'est sa faculté à répondre à tout au long de son histoire, à une multiplicité d'attentes, de désirs, qui a fait de lui l'un des matériaux les plus emblématiques du monde contemporain. Avant tout, l'aluminium incarne la légèreté... ». Ces propos de Paola Antonelli tels que cité dans [14] traduisent implicitement les avantages qu'offre l'aluminium. C'est un métal léger qui présente une bonne résistance à la corrosion. Il est malléable et offre une bonne recyclabilité contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

2-2. Industrie de l'aluminium primaire : Sa production

La production de l'aluminium englobe plusieurs aspects. Une description de l'évolution et des étapes dans le processus de développement de la méthode industrielle de Hall-Héroult a été abordée. Elle a permis de comprendre plus amplement le rôle du carbone dans l'industrie contemporaine de l'aluminium dont le cycle de production est illustré par la figure 2-1 suivante.

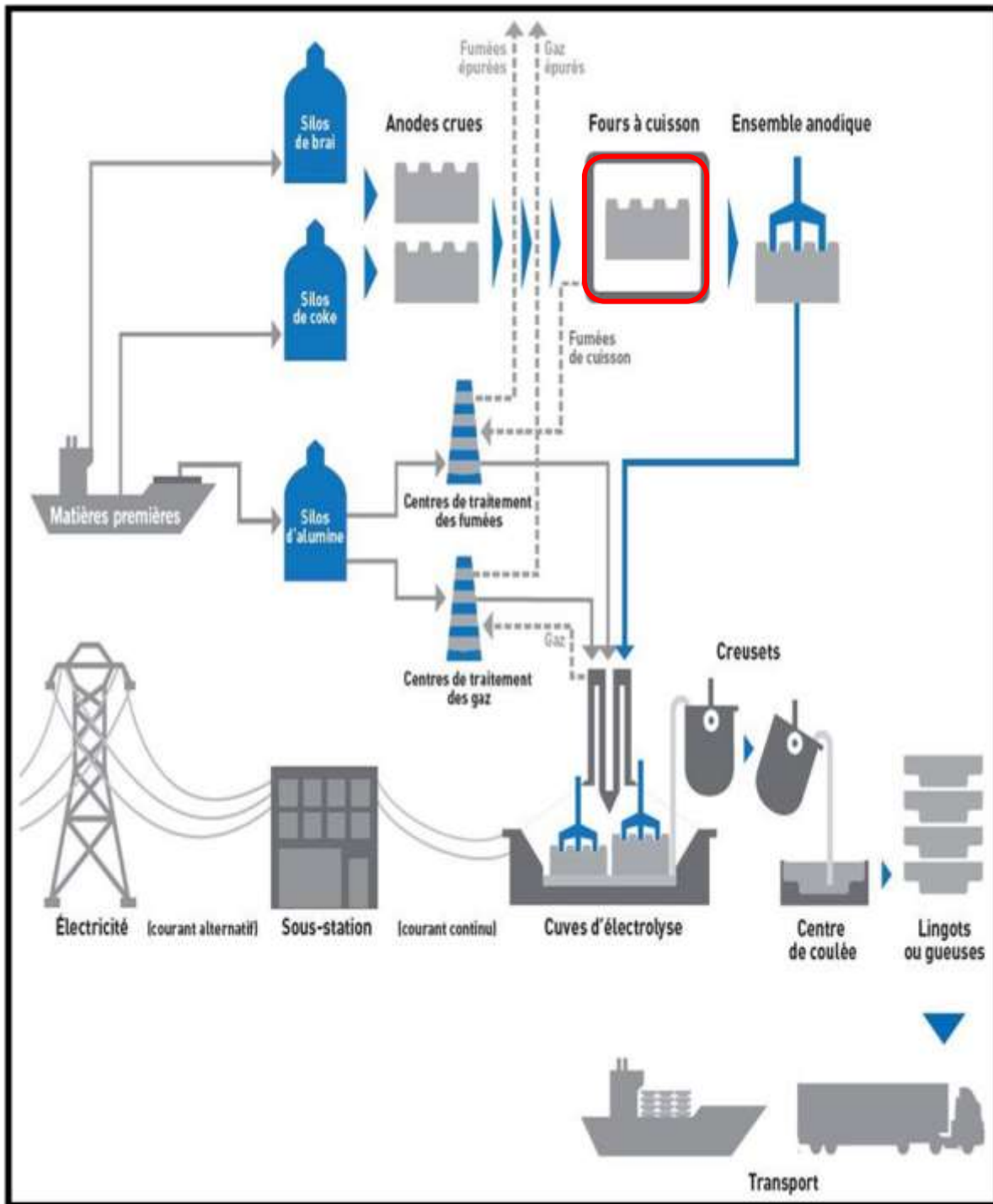


Figure 2-1 : Schéma du cycle de production de l'aluminium [15]

2-2.1. Fabrication de l'aluminium primaire

En raison de sa très grande réactivité, l'aluminium est présent dans la croûte terrestre sous forme combinée, sous forme d'aluns ou d'oxydes (alumine) ou de chlorure. Les premiers travaux pour l'extraction du métal ont débuté avec la production des alliages de fer et d'aluminium par utilisation de l'arc électrique sur les aluns. Puis, après plusieurs tentatives d'améliorations des travaux de Wöhler, Sainte-Claire Deville (1811-1881) a exploité le procédé de Bunsen (1811-1899) pour l'extraction du magnésium. Ce procédé met en œuvre des électrodes de charbon. En effet, sous l'action du courant de la pile, il a pu provoquer la décomposition du chlorure de magnésium [16]. Il a voulu appliquer le même principe au chlorure d'aluminium. Cependant, la fugacité du chlorure d'aluminium à basse température au lieu de fondre présente donc un inconvénient majeur à l'application de la méthode. La recherche de solution a donc conduit à l'introduction du bain dans lequel l'aluminium serait le seul à être déplacé par le courant électrique. Le double chlorure d'aluminium et de sodium présentait donc un atout favorable [17]. En raison du caractère polluant du chlorure d'aluminium, il le remplaça par de l'alumine. Plus d'informations sur la première production de l'aluminium et les travaux de Charles, S.-D., à l'échelle industrielle sont regroupées dans son ouvrage intitulé « De l'aluminium, ses propriétés, sa fabrication, ses applications » [18]. Ces histoires [19, 20] donnent un aperçu sur le rôle de chacune des composantes dans le procédé de Hall-Héroult.

Production électrolytique de l'aluminium de première fusion

De nos jours, l'aluminium est produit par réduction électrolytique de l'alumine dans un bain de sels fondus de fluorure de sodium et d'aluminium (Na_3AlF_6) ou cuve d'électrolyse à une température proche de 960°C . La réduction s'opère en présence d'un courant de faible voltage et

de haut ampérage (comme une dynamo) qui circule à travers des anodes de carbone immergées dans le bain. L'équation globale de la réaction est résumée à l'équation (2.1) suivante.



À l'image de la pile, on distingue une anode et une cathode dans la cuve, toutes deux formés de carbones. L'anode est caractérisée par l'oxydation du carbone avec l'oxygène qui provient de la dissociation de l'alumine. La cathode quant à elle est caractérisée par une réduction cathodique. En effet, l'alumine (Al_2O_3) est introduite dans le bain électrolytique (la cryolithe fondue de formule Na_3AlF_6). Sous l'effet du courant électrique, la réduction s'opère et l'aluminium liquide obtenu se dépose sur la cathode suivant l'équation (2.2). Dans le même temps, les anodes de carbones sont consommées. L'oxygène dissous se combine au carbone pour former des gaz carbonés (CO_2) suivant l'équation (2.3) suivante :



Il existe deux technologies de cuves d'électrolyse dans lesquels peuvent s'opérer le procédé Hall-Héroult. L'une utilise des anodes précuites, dont la représentation schématique est présentée à la

figure 2-2 (a), est la plus utilisée de nos jours. L'autre est dite cuve Soderberg (voir la figure 2-2 (b)) dans lesquels les anodes ne sont pas précuites mais sont sous la forme d'une pâte. À l'intérieur de cette pâte sont insérées des goujons pour assurer le passage du courant comme l'illustre la figure 2-2 (b) pour lui servir d'électrode.

Ces deux technologies de production de l'aluminium sont différentes par la technique de cuisson des anodes mises en jeu. Les anodes utilisées dans les cuves Soderberg sont cuites dans les cuves durant la descente de la pâte. Ces dernières sont remplacées de plus en plus par des

technologies plus modernes et moins émettrices d'hydrocarbures poly-aromatiques (HAP) [21]. Dans les cuves à anodes précuites, les réactions chimiques secondaires présentent un inconvénient majeur au procédé d'électrolyse car ils diminuent la durée de vie des anodes de carbones. Dans le même temps, ils entraînent ainsi une baisse du rendement de la production. Ces réactions sont dues aux propriétés réactives des anodes de carbone précuites à l'air et à CO_2 qui sont intimement liées aux conditions de fabrication des anodes. En effet, des études ont également montrés que les matières premières, les contraintes mécaniques et thermiques appliquées influencent la qualité des anodes produites.

Ce mémoire porte sur la technologie de cuves d'électrolyses utilisant les anodes précuites. Plus particulièrement, on aborde une problématique énergétique portant sur les fours de cuisson d'anodes de type horizontal. On traite des fours de cuisson de type horizontal ou annulaire.

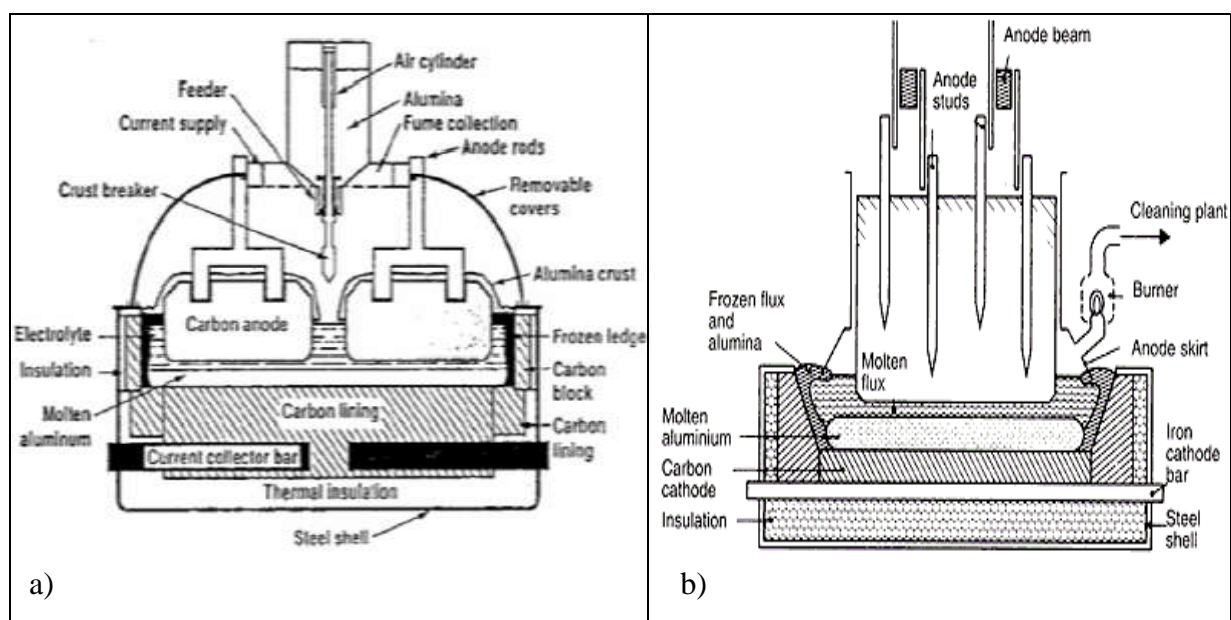


Figure 2-2 : Schémas des cuves d'électrolyse de l'aluminium :
a) Technologie à anodes précuites [22] ; b) Technologie Soderberg [23]

2-2.2. Production des anodes de carbones

a) Fabrication des anodes crues

Les électrodes de carbone utilisées dans le procédé sont constituées de coke de pétrole calciné, d'anodes recyclées et de mégots d'anodes extraites des cuves d'électrolyse. Ceux-ci sont été concassés, broyés et filtrés puis combinés au brai de houille [24]. Généralement, elles sont constituées de 60-70% de coke de pétrole calciné, de 15-25% de mégots et d'anodes recyclés et de 13-18% de brai. Le brai de houille joue un rôle de liant des particules de granulométrie sélective. La qualité du brai utilisé dans le procédé est importante pour la qualité des anodes en carbone. Les matières premières sont sélectionnées en respect des normes en vigueur consignées dans le tableau 2-1 pour le brai et pour le coke ci-dessous (tableau 2.2).

D'après ces tableaux, on peut affirmer que la qualité du brai de houille utilisé est une combinaison des propriétés physiques et chimiques qui influencent la performance des anodes [9]. Une anode de bonne qualité est caractérisée par une pureté chimique élevée, une haute conductivité électrique, une faible réactivité au CO₂ (à environ 960°C) et à l'air (à environ 500-600°C), une résistance élevée aux chocs thermiques, une haute force mécanique et une bonne homogénéité.

Tableau 2-1: Valeurs et méthodes de détermination des propriétés du brai de houille [3]

Propriétés	Méthodes	Unité	Valeurs typiques
Distillation	0 - 270°C 0 - 376°C	ISO N647	% 0-0.5
			% 3-6
Point de ramollissement	ISO 5940-2	°C	110-115
Viscosité à 160°C	ISO 8003	mPa.s	1200-2000
Densité dans l'eau	ISO 6999	kg/dm ³	1.31-1.33
Taux de cokéfaction	ISO 6998	%	56-60
Solubilité dans la quinoléine	ISO 6791	%	75-92
Solubilité dans le toluène	ISO 6376	kg/dm ³	2.05-2.10
Teneur en cendres	ISO 8006	MΩm	450-550
Réactivité au CO ₂	ISO 12981-1	%	3.0-15
Impuretés			
S	ISO 10238	%	0.4-0.6
Na	ISO 12980	ppm	50-250
Cl	“	ppm	50-150
Ca	“	ppm	20-100
Si	“	ppm	50-200
Fe	“	ppm	50-300
Zn	“	ppm	100-500
Pb	“	ppm	100-300

Tableau 2-2: Valeurs et méthode de détermination des propriétés du coke de pétrole calciné [3]

Propriétés	Méthodes	Unité	Valeurs typiques
Echantillonnage	ISO 6375		
Teneur en eau	ISO 11412	%	0.1-0.2
Teneur en pétrole	ISO 8723/ISO 6997	%	< 0.2
Granulométrie d'analyse	ISO 12984		
>8 mm		%	10-25
8-4 mm		%	15-25

4-2 mm		%	15-25
2-1 mm		%	10-20
1-0.5 mm		%	5-15
0.5-0.25 mm		%	5-15
<0.25 mm		%	5-15
Densité apparente tassée	ISO 10236		
8-4 mm		kg/dm ³	0.61-0.70
4-2 mm		kg/dm ³	0.70-0.79
2-1 mm		kg/dm ³	0.77-0.86
1-0.5 mm		kg/dm ³	0.83-0.92
0.5-0.25 mm		kg/dm ³	0.85-0.93
Moyenne		kg/dm ³	0.75-0.84
Stabilité du grain	ISO 10142	%	75-92
Densité apparente dans le Xylène	ISO 8004	kg/dm ³	2.05-2.10
Résistance électrique spécifique	ISO 10143	μΩ.m	450-550
Réactivité au CO ₂	ISO 12981-1	%	3.0-15
Réactivité à l'air à 525°C	ISO 12982-1	%/min	0.05-0.30
Teneur en Cendres	ISO 8005	%	0.1-0.3
Eléments chimiques	ISO 12980		
S		%	0.5-3.5
V		ppm	30-350
Ni		ppm	50-220
Si		ppm	50-250
Fe		ppm	50-400
Al		ppm	50-250
Na		ppm	30-120
Ca		ppm	20-100
Mg		ppm	10-30

Cependant les impuretés ou éléments chimiques présents dans les anodes jouent un rôle spécifique sur la qualité des anodes de carbone tel que le montre le tableau 2-3 suivant. Ce tableau récapitule les effets des impuretés sur des aspects important de la production de l'aluminium primaire notamment l'efficacité énergétique des cuves et la pureté du métal produit.

Tableau 2-3: Impact des impuretés du coke de pétrole [3]

Eléments	Existence d'un effet sur				
	Pureté du métal	Consommation de l'anode	Efficacité du courant	Pollution	Propriétés du bain électrolytique
S		X		X	
V	X	X	X		
Ni	X	X			
Si	X				
Fe	X	X			
Na		X			X
Ca		X			X
Mg		X			X
P			X		

Outre les impuretés qui jouent les rôles de catalyseur de réactions parasites (attaques au CO₂ et à l'air des anodes) de l'électrolyse, le procédé de cuisson des anodes joue un plus grand rôle dans l'obtention de la haute qualité des anodes. Les anodes crues possédant des bonnes qualités sont acheminées pour la cuisson.

b) Procédé de cuisson des anodes

À l'état cru, il est possible de juger de la qualité des anodes selon les critères établis par l'usine. Ainsi, une anode de mauvaise qualité est aussitôt envoyée aux rebuts. Celles qui sont jugées aptes à la cuisson sont acheminées vers les fours. En sorte que le procédé de cuisson des anodes a pour but ultime de raffiner la qualité des anodes fabriquées pour garantir un bon rendement de la réduction électrolytique. Cela est rendu possible grâce aux transformations physico-chimiques et thermiques qui s'opèrent durant les fours spécialisés au fil des jours [25-28].

Elle est caractérisée par la cokéfaction du brai contenu dans les anodes enfournées. Cette réaction favorise l'acquisition des propriétés mécaniques des anodes ainsi que leur conductivité thermique et électriques tout en leur conférant une faible réactivité au CO₂ et à l'air. C'est pourquoi un suivi rigoureux et une bonne connaissance des conditions adéquates pour le bon déroulement de la cuisson ne peuvent que favoriser l'obtention d'anodes de bonne qualité.

Le procédé de cuisson des anodes s'échelonne en plusieurs phases. On distingue trois phases qui sont essentielles : les phases de préchauffage, de chauffage et de refroidissement qui s'échelonnent au fil des jours en fonction de la durée des cycles de feu.

D'une manière schématique, on peut représenter le processus de cuisson d'une anode dans le four comme le présente la figure 2-3 suivante :

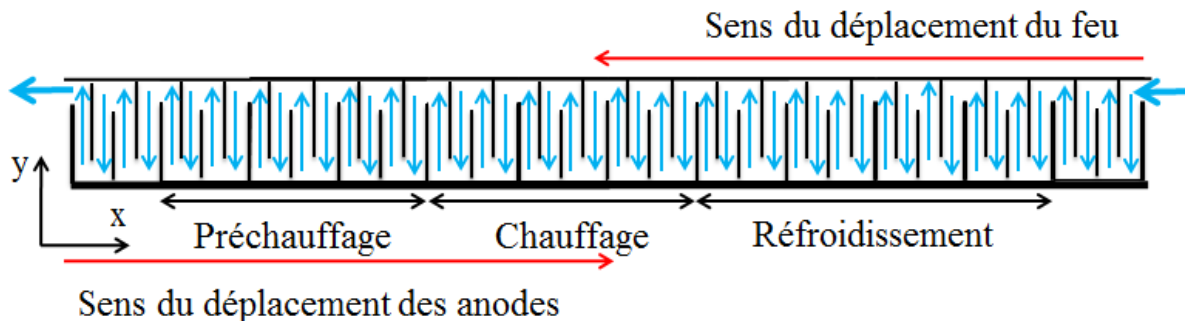


Figure 2-3: Schéma montrant le processus de cuisson des anodes de carbone dans un four

b.1) Phases de préchauffage et de chauffage

Durant le préchauffage et le chauffage, les anodes se trouvent dans des zones où la pression est négative dans la cloison. Cette expression technique renvoie à une zone de dépression pour signifier des valeurs de pression locale en dessous de la pression atmosphérique de 1 atm. Ces deux phases sont caractérisées par des zones de températures qui donnent lieu à diverses transformations en fonction des gammes de températures [29]. De la documentation supplémentaire concernant ces transformations est disponible [3, 9] et un résumé est donné ci-dessous :

- Entre 20°C voire depuis la température ambiante à 200°C, débute le processus de transformation. Les anodes sont enfournées et on dénote la libération progressive des contraintes internes causées par le vibro-compactage et le refroidissement des anodes. Durant ce processus, des fissures peuvent se former dans les anodes dues à un choc thermique qui peut survenir si les anodes sont chargées dans des sections pas suffisamment refroidies [30]. Lorsque le point de ramollissement du brai est atteint, celui-ci commence à se liquéfier. C'est l'un des paramètres d'importance dans la mise en forme de la pâte avec le vibro-compacteur. De nos jours, on utilise dans les usines d'anodes, du brai dont le point de ramollissement se situe à environ

120°C. À ce stade la transformation, la différence de température entre le centre des anodes et sa périphérie ne doit pas excéder 100°C voire 80°C. Pour des contraintes d'ordres mécaniques, ces mesures sont prises. Ainsi, cette différence est calculée en fonction de la vitesse de transfert de chaleur entre les gaz dans les cloisons et les anodes. Les coefficients de diffusivités thermiques de l'ensemble coke de garnissage, des briques réfractaires et des anodes sont également considérés lors de cette estimation.

- De 200-600°C, on rentre dans la zone de préchauffage proprement dite :
 - De 150°C à 350°C, les anodes deviennent molles en raison du ramollissement du brai. Son expansion permet de combler les vides réduisant ainsi la porosité dans les anodes. À cette période, les anodes et les trous faits pour l'assemblage avec les tiges risquent de se déformer, on parle d'affaissement. À ce stade, le coke de garnissage joue un rôle important en apportant un support mécanique. En conséquence, il empêche les anodes de se déformer.
 - Entre 350 et 450°C commence la dévolatilisation des constituants légers condensables du brai tels que le goudron. Les volatiles qui en résultent traversent le coke de garnissage, pour se loger dans les cloisons où ils sont brûlés. Le contrôle de la quantité d'oxygène est très important pour permettre la combustion des gaz qui s'opère au-delà de 400°C.
 - Entre 450-600°C : les constituants lourds condensables contenus dans le brai ; puis le méthane, commencent à se dégager et la cokéfaction a lieu. La matrice liante se solidifie.

- Entre 600 et 900°C, les réactions après la cokéfaction libèrent méthane et l'hydrogène.
- Entre 900 et 1200 °C, le brai s'est transformé en coke. Le coke de brai adopte progressivement une structure cristalline. On assiste donc à la réorientation de la structure cristalline. Jusqu'à cette étape, la durée de cuisson est estimée entre quatre et cinq jours de la cuisson.
- Entre le sixième et le septième jour, les températures sont au-delà de 1150°C et le dégagement de l'azote, du soufre pourrait survenir.

C'est pourquoi la cuisson des anodes est effectuée à des températures pouvant atteindre jusqu'à 1150°C pour un certain temps afin de permettre une bonne orientation de la structure cristalline indispensable pour une basse résistivité électrique et une meilleure résistance à l'attaque du CO₂ et de l'air. C'est le trempage ou 'soaking time'. Une bonne densité réelle (1.5 à 1.6 kg/m³) est obtenue. Ainsi, on diminue le risque de charbonaille (ou apparition de braise de carbone) dans les cuves. Au-delà de 1150°C, la désulfurisation survient ; et pour des cokes à haute teneur en soufre (supérieur 2%), cela cause beaucoup de microporosités qui favorisent les réactions carbone-CO₂ qui ont lieu dans les pores que l'on cherche à éviter.

Durant la cuisson, le dégagement des matières volatiles combustibles est très important. En effet, il permet de réaliser une économie de carburant. Pour la combustion d'une tonne d'anodes, elle nécessite 5.5 gigajoules d'énergie par tonnes d'anodes cuites et la combustion des matières volatiles en libèrent 2.0 gigajoules par tonnes d'anodes cuites (GJ/ t_{anodes cuites}). La figure 2-4 présente les contributions des différentes sources de chaleur pour la cuisson durant la phase de chauffage.

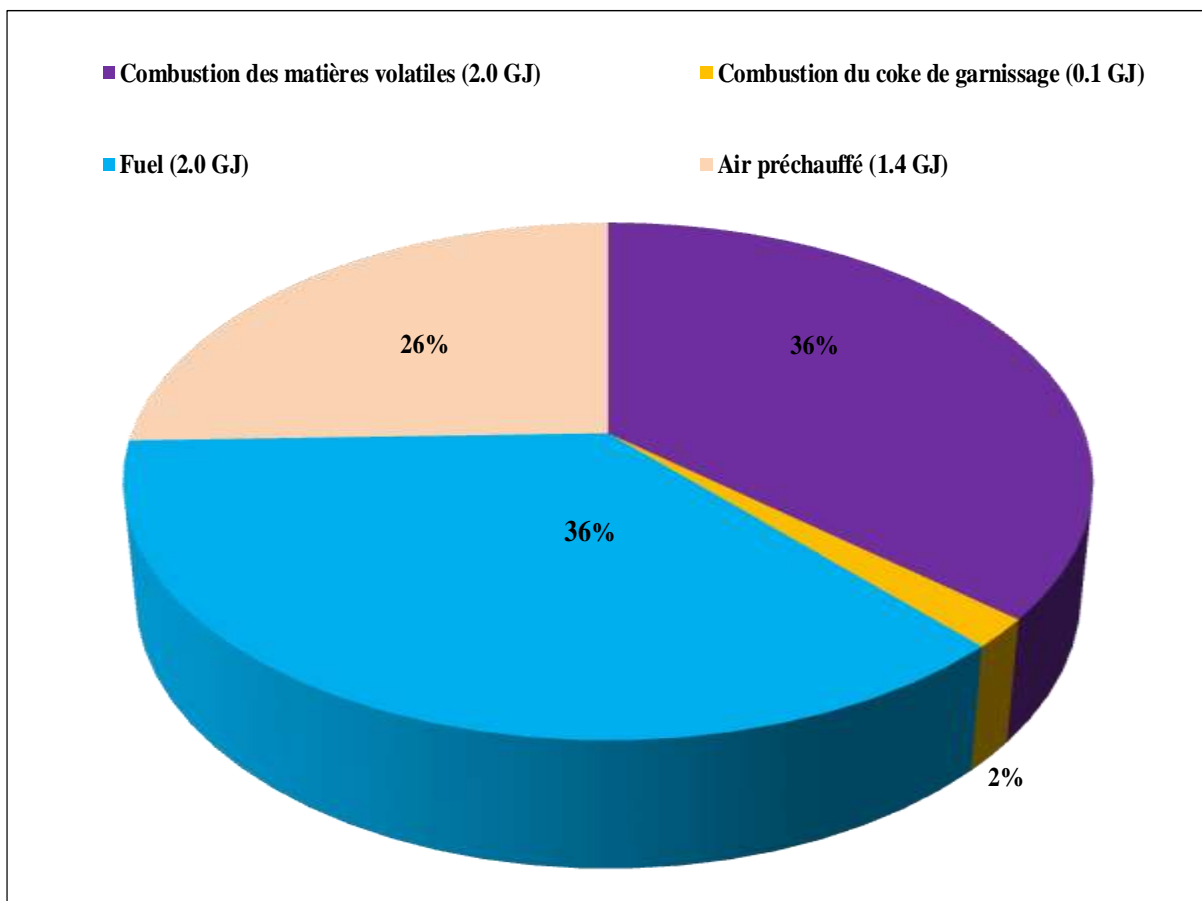


Figure 2-4 : Répartition de l'apport d'énergie lors de la combustion d'une tonne d'anode [3]

Cette énergie est consommée en majorité par perte notamment pour le préchauffage des briques réfractaires et seulement 20% contribue à chauffer les anodes. La figure 2-5 illustre la consommation de l'énergie durant la cuisson des anodes dans les fours.

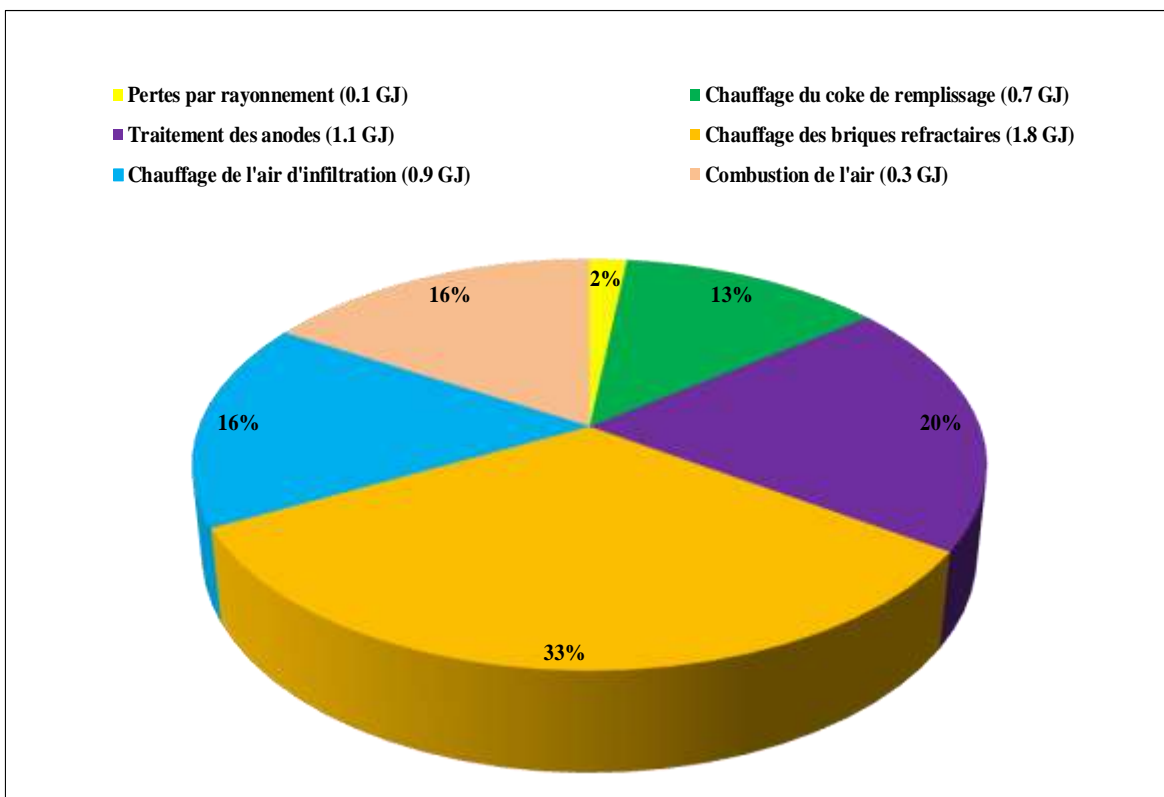


Figure 2-5 : Dépense d'énergie dans un four de cuisson par tonnes d'anodes produites [3]

En somme, les trois phénomènes suivants caractérisent le procédé de la cuisson des anodes :

- Le transport de la chaleur des gaz (qui ont subi la combustion) dans les cloisons vers l'anode. On peut dès lors comprendre l'hypothèse d'assimilation du four comme un échangeur de chaleur.
- La cokéfaction du brai donnant naissance à une structure cristalline plus arrangée d'anode et entraînant le dégagement de combustible volatiles ;
- Le déplacement des produits volatiles vers les cloisons où ils sont brûlés.

b.2) Phase de refroidissement

Cette phase est caractérisée par un refroidissement progressif des anodes. Le four se comporte comme un échangeur de chaleur entre les gaz qui circulent dans les cloisons et

l'ensemble de solide « brique-coke de garnissage et anode ». Dans cette zone, l'air froid est soufflé dans les cloisons et la chaleur qui se dégage de l'ensemble des solides préchauffe l'air dans les cloisons qui permet d'augmenter l'efficacité énergétique du four. Les anodes sont retirées entre 150°C et 350°C.

À la fin de la cuisson, les anodes de carbones obtenues devaient posséder des propriétés jugées adéquates pour être utilisées dans les cuves. Suivant des normes usuelles pour la vérification de leur qualité, les anodes de carbones doivent avoir les propriétés suivantes consignées dans tableau 2-4 ci-après. Parmi ces propriétés, la longueur cristalline obtenue au bout de la cuisson est très importante car elle rend compte de l'organisation structurale de l'anode. En effet, durant la cuisson, on assiste à la cokéfaction du brai des anodes. Il pourrait arriver que le coke subisse également une cokéfaction dans le cas où la température à laquelle celui-ci a été calciné est moindre que la température de cuisson des anodes. D'après les travaux de plusieurs chercheurs [31-41] tel que cités dans [42], le niveau de cuisson des anodes de carbone affecte les propriétés des anodes. En sorte qu'une augmentation de la température de cuisson engendre une augmentation de la longueur cristalline (L_c) du brai carbonisé et on observe les effets suivants :

- La résistivité de l'anode diminue due au réarrangement cristallin.
- La porosité augmente en raison de l'évolution thermique du soufre qui conduit à la formation de pore interne sans entrainer une expansion macroscopique des particules de coke. Une baisse de la densité apparente en inéluctablement observée. Toutefois, cette conséquence ne survient que lorsque le chauffage est porté à très haute température au-delà de 1200°C.

- La densité réelle quand a elle augmente considérablement. Cependant, elle ne peut pas être un bon indicateur de niveau de calcination en raison de la désulfuration qui s'opère et la formation des fissures en conséquence.
- La réactivité à l'air diminue grandement avec la calcination. Cela pourrait s'expliquer par la cristallisation de la matrice liante et sa cokéfaction pour ressembler à la structure du coke.
- La réactivité au CO₂ diminue jusqu'au début de la désulfuration où elle commence à augmenter en raison de la formation de pore interne dû au départ du soufre.
- Le coefficient d'expansion thermique diminue [40].

Les propriétés d'une anode de carbone dite de bonne qualité standard sont résumées dans le tableau 2-4 ci-après.

Afin de veiller au bon déroulement du processus de cuisson des anodes, des opérations de manutention, de maintenance et de contrôle sont effectués sur le four afin de garantir la rentabilité énergétique et économique du procédé.

Tableau 2-4 : Propriétés standards des anodes précuites [3]

Property	Unit	Standard	Worldwide Range		Worldwide Mode		Bench Mark		
			Mean	2 σ	Mean	2 σ	Mean	2 σ	
Apparent density	kg/dm ³	ISO 12985-1	1.50 - 1.62	0.015 - 0.060	1.57	0.03	1.60	0.015	
Sp. electr. resistance	$\mu\Omega\text{m}$	ISO 11713	51 - 74	2 - 20	56	5	53	2	
Flexural strength	MPa	ISO 12986-1	4 - 14	2 - 7	11	4	13	2	
Compressive strength	MPa	ISO 18515	30 - 65	8 - 20	51	12	52	10	
Static elasticity modulus	GPa	RDC-144*	3.0 - 8.5	1 - 2	5.1	1.2	5.2	1.0	
Thermal expansion	10 ⁻⁶ K ⁻¹	RDC-158*	3.6 - 4.6	0.2 - 0.6	4.1	0.4	4.2	0.3	
Fracture energy	J/m ²	RDC-184*	100 - 260	40 - 80	210	70	240	60	
Weibull modulus	-	-	2 - 12	-	8	-	12	-	
Thermal conductivity	W/mK	ISO 12987	3 - 5	0.4 - 2.0	3.8	0.8	4.2	0.5	
Xylene density	kg/dm ³	ISO 9088	2.05 - 2.10	0.012 - 0.040	2.075	0.022	2.085	0.014	
Air Permeability	nPm	ISO 15906	0.3 - 4.0	0.3 - 8	1.0	1.4	0.5	0.3	
CO2 Reactivity	Residue	%	ISO 12988-1	75 - 96	1 - 20	92	4	94	2
	Dust	%		0 - 10	0 - 10	2	3	1	1
	Loss	%		4 - 15	2 - 8	6	4	5	1
Air Reactivity	Residue	%	ISO 12989-1	55 - 95	4 - 18	68	12	80	10
	Dust	%		1 - 12	1 - 12	6	5	3	4
	Loss	%		4 - 35	4 - 15	26	9	15	6
Sulfur	%	ISO 12980	0.8 - 3.0	0.1 - 0.6	2.2	0.3	2.2	0.1	
Vanadium	ppm	ISO 12980	30 - 350	5 - 60	220	20	200	10	
Nickel	ppm	ISO 12980	70 - 220	5 - 20	130	10	130	10	
Sodium	ppm	ISO 12980	100 - 1000	50 - 800	250	200	150	100	
Iron	ppm	ISO 12980	100 - 800	50 - 1000	400	200	300	150	
Silicon	ppm	ISO 12980	50 - 300	50 - 300	150	150	100	100	
Phosphorus	ppm	ISO 12980	1 - 30	1 - 10	5	2	2	1	

2-3. Fours de cuisson d'anodes

Les fours de cuisson d'anodes ont subi des améliorations très notables qui seront abordées dans la section consacrée à l'état des travaux d'améliorations réalisées depuis des années. Cependant, il convient de connaître leur constitution, les opérations réalisées qui

interviennent dans leur fonctionnement [3, 10, 43-45]. D'emblée, un rappel a été fait sur les différents types de four.

2-3.1. Technologie des fours de cuisson : type et constitutions

a) Types de four de cuisson d'anodes

Il existe deux principaux types de four de cuisson d'anodes utilisés également de nos jours : les fours verticaux et les fours horizontaux présentés respectivement sur la figure 2-6 et la figure 2-7.

D'une façon générale, ces deux types de four se différencient simplement par la présence de couvercle au-dessus des sections dans le cas des fours verticaux. Il est de ce fait appelé four à toits fermés à l'opposé des fours à toits ouverts qui sont les fours horizontaux. Il a existé également des types de four de cuisson d'anodes qui sont hélas plus utilisés de nos jours pour des raisons économiques, énergétiques et environnementales. Le four Tunnel (Car-Bottom furnace) fut le premier type de four de cuisson d'anodes exploité dans l'usine de la chute de Froges créée par la société Électrométallurgique de Froges (SEMF) de Hall-Hérault qui fusionna plus tard avec la Compagnie Chimique d'As, Froges et Camargue pour donner Pechiney en 1921. Ce four (chauffé par deux gazogènes Siemens) qui possédait 56 mètres de long était capable de cuire 15 tonnes d'anodes par jour [46]. Il est fait d'une longue chambre unique qui comprend un plateau mobile sur lequel sont disposés les anodes qui parcourent diverses températures qui correspondent également aux zones de cuisson des anodes [47]. Les fours horizontaux à plusieurs chambres présentent plus d'avantages économiques et énergétiques contrairement aux fours à tunnel. Cela est vrai dans la mesure où le transfert de chaleur se trouve optimisé en raison de la présence de plusieurs chambres aux cloisons parallèles et séparés. Dans le four de type horizontal

que nous avons abordé dans la suite, les anodes sont enfournées dans les alvéoles. Ces anodes restent en place et les différentes étapes de cuisson se déplacent à travers le four. En générale, elles restent dans le four environ deux semaines et passent une moitié de leur séjour en chauffage jusqu'à des températures autour de 1150°C. L'autre moitié du temps, les anodes sont demeurées à la température de cuisson pour un moment pour leur orientation cristalline et ensuite sont refroidies. La durée écoulée depuis l'enfouissement d'une anode jusqu'à son défournement varie en fonction du cycle de feu de cuisson, avec chaque feu qui dure environ 24-28 heures en fonction de la conception de chaque four [3].

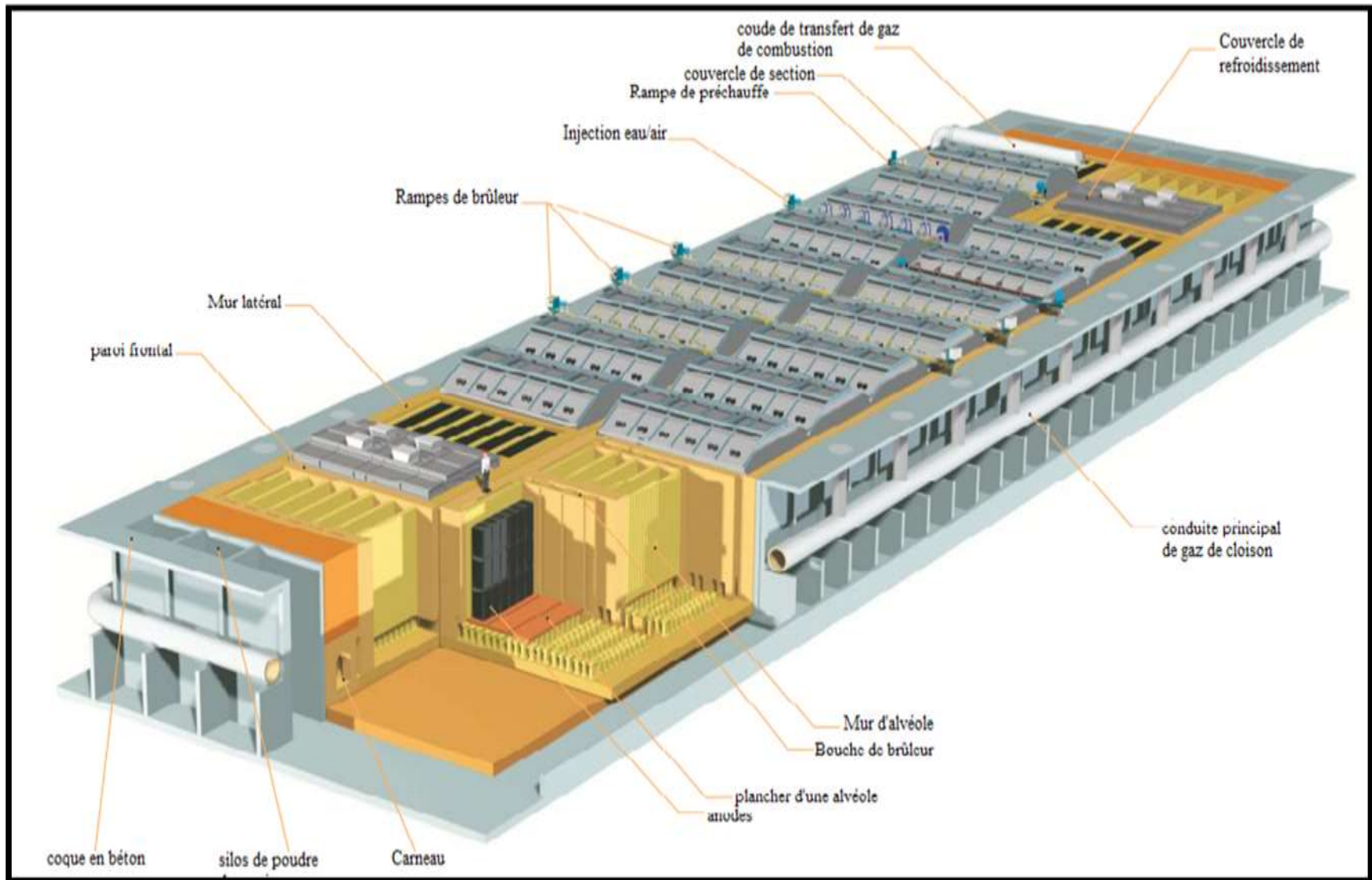


Figure 2-6 : Four vertical de cuisson d'anodes (Rhiedhammer) [48]

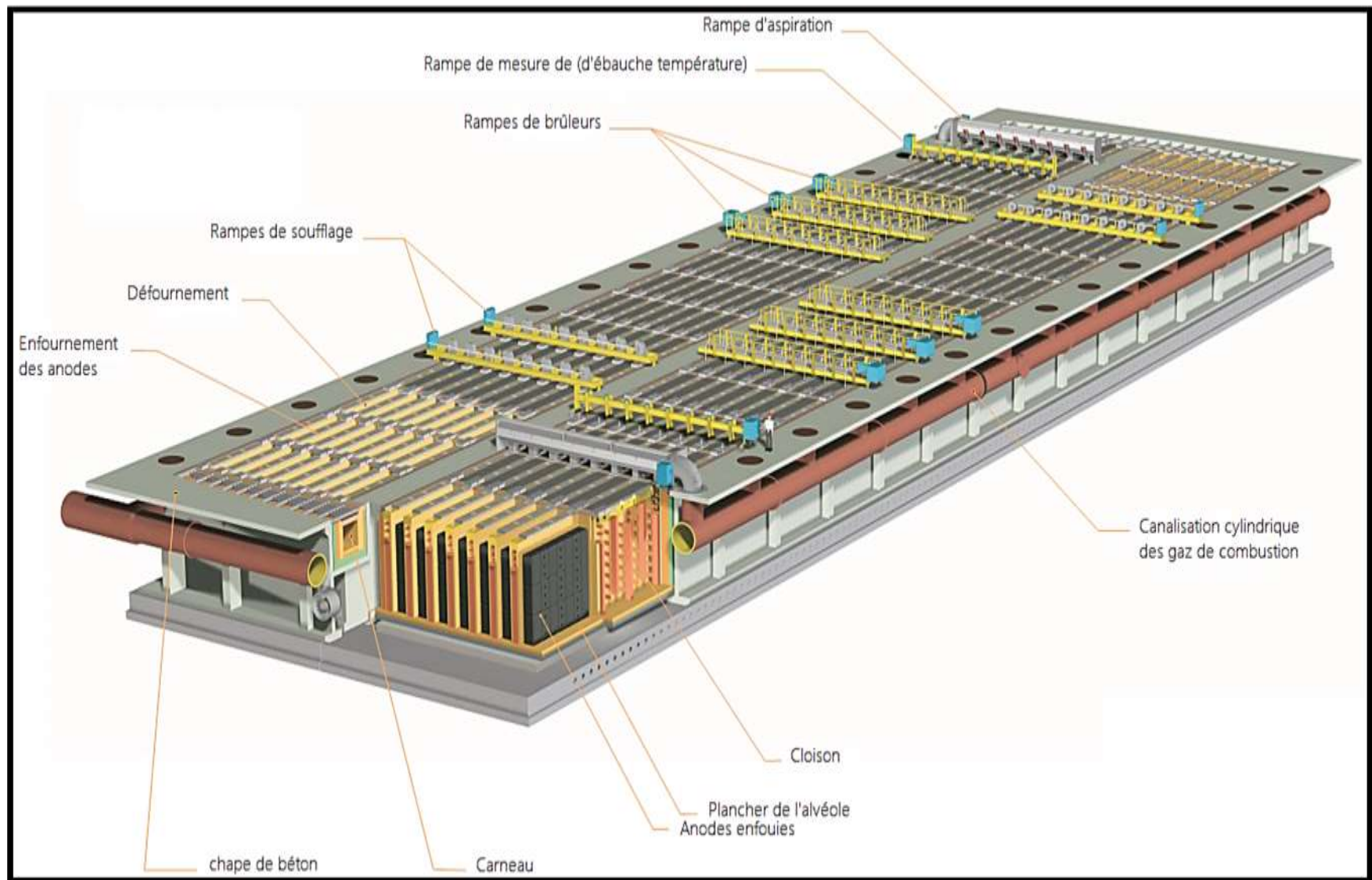


Figure 2-7: Four horizontal de cuisson d'anodes [49]

b) Constitution des fours de cuisson d'anodes

Les fours annulaires de cuisson d'anodes comprennent au minimum deux feux et disposent entre 14 et 18 sections par feu. Ces sections se composent elles-mêmes d'alvéoles parallèles généralement entre 5 et 9 séparées par des cloisons dans lesquelles circulent les gaz de combustion dont le sens de circulation est représenté par les flèches rouges sur la figure 2-8.

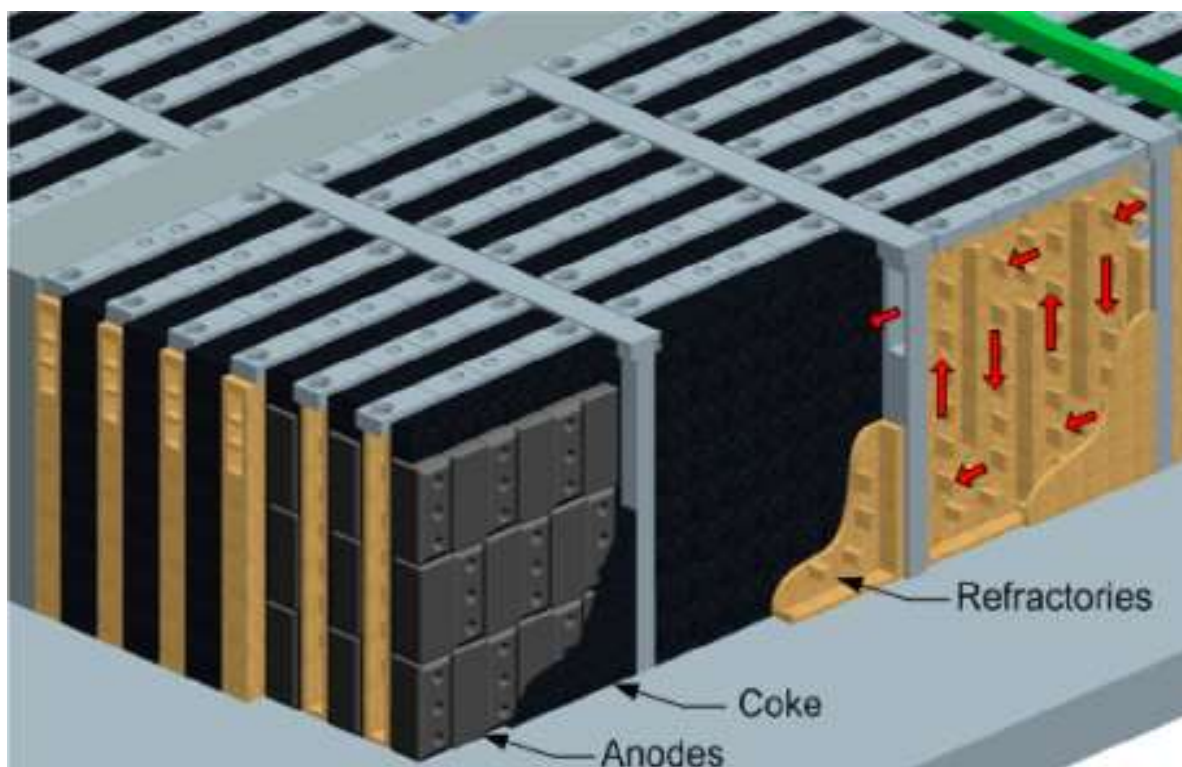


Figure 2-8: Représentation schématique d'une alvéole et d'une cloison dans un four horizontal [50]

Dans ces cloisons a lieu la combustion des volatiles qui libère l'énergie pour la cuisson des anodes qui sont enfournées dans les alvéoles. Ces anodes ne sont pas en contact direct avec les parois et le plancher du four de même qu'avec l'air. Elles sont emballées dans du coke de garnissage où elles forment un bloc qui est composé de rangée d'anodes pouvant aller à 18 anodes soit, 3 rangées de 6 anodes. Le coke de garnissage qui sera consommé en partie a pour rôle d'éviter l'oxydation des anodes avec l'air à des températures au-delà de 400°C. Tel que

mentionné plus haut, le coke de garnissage assure également un rôle de support mécanique pour éviter la déformation des anodes durant la cuisson [9].

2-3.2. Opérations liées à l'exploitation du four durant la cuisson

Plusieurs opérations dans le fonctionnement du four contribuent à la cuisson des anodes. Ce long processus de cuisson débute par leur enfournement dans les alvéoles. En effet, le séjour d'une anode dans un four de cuisson est délimité par le temps écoulé entre son enfournement et son défournement. Avant de disposer les anodes dans l'alvéole, le coke de garnissage est déversé sur le plancher puis au fur et à mesure de l'empilement des anodes, il est mis tout autour des blocs jusqu'à en couvrir la surface. Les anodes restent enfouies dans leur cloison respective, durant tout le long processus de cuisson qui est assuré par la progression du feu. Chaque four de cuisson d'anodes est constitué en général, d'un minimum de deux groupes de feux tel que présenté au bas de la figure 2-9 Elle met également en exergue la constitution d'un feu de cuisson d'anodes et ses équipements. De même, un aperçu de la distribution de la température à un instant donné dans un feu est présenté. Un groupe de feu de cuisson d'anodes comprend généralement quatre types d'équipements. Il s'agit des rampes de soufflage, d'aspirations, une rampe de pression zéro et trois rampes de brûleurs. On y retrouve également la rampe de mesure de fumées. Chacun des équipements présents joue un rôle bien spécifique décrit succinctement dans le tableau 2-5 qui propose une synthèse du rôle des équipements installés sur le four [3, 51]. Ils sont tous indispensables pour le procédé de cuisson. Leur déplacement séquentiel selon un ordre spécifique sur le four permet d'assurer la cuisson des blocs d'anodes enfournés. Outre les équipements d'exploitations qui sont installés sur le four, il existe des équipements liés au contrôle du procédé in situ. Il s'agit d'un ensemble de capteurs reliés à un automate qui est chargé de faire l'acquisitions des données de cuisson et de la réguler en fonctions des écarts

générés par rapport à la cible de production. L'automate se compose entre autres de modules dit PI et PROBAKE qui enregistrent les paramètres de la cuisson [3]. Il contrôle les consignes de pression et de températures visées au cours de la cuisson. Il contrôle également de manière automatique un ensemble d'alarmes et d'indicateurs du bon ou du mauvais fonctionnement des équipements. Ce système de contrôle offre une interface aux opérateurs afin de contrôler toutes les opérations du four.

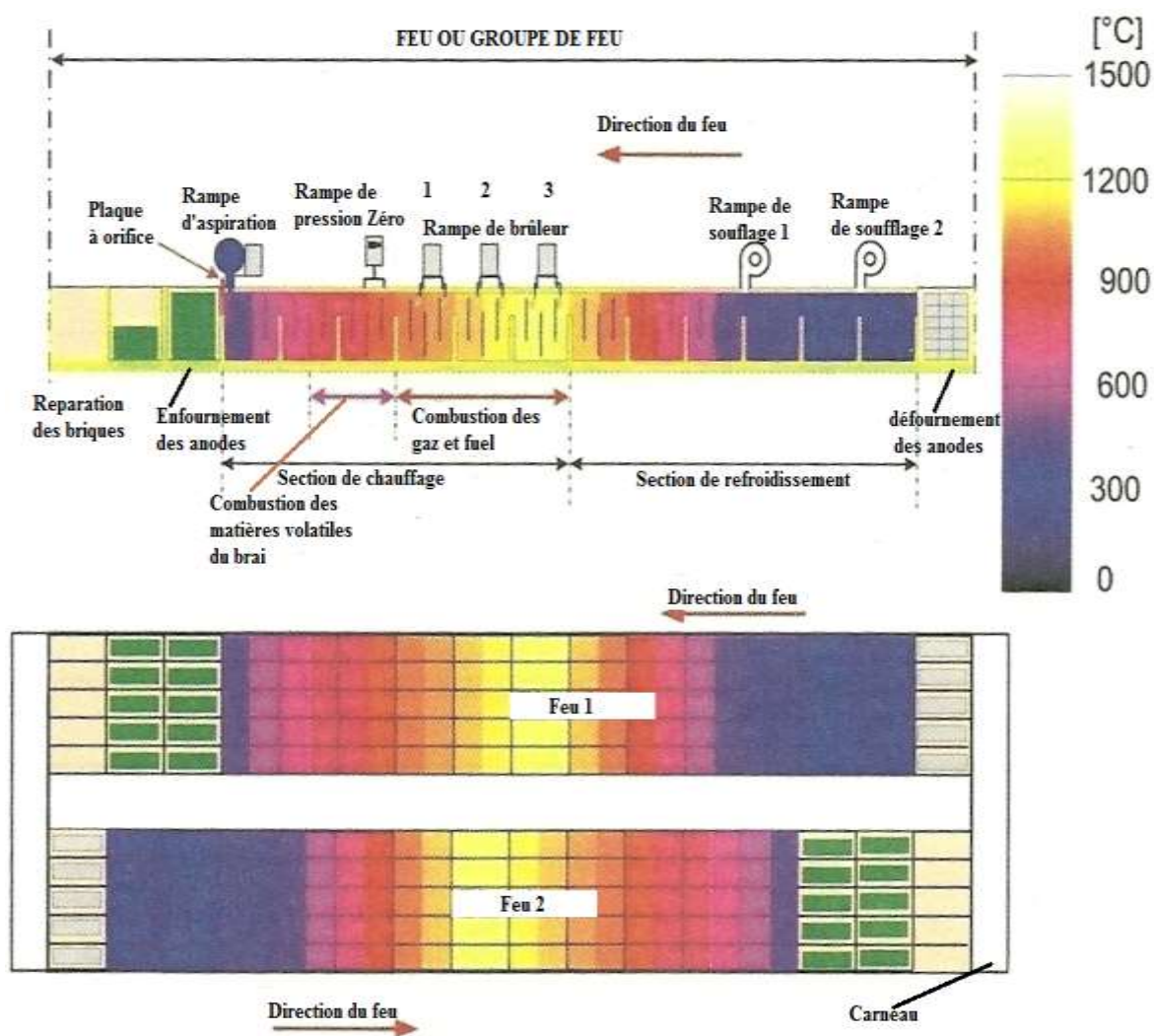


Figure 2-9:Aperçu de la disposition des équipements et la distribution de la température à l'intérieur d'un four horizontal à un moment donné [3]

Tableau 2-5 : Définitions et rôle des rampes constituant un feu de cuisson [3, 51]

Rampes	Zones	Rôle
Rampe d'aspiration	Préchauffage des anodes	Elle marque le début du chauffage des anodes fraîchement enfournées. Les fumées issues de la combustion des volatiles sont aspirées. Son débit est régulé avec le soufflage.
Rampe de mesure de fumées	Préchauffage des anodes	Elle sert au contrôle de la qualité de la combustion au niveau des brûleurs par mesure de la constitution des gaz. Les renseignements qui en découlent permettent de réguler l'injection d'air et de carburant.
Rampe de pression zéro	À l'entrée de la phase de chauffage des anodes	Elle est située sur la section précédant la première rampe de brûleur. Elle assure une pression négative dans les sections de chauffage et préchauffage afin de favoriser la succion des volatiles dans les cloisons.
Rampe de brûleurs	Chauffage des anodes	Elle sert à l'injection de gaz ou de carburant qui apporte la chaleur supplémentaire pour à la pyrolyse du brai.
Rampe de soufflage	Refroidissement des anodes	Son rôle consiste à souffler de l'air par l'intermédiaire de ventilateur dans les cloisons afin de refroidir les anodes. Elles sont disposées deux sections (sections de refroidissement naturel et forcé) après la zone de chauffage.

Il est important de retenir que la direction du feu est opposée à la direction de cuisson des anodes et correspond au sens de circulation du gaz dans les cloisons. Pour mieux se représenter les descriptions faites, il est suggéré de se référer à la figure 2-9 ci-haut. Si on s'en tient à ces définitions, la zone de chauffage est délimitée par la rampe d'aspiration (après la

section d'enfournement des anodes) en amont et la rampe de brûleur N°3 en aval. Elle comprend la zone de préchauffage des anodes par les gaz chauds circulant dans les cloisons et la zone de combustion avec auto-inflammation des matières volatiles et du combustible ajouté. Autrement dit, c'est la zone qui comprend le refroidissement des gaz et la combustion des volatiles. La zone de refroidissement débute après la rampe de brûleur N°3 et prend fin à la section après la deuxième rampe de soufflage. Ces zones de cuisson sont respectivement caractérisées par la présence de zone à « pression négative » et de zone « à pression positive ». La pression dite négative matérialise des pressions en dessous de la pression atmosphérique.

Dans la zone de sous pression, les ouvreaux des cloisons sont bouchés et un film plastique recouvre le dessus des cloisons afin de réduire au minimum l'infiltration d'air qui peuvent entrainer la dilution et le refroidissement de l'air de combustion, empêchant ainsi l'auto-inflammation des gaz dans la cloison. Cette région sous dépression regroupe les sections dites de préchauffage. La dépression permet également l'écoulement des volatiles dans les cloisons où a lieu leur combustion tel que mentionné plus haut.

Elle a aussi pour but de favoriser le craquage sous vide des éléments constitutifs du brai. En abaissant la pression, le point de volatilisation des constituants lourds se trouve abaissé et les plus légers passent sous forme gazeuse. Puis, ils forment un mélange avec l'oxygène disponible qui s'enflamme lorsque les conditions thermodynamiques sont réunies. On peut aussi remarquer que dans les cloisons où il y a injection de carburant, le gaz circule dans la cloison est à contre-courant si le combustible est de l'huile et parallèle si le combustible est du gaz naturel.

Dans la zone de refroidissement, on a une section de refroidissement forcée (deuxième rampe de refroidissement) dans laquelle les ouvreaux sont ouverts à l'air comme il est perceptible

sur la figure 2-10 suivante afin de permettre aux anodes d'effectuer un refroidissement qui leur permettra d'effectuer un refroidissement le plus proche possible de la température ambiante. Ainsi, ce n'est que la chaleur des anodes installées dans les sections dédiées au refroidissement naturel (avec les ouvreaux qui sont fermés) qui sert à préchauffer l'air injecté à partir de ces sections. Le fonctionnement du four est régi par des opérations de routine, que sont la permutation des feux, l'enfournement des anodes, le contrôle et le suivi du feu ainsi que la maintenance des équipements. La bonne exécution de ces informations et le suivi des opérations sont très importants pour garantir une bonne combustion des matières volatiles. On évalue la vitesse de la cuisson en fonction du temps écoulé entre les mouvements de toutes les rampes durant la permutation.

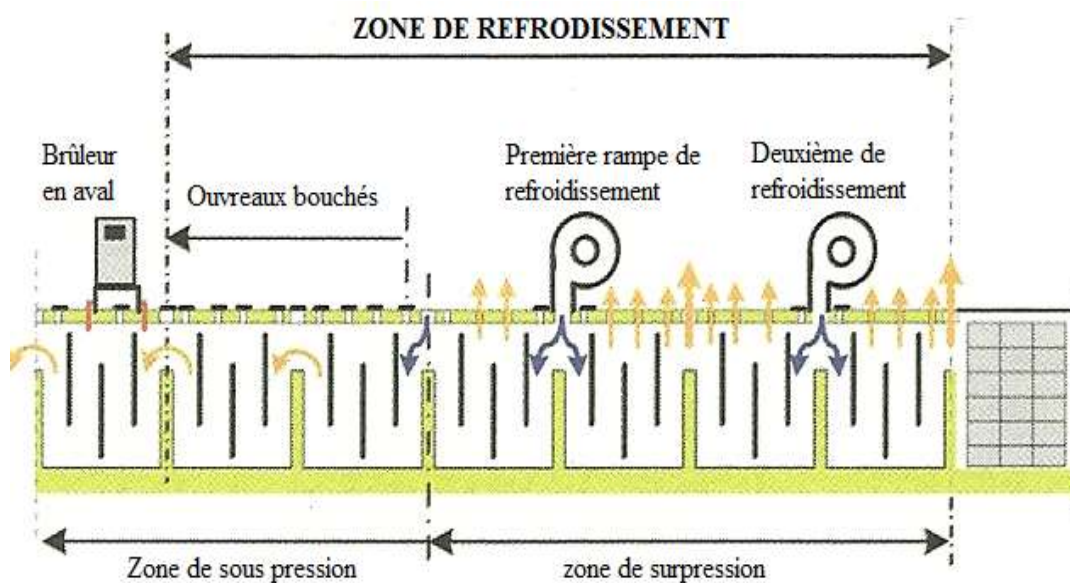


Figure 2-10: Schéma d'une zone de refroidissement montrant le sens de circulation d'air (chaud en orange et froid en bleu) [3]

Comme on peut l'observer aussi sur cette figure, dans la zone de sous pression, les ouvreaux des cloisons sont bouchés et un film plastique recouvre le dessus des cloisons afin de réduire au minimum l'infiltration d'air qui peuvent entraîner la dilution et le refroidissement de

l'air de combustion, empêchant ainsi l'auto-inflammation des gaz dans la cloison. Cette région sous dépression regroupe les sections dites de chauffage et de préchauffage [3].

a) Permutation des rampes (progression du feu de cuisson)

La progression de feu consiste au déplacement des différents équipements de manière à faire circuler les différentes phases de cuisson sur les anodes. Un feu est muni d'une ou deux rampes d'aspiration des fumées, d'une rampe de mesures, de 2 à 4 rampes de brûleurs qui fonctionnent avec du gaz ou de l'huile et de 1 à 2 rampes de soufflage qui injectent l'air dans les cloisons. Un cycle de feu dure généralement entre 24 et 28 heures voire 32 heures par section. À la fin de chaque cycle de feu, a lieu la permutation des rampes. Dans le procédé de cuisson, elle caractérise un régime variable qui dure tout le temps de la permutation. On déplace les rampes vers un nouvel état stationnaire, ou un autre cycle de feu. Cette opération peut varier en fonction des différentes conceptions de four. Pour les fours disposant de deux rampes d'aspirations, les deux fonctionnent en alternance. L'une est en activité et l'autre à l'arrêt puis sera mise en marche au prochain cycle de feu.

Rappelons les différentes zones de la cuisson pour un cycle de feu sur les zones de préchauffage, de chauffage et de refroidissement successivement. Le préchauffage à gauche des sections munies des rampes de brûleurs, le chauffage au niveau des sections avec brûleurs et enfin le refroidissement pour les six premières sections. Cette disposition peut changer selon le besoin d'exploitation du four. Mais, pour un cas typique, et pour des besoins d'explication, considérons la disposition à l'état stationnaire sur la figure 2-11 dans le cas d'une permutation en ligne droite avec une rampe d'aspiration. La figure 2-12 montre le cycle de permutation dans le cas d'une rampe d'aspiration de remplacement.

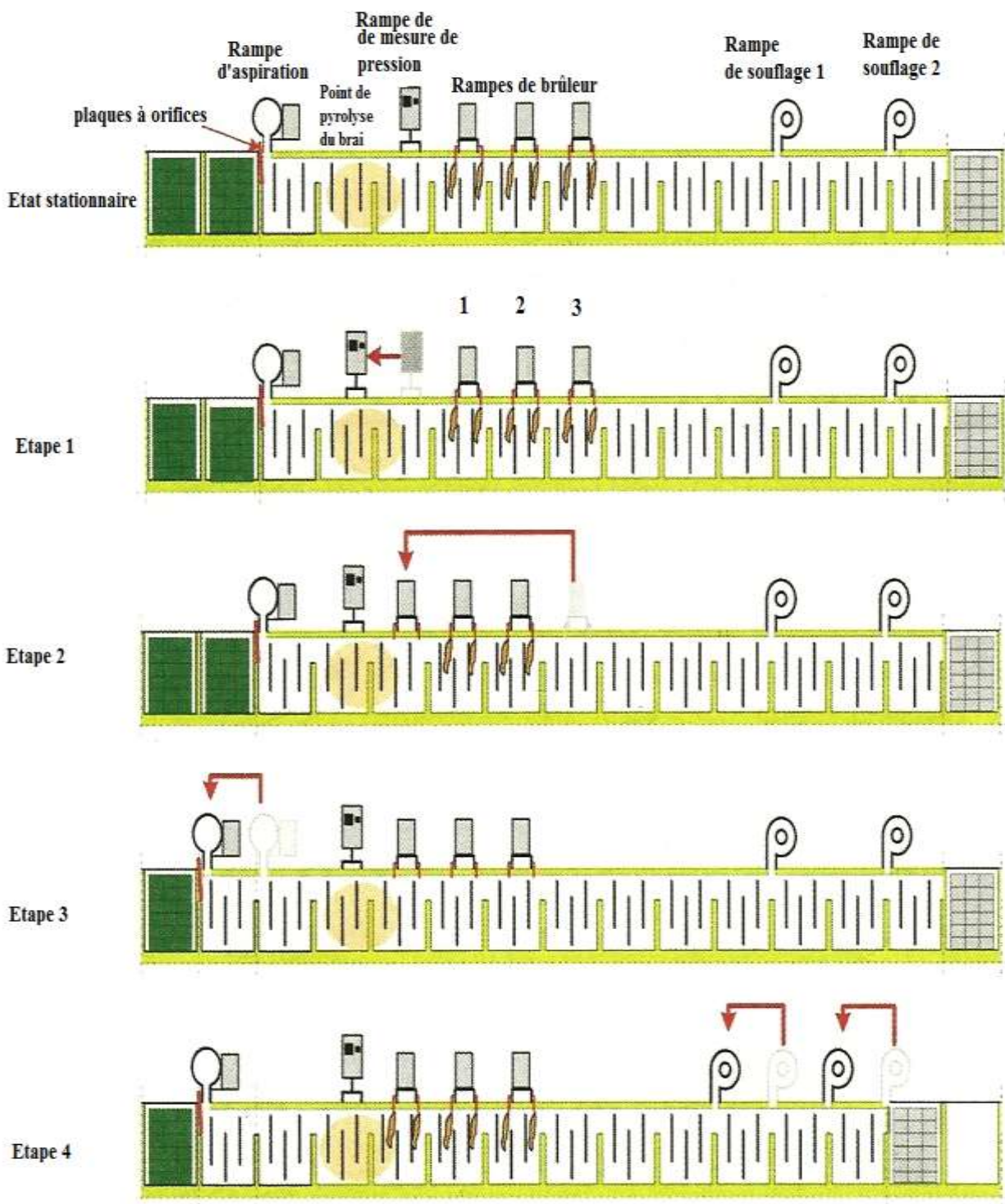


Figure 2-11: Étapes typiques de permutation des rampes d'un feu disposant d'une seule rampe d'aspiration

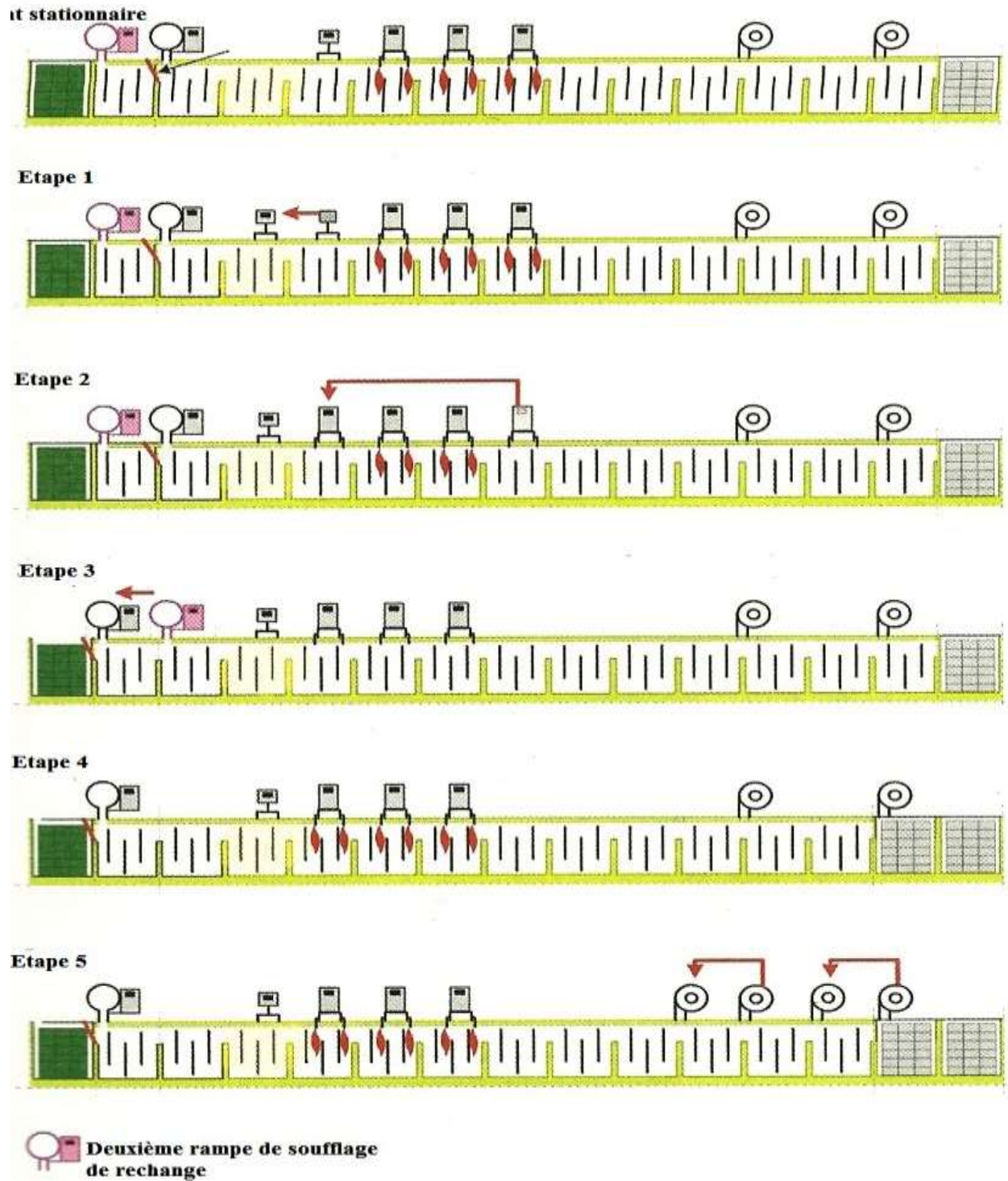


Figure 2-12: Procédures de permutation avec une rampe de soufflage de recharge [3]

La permutation de feu en ligne droite se fait en 4 étapes :

Etape 1 : Déplacer de la rampe de mesure de pression et température des fumées d'une section dans la direction du feu.

Etape 2 : La rampe de brûleur 3 dans la conception du four est reliée à une rampe de pression zéro qui assure le maintien de la dépression dans la zone de chauffage. Une fois débranchée la rampe de pression zéro, déplacer le troisième brûleur vers l'avant et le mettre en avant des deux autres ;

Etape 3 : Arrêt des rampes de brûleurs, pour la permutation des brûleurs et de la rampe d'aspiration. Il est important de savoir que cette manière de faire n'est plus beaucoup utilisée car elle entraîne des chutes de température durant la cuisson. Ainsi, pendant la permutation d'un brûleur, les deux autres fonctionnent. Quant à la rampe d'aspiration, des obturateurs en plastiques thermodurcissables sont installés sur les sections dans la zone de préchauffage pour empêcher l'infiltration d'air. Dans cette configuration, les obturateurs sont également déplacés lors de la permutation avant tout autre déplacement. Par la suite, on relie la rampe de pression zéro au brûleur N°3 auparavant N°2.

Etape 4 : Enfin, on permute les deux rampes de soufflage d'une section dans la direction du feu.

Cette suite d'opérations est reprise à chaque fois qu'on permute un feu. Le déplacement des feux est équivalent à un déplacement sur un trajet en forme d'anneau. Il arrive donc que le feu soit à cheval sur un carneau. Dans ce cas, la procédure de permutation est identique à celle en ligne droite lorsque le feu ne dispose que d'une seule rampe d'aspiration. Celle à l'arrêt est

disposée à la sortie du carneau. Dans ce cas, les points de mesure de pression et de température changent en raison de la chute de pression dans cette zone [3, 51, 52].

b) Mise en marche d'un four - Calibration

Une fois que la construction est achevée, toutes les chambres d'un four doivent préalablement être séchées avant de débiter une cuisson d'anodes. Cette opération permet d'éliminer l'eau et d'assurer l'équilibre mécanique des murs réfractaires. Elle consiste à chauffer progressivement jusqu'à 1050°C à une vitesse de 7°C/h suivi d'un maintien à 1050°C et d'un refroidissement lent. Durant la première période, toutes les alvéoles sont chargées d'anodes cuites et de coke de garnissage afin de bien maîtriser la montée de la température.

Afin de permettre la progression du feu et surtout d'apporter l'air de combustion en quantité suffisante, au niveau des sections de chauffage certaines mesures sont prises. Les valeurs de pression sur les rampes d'aspiration sont réglées entre -20 Pa et -130 Pa. Le séchage est organisé suivant deux phases qui sont : la constitution séquentielle du feu de séchage et sa progression [13, 53].

c) Suivi et contrôle du four

De nos jours, bon nombre de fours opèrent avec un système de contrôle automatique de procédé afin d'assurer une bonne distribution de la température et de la pression dans le four. Cela a pour avantage d'assurer une même répartition de la qualité des anodes produites. La figure 2-13 ci-après présente un arrangement typique des équipements de contrôle sur un four.

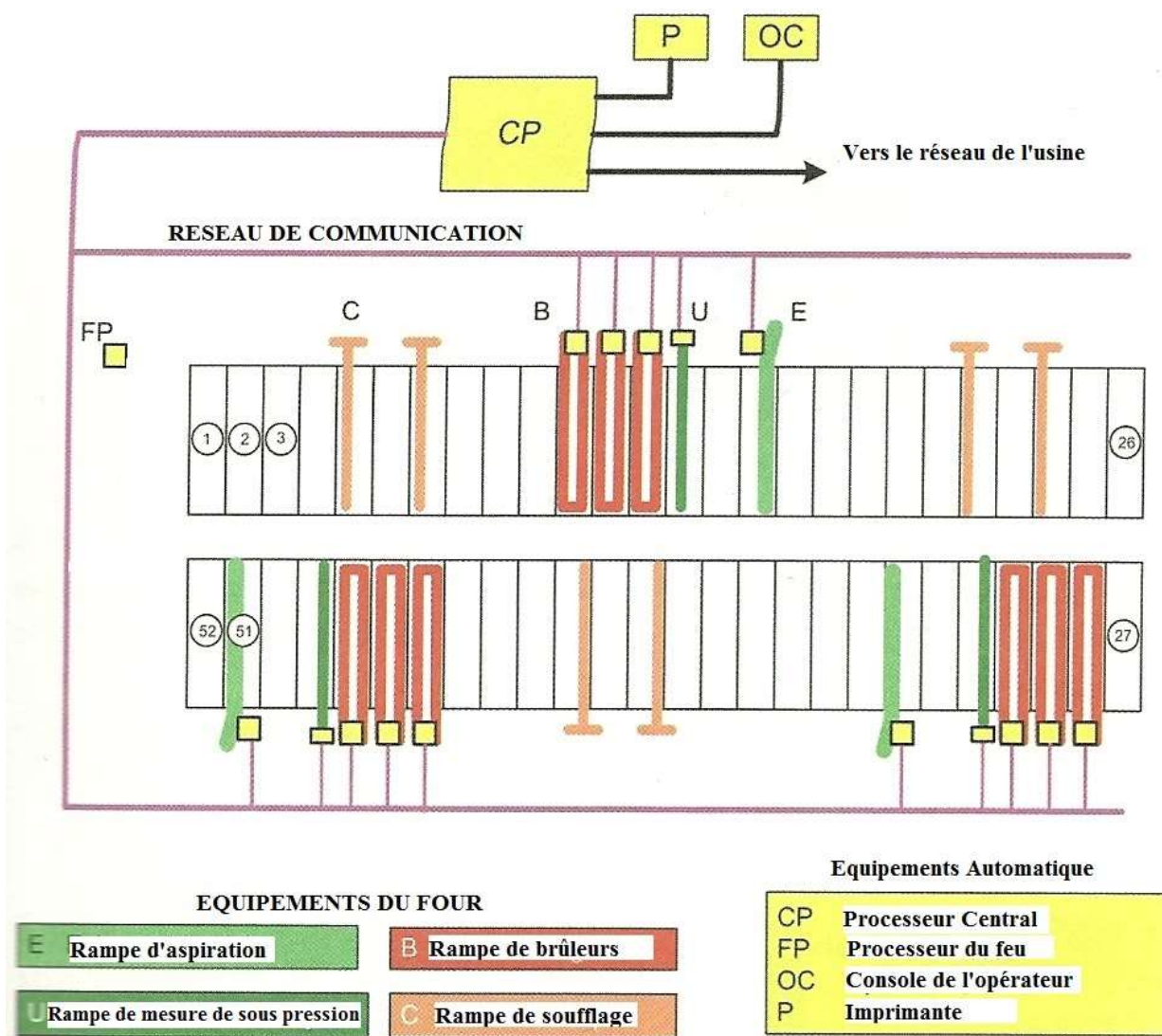


Figure 2-13: Exemple typique de système de contrôle de procédé de cuisson d'anodes [3]

Les contrôleurs sur les rampes de feu, la rampe de pression zéro et la rampe d'aspiration mesurent les paramètres réels du feu et les comparent avec les paramètres de consignes et mènent les actions correctives à partir des vannes d'injection de gaz ou de carburant ou même avec la rampe de sous pression pour rester dans la zone de températures cible [54].

d) Vérification de performance

Une fois démarré et en fonctionnement, il est impossible d'effectuer les tests sur le four lorsqu'une anomalie survient. Dans ces situations, il est recommandé l'utilisation de méthodes

effectuant les tests virtuels afin de repérer les causes de l'anomalie et la réparer par prédiction grâce aux outils de modélisation et simulation Dynamique des fluides computationnelle (Computational Fluid Dynamics, CFD). Outre l'utilisation d'outils de prédiction comme CFD, de nombreuses travaux et modèles ont été inspirés.

2-4. Travaux d'améliorations des fours de cuisson d'anodes

La cuisson est une des principales étapes dans la fabrication des anodes de carbone utilisées dans l'industrie de l'aluminium. Ainsi, le four de cuisson des anodes doit être délibérément conçu pour obtenir une répartition optimale de température dans les conduits de fumée et alvéoles, une faible consommation d'énergie et une longue durée de vie réfractaire du mieux que possible et minimiser les coûts d'exploitation et d'entretien. Durant des années, de nombreuses découvertes ayant contribué à l'amélioration de la performance des fours de cuisson des anodes ont été faites. On compte une panoplie de travaux réalisés pour l'amélioration du procédé de cuisson des anodes [55]. Cependant, dans notre étude, nous nous sommes intéressés aux travaux qui portent sur la modélisation mathématique des fours de cuisson et de leur contrôle.

2-4.1. Simulation du procédé de cuisson

À cet effet, il existe un certain nombre d'ouvrages traitant de leur modélisation mathématique, parmi les travaux portant sur les fours de cuisson d'anodes horizontaux. Certains modèles solutionnent les équations différentielles de la quantité de mouvement et des transferts de chaleur et de masse en 3D en incluant tous les phénomènes qui se présentent durant la cuisson. Ces modèles donnent des informations détaillées sur les distributions des vitesses, des températures et des espèces chimiques en 3D, ils peuvent être utilisés pour tester les différents paramètres de design. Donc, ce type de modèle est appelé « modèle de design ». La simulation

des fours avec ces modèles requiert un temps de calculs très long (plusieurs heures). Pour d'autres applications, on peut simplifier la représentation de certains aspects du procédé dans le modèle pour qu'on puisse diminuer le temps de calcul. Dans ces modèles, on obtient moins de détails, mais on peut avoir des résultats dans un très court temps (quelques minutes). En fonction du besoin industriel, on peut choisir une de ces deux approches de modélisation. Différents articles publiés sur la modélisation des fours de cuisson d'anodes sont présentés et discutés dans cette section (voir aussi le tableau 2-6 pour une liste des articles).

Les premiers travaux dataient des années 1980. Ils portaient sur la modélisation liée au processus de cuisson à l'aide d'un four vertical de type Riedhammer [10, 56-58]. Mais, excepté l'équation générale de conduction de la chaleur, aucun autre détail n'était donné sur le modèle mathématique. Le premier modèle de four vertical a été construit par Furman et Martirena [56]. C'était une réadaptation d'un modèle initialement prévu pour simuler le comportement des cellules électrolytiques. Les analystes ont dû fournir au départ un différentiel expérimental de température entre le haut et le bas de la conduite. L'équation de Fourier en régime dynamique est résolue grâce à une méthode implicite de type Crank-Nicolson. Bien que ces modèles soient dynamiques, ils ont des grandes limitations. En effet, l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur dans la cloison sont ignorés, alors qu'ils sont importants pour le transfert de chaleur dans l'alvéole. Cependant, Monica et al. ont fait une découverte intéressante pour les fours de cuisson de type vertical. Ils ont montré que la distribution non uniforme de gaz et la résistance du coke de remplissage au transfert de chaleur (horizontale) sont à l'origine de la non uniformité de la température des anodes [55].

Tableau 2-6 : Modèles (de procédé et de design) tirés de la littérature

Modèle	Auteurs	Démarches
Modèle de procédé	Furman et Martirena [56]	- Four vertical ; - Modèle 1D (solide et gaz)
	Monica et al. [57]	- Four vertical ; - Modèle 1D (solide et gaz)
	Keller et Disselhorst [58]	- Four horizontal ; - Modèle 1D (solide et gaz)
	Bui et al. [59]	- Four horizontal ; - Modèle 2D (solide) et modèle 1D (gaz)
	Bourgeois et al. [60]	- Four vertical ; - Modèle 2D (solide) et modèle 1D (gaz)
	Dagoberto et al. [53]	-Four horizontal -Modèle en régime transitoire avec interface utilisateur ; modèle 2D (solide) et modèle 1D (gaz).
	Thilbault et al. [61]	-Four horizontal -Modèle 2D (solide) et modèle 1D (gaz).
Modèle de design	Oumarou et al. [62] Kocafe et al. [63, 64]	-Four horizontal -Modèle 2D (solide et gaz) -Écoulement bidirectionnel des gaz dû à la présence de chicanes dans les cloisons.
	Kocafe et al. [65]	-Four horizontal, -Premier modèle 3D
	Severo et al. [66]	-Four horizontal -Modèle 3D
	Baiteche, M. et al. [67] Baiteche et al. [68]	-Four horizontal -Simulation d'un cycle de feu complet
	Kocafe et al. [63, 64]	-Modèle 3D

Dans le cas des fours horizontaux, l'hypothèse de considérer le four comme un échangeur de chaleur à contre-courant fut longtemps exploité dans les recherches [58, 69]. Keller et Disselhorst, en 1981 [58] ont fabriqué une maquette afin de trouver la bonne configuration géométrique qui assure la cuisson la plus homogène. Partant de l'hypothèse et de l'écoulement fourni de leur maquette, ils ont défini la vitesse de cuisson. C'est la longueur d'une chambre divisée par la période de permutation qu'ils appelèrent 'vitesse du four'. Dans ce modèle, l'évolution des températures dans le temps à l'intérieur d'une chambre est considérée la même. Ils ont également démontré que pour deux positions à l'intérieur d'une même chambre, la courbe de température subit un décalage proportionnel à la distance séparant les deux points considérés. Les résultats sont présentés à la figure 2-14 ci-après. Ils ont observé qu'en réduisant l'aspiration, le temps de résidence des gaz est augmenté dans la cloison, ce qui favorise une augmentation de la chaleur fournie par la combustion du gaz naturel (courbe Q sur la figure 2-14).

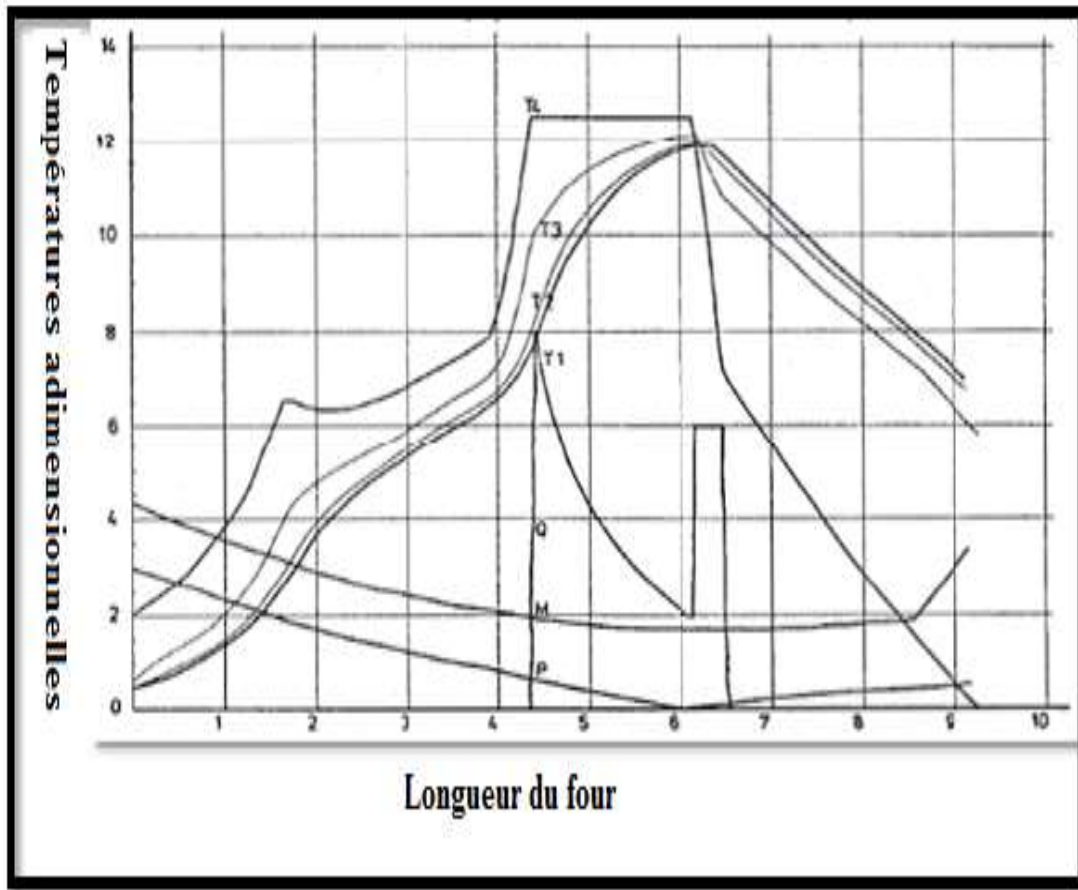


Figure 2-14 : Profils de cuisson des anodes avec diminution du débit d'aspiration des gaz [58]

Sur la figure 2-14, les profils représentés traduisent:

- Le débit massique de gaz dans les cloisons : M ;
- La dépression dans la cloison : P ;
- Le flux de chaleur provenant de la combustion du gaz naturel : Q.

Les températures T_1 , T_2 , T_3 , T_4 sont celles des couches le long des fours tels que l'illustre la figure 2-15 avec chacune des sous partie désignant :

- 1 : première couche d'anode
- 2 : seconde couche d'anode
- 3 : le coke de garnissage

- 4 : le mur de la cloison
- 5 : chicanes et entretoises
- 6 et 7 respectivement les couches de la fondation sur le côté anode et de la cloison.
- 8 et 9 : respectivement les couches de surface en contact avec le coke de garnissage et la cloison.

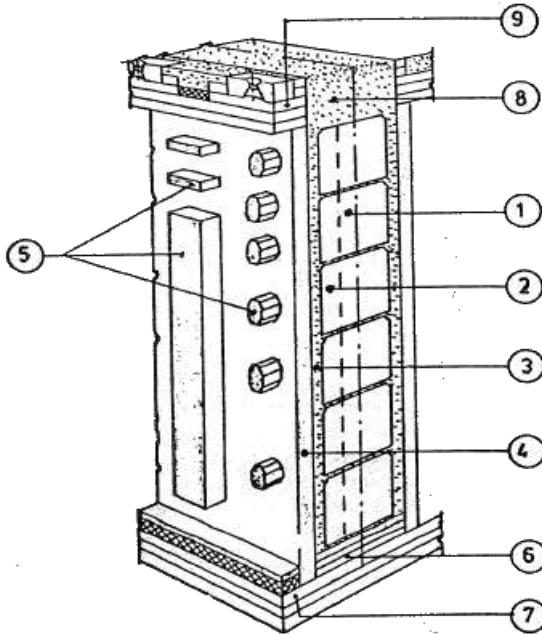


Figure 2-15 : Subdivision d'une coupe transversale d'un four [58]

Grâce à ces courbes, il est possible aussi d'établir des relations pour aider à mieux comprendre les fours de cuisson. On peut confirmer que le début de la dévolatilisation du brai est étroitement lié à la température des anodes. Cette conclusion pourrait nous être utile dans la justification de l'hypothèse qui implique la quantification de la dévolatilisation sur lequel s'est basé le modèle développé.

En 1984, Bui et al. [59] ont développé un modèle mathématique de four horizontal de cuisson. Ce modèle associe l'infiltration d'air au calcul de la dépression dans les sections de chauffage-préchauffage au dégagement de volatiles ainsi qu'à leur combustion. Ils assimilent le

four de cuisson d'anodes à un échangeur de chaleur à contre-courant. Le gaz y possède une vitesse variable en fonction de sa masse, de sa pression et de sa température. Les anodes (auxquelles la chaleur est transférée) sont à une vitesse constante. Elle est égale au rapport de la longueur d'une section par le pas de temps de calculs. Le profil de température de gaz découle de l'équation de transport de la chaleur évaluée sur un volume de contrôle $HZdx$ comme le présente la figure 2-16, soit en 1D. Par contre, le profil de température dans les solides provient de l'équation de transfert en 2D sur des plans verticaux en 'yz'. La méthode de résolution utilisée est la méthode explicite d'Euler utilisant des différences finies. De même, le dégagement des volatiles y est estimé expérimentalement comme une fonction de la température des anodes. De leur étude est faite une correspondance directe entre l'axe du temps et l'axe longitudinal du four. Il a été établi de même un profil de températures moyennes à l'intérieur d'une période de permutation. Ces résultats furent déduits à l'issue de leurs travaux consignés dans. Leur modèle prend en compte plusieurs aspects importants de la cuisson des anodes : l'infiltration de l'air, le contrôle de la dépression dans les conduites de gaz, la libération et la combustion des éléments volatils, la perte de chaleur dans l'atmosphère et à travers la fondation du four. Ils ont adopté une approche particulière, qui consistait à découpler le modèle en deux parties ("macro-modèle" et "micro-modèle") qui interagissent l'un et l'autre. Le "macro-modèle" traite du transfert de chaleur entre le gaz et les solides (considérés comme des murs) alors que le "micro-modèle" calcule le transfert de chaleur dans les solides.

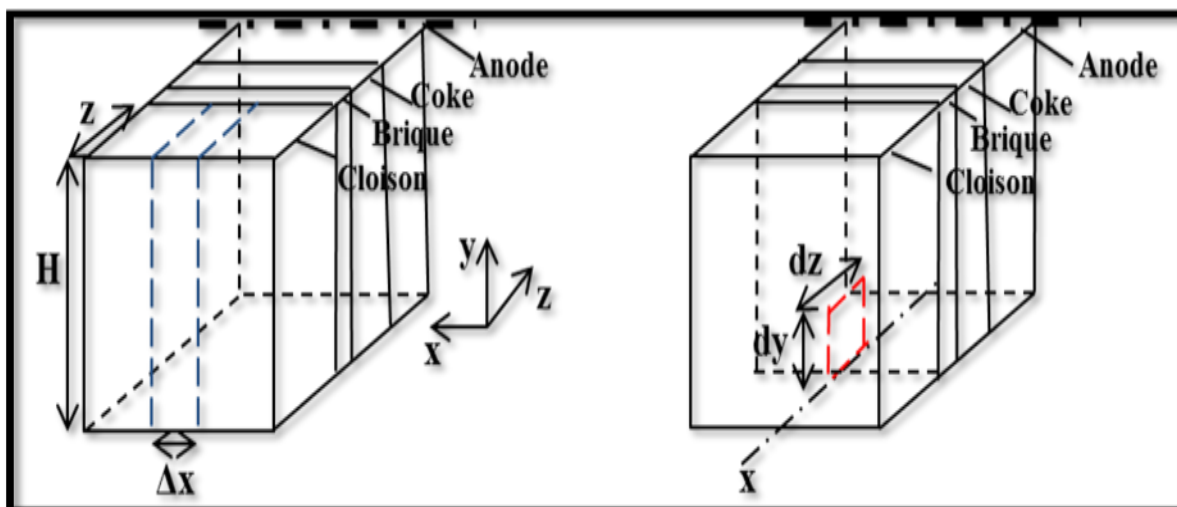


Figure 2-16: Discretisation des modèles de gaz et de solide montrant les volumes de contrôle [59]

Ils obtinrent les profils de température de gaz et d'anodes le long du four approchant les résultats de campagnes de mesures. L'évolution des volatiles et le profil de pression fut obtenus et consignés à la figure 2-17.

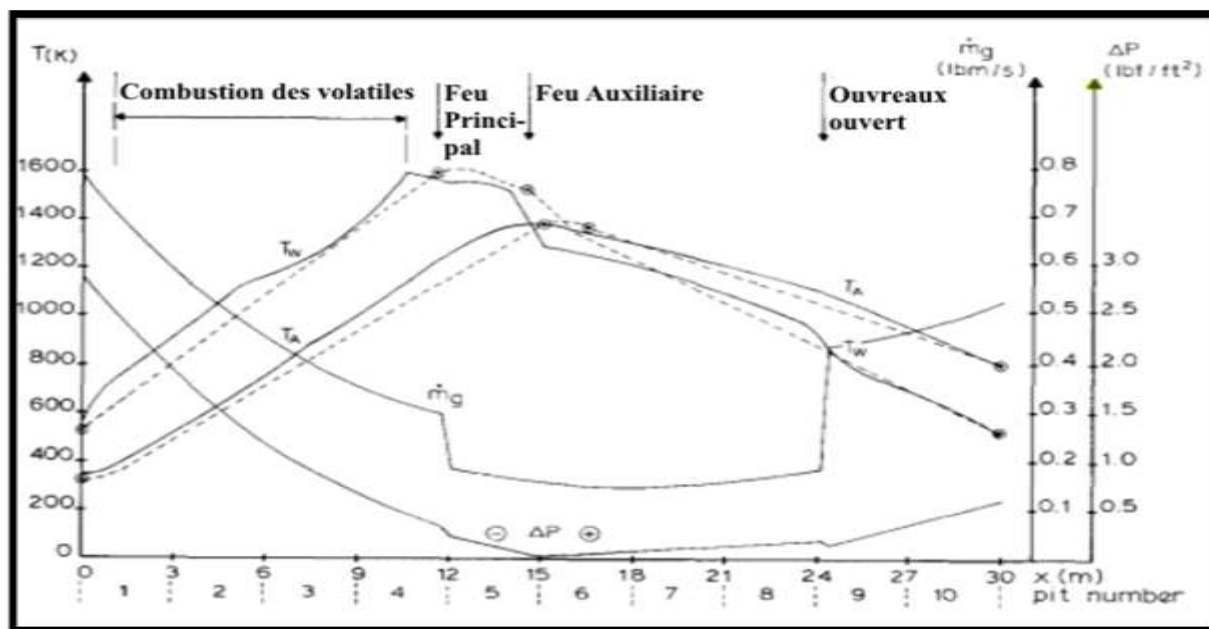


Figure 2-17 : Profils de température des anodes et du mur calculés en comparaison avec les profils expérimentaux [59]

Les auteurs ont montré que ces modèles pourraient être utilisés pour simuler un four annulaire de cuisson des anodes et prédire ses performances en réponse aux variations des divers

paramètres opératoires. En effet, il en est ressorti que la réduction ou l'élimination d'infiltration d'air permet d'économiser 46% de la consommation du carburant qui dépend, à son tour, du nombre de feux, de la circulation d'air et de la longueur du four [59]. Néanmoins, dans ces différents modèles, l'infiltration d'air est décrite par une relation (déterminée expérimentalement) entre la dépression qui prévaut à l'intérieur de cloison et le flux massique. Cela demande des expériences à la fois assez longue et coûteuse. Ainsi, une version améliorée du modèle mathématique est développée. Dans ce cas, le transfert de chaleur entre le gaz et les solides et le transfert de chaleur dans les solides sont traités dans un seul et unique modèle qui davantage inclut une sous routine pour l'infiltration d'air et une autre pour la libération et la combustion des matières volatiles. Du fait de cette amélioration, le modèle a permis d'étudier les effets de divers paramètres opératoires notamment la température de cuisson, le débit d'air de refroidissement, la réduction d'infiltration d'air, la durée du cycle de feu et l'injection de l'eau dans les cloisons.

Le micro-modèle de solide est basé sur la résolution par la méthode explicite des différences finies de Schenck de l'équation de transfert de la chaleur par convection à la brique qui la transfère par conduction au coke puis à l'anode comme dans [59]. Cette dernière version du modèle est aussi complétée et publiée en 1987 par Bui et al. [70]. Ainsi, dans ce cas-ci, au lieu d'être donnée expérimentalement, la relation entre l'infiltration d'air et la différence de pression est calculée numériquement sur la base d'estimation de l'étanchéité à l'air du four rendant le modèle plus général et moins dépendant de données expérimentales. Ce dernier sert d'instrument d'analyse des fours annulaires à feux mobiles et permet de mesurer ainsi l'effet des paramètres de fonctionnement sur le rendement énergétique, le comportement du four et la qualité du produit final. Le concept sert à intégrer les modèles (macro et micro) dans un seul modèle composé d'une équation différentielle décrivant l'équilibre d'enthalpie pour le gaz et des équations traitant le

transfert de chaleur dans les solides. Cela permet de résoudre toutes les équations simultanément. En plus, les équations de conduction dans les solides sont résolues en deux dimensions. L'ensemble du procédé est toujours un échangeur à contre-courant semi-continu, mais celui-ci est rendu complexe par d'autres phénomènes comme l'infiltration d'air, la libération et la combustion des matières volatiles, les pertes de chaleurs. Quatre sources d'infiltration d'air sont aussi considérées : ouverture du mur de la tête (fermée ou ouverte), les ouvertures de judas (fermés ou ouverts), les fissures dans la brique de travail au-dessus de cloison et le coke de garnissage. Le modèle est alors capable de produire les conditions réelles d'opération et de prédire le comportement et le rendement du four pour d'autres conditions. Les résultats obtenus ont favorisé le développement d'un nouveau modèle à trois dimensions. Et, contrairement aux modèles antérieurs, considérant une section complète d'un four annulaire vertical, ce modèle intègre les effets de combustion de carburant. Il traite également la combustion des matières volatiles et du poussier de garnissage, l'infiltration d'air frais et la perte de chaleur dans l'atmosphère ambiante [71]. Le modèle est validé à travers de nombreuses comparaisons avec les observations qualitatives et quantitatives disponibles des usines. Ils ont trouvé que les cas où le milieu de la zone de feu est fermé (avec ou sans écoulement uniforme) donnent des températures des anodes plus grandes comparée aux cas où la zone de feu est totalement ouverte (avec écoulement uniforme).

La plupart des modèles mathématiques développés au cours des années se sont succédé dans le but de simuler le comportement du four de cuisson d'anodes. Pour des raisons économiques, ils adoptent plus ou moins des bases similaires. À la base de ceux-ci, on retrouve les mêmes hypothèses. Le fonctionnement thermique du four assimilable à un échangeur contre-courant. Et l'étude de l'écoulement des gaz est faite suivant une direction le long du four celle

des solides suivant un plan vertical perpendiculaire à la direction d'écoulement. Les phénomènes d'infiltration, de dévolatilisation et de combustion des volatiles sont exploités à travers leurs équations [52, 53, 59-61, 72, 73]. Tous les modèles développés permettent de faire une prédiction du comportement du four.

En 1990, Bourgeois et al. [60] ont également mis l'accent sur les pertes et gains de chaleur ainsi que les infiltrations d'air et le débit de gaz et ont développé un modèle mathématique de fonctionnement en régime transitoire du four vertical de cuisson d'anodes 2D. En considérant tous les phénomènes physiques qui ont lieu dans le four, ce modèle ne tient pas compte des sections situées dans la zone de refroidissement forcée et fait l'hypothèse que la température du gaz à l'entrée d'une cloison est la même. Ils ont donc créé un programme de simulation qui fournit le bilan énergétique, la distribution de la température dans les anodes. De même, la composition des gaz le long du four, l'infiltration de l'air et la quantité de carburant nécessaire à la cuisson sont prédites. Ce modèle est capable de fournir ces renseignements précités en considérant les paramètres géométriques du four, des anodes et composition. Mais, il ne peut pas rendre compte de l'effet des modifications de conception telles que proposées dans les travaux de Jakobsen, et al. comme présenté dans [52].

Kocaeffe et al. [65] ont développé un modèle en 3D d'un four de cuisson d'anodes par la résolution de plusieurs équations différentielles régissant les phénomènes durant la cuisson. Ils utilisèrent un code commercial CFD-FLOW3D. Ce modèle est subdivisé en deux sous modèles : le modèle de cloison et le modèle de gaz dont la représentation schématique est illustrée par la figure 2-18. Le modèle pour la cloison prend en compte divers phénomènes notamment l'écoulement établi en 3-D du fluide, la radiation thermique. La combustion de carburant et des matières volatiles, le modèle de turbulence $k-\epsilon$, l'infiltration d'air et les pertes de chaleurs dans

l'atmosphère et à travers la fondation ont été également intégrés. C'est un simulateur de calcul pour étudier les effets des propriétés des cloisons, des compositions des anodes (en matières volatiles) et l'effet des infiltrations sur la performance des fours. Ils arrivèrent à la conclusion de la détermination de la distribution non homogène de la température à l'intérieur de la cloison. Le modèle de l'alvéole traite de la conduction en régime transitoire en 3-D dans les solides et de l'évolution des matières volatiles. Elle prit en considération les pertes de chaleurs dans l'atmosphère c'est-à-dire à la surface du bloc d'anodes et à travers la fondation. Les deux modèles sont couplés via une interface. Elle est formée par le bord de la paroi du mur de la tête où sont appliquées les conditions aux limites de températures et de flux de chaleur. Ils ont montré que la géométrie de cloison joue un rôle très important sur l'écoulement des gaz dans les alvéoles et le transfert de chaleur dans les anodes. Le modèle peut être utilisé pour simuler les différentes conditions opératoires dans des usines existantes et de nouveaux designs de four.

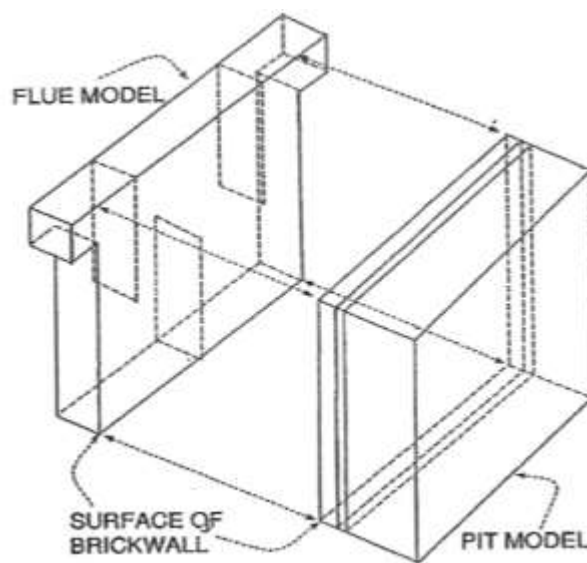


Figure 2-18 : Représentation schématique de la structure du modèle globale [65]

Dagoberto et al. [53] en 2005 ont développé un modèle en régime transitoire du four de cuisson d'anodes couplé à une interface utilisateur qui rend le programme évolutif et accessible

aux opérateurs qui peuvent changer les paramètres de fonctionnement. Ce modèle est établi à partir de la résolution des équations de transfert de chaleur, de conservation des espèces et de la distribution de pression.

Les paramètres clés sur lesquels s'appuient les décisions lors des opérations à mener pour le fonctionnement du four sont :

- Le niveau et l'homogénéité de la cuisson,
- Les émissions du brai,
- La consommation de carburant,
- La durée de vie des réfractaires.

Parmi ces paramètres, la consommation de carburant est le plus déterminant. En se basant donc sur l'impact du changement des paramètres opératoires sur la consommation de carburant, on peut améliorer la performance énergétique du four. En effet, Bigot et al. [74] ont étudié l'impact des différents paramètres opératoires sur la consommation de carburant. À partir du bilan énergétique sur le four, ils ont pu établir un modèle mathématique qui renvoie l'estimation de la consommation de carburant pour des conditions spécifiques. Cette étude a révélé que certaines actions tel que :

- L'augmentation du nombre d'alvéole de 7 à 8 entraîne une diminution de la consommation de carburant de $50 \text{ MJ}/t_{\text{anode}}$;
- La diminution de la largeur des briques de 10 mm et du poids du mur de la cloison de 5% et l'utilisation du matériau semi-isolant au lieu de matériau dense pour la toiture des cloisons provoquent une baisse la consommation de $190 \text{ MJ}/ t_{\text{anode}}$;
- La diminution de la dépression de 140 à 80 Pa avec un bon dégagement des gaz et l'augmentation de la température ambiante de -10 à $+30^\circ\text{C}$ et du taux de brai de 1% pourraient permettre de réduire la consommation de carburant de $760 \text{ MJ}/ t_{\text{anode}}$.

Certains changements cependant entraîne une augmentation de la consommation de carburant tel que :

- La diminution de la durée d'un cycle de feu de 26 h à 24 h entraîne une augmentation de la consommation énergétique de $60 \text{ MJ/t}_{\text{anode}}$.

La performance des fours de cuisson d'anodes est donc très sensible au changement de conditions opératoires. Ces résultats peuvent être utilisés pour effectuer le dimensionnement de nouveaux fours et en étudier leur performance, comme l'a fait Beach et al. [75]. De même Keller et al. [76] ont travaillé sur les principaux facteurs qui influencent la consommation spécifique d'énergie d'un four en 2010.

Dernedde et al. [77] ont également évalué la consommation de carburant du four en 1987. L'infiltration d'air entraîne la dilution et le refroidissement des gaz de cloison, les conditions d'auto-ignition, n'étant pas aisément atteintes, les volatiles s'échappent imbrûlés et cela génère des gaz toxiques à l'environnement (NO_x et SO_x). Ils recherchèrent donc la principale source d'infiltration d'air entre le coke de garnissage, les fissures dans le toit de la cloison, les couvercles des cloisons et les ouvreaux. Un bilan d'énergie permet de calculer la distribution de la température et on en déduit, l'infiltration d'air. Les résultats ont montré que l'infiltration de l'air se fait en majeure partie par les fissures sur le mur au-dessus des cloisons. Mais en installant des plastiques à isolant, cela permettra à la fois de réduire les pertes de chaleur et empêcher l'infiltration. Cette étude appuie le changement de configuration proposé plus haut par Bigot et al [74], pour améliorer la performance du four. Mais toutefois, il faut préciser que la présence de fissure sur le bloc au-dessus de la cloison, n'affecte pas le transfert de chaleur entre les gaz et l'air ambiant.

Thilbault et al. [61] ont développé un modèle dynamique de four de cuisson d'anodes horizontal à l'issue de ses travaux de recherches qui sont consignés dans son mémoire [78].

Un four de cuisson étant constitué d'environ plus de 324 murs de cloison, ces murs sont sujets à des fractures qui peuvent occasionner les problèmes susmentionnés. Lorsqu'on note la présence de fissures sur ces murs, il est indispensable de procéder à une réparation adéquate car le colmatage des fissures peut aussi engendrer des problèmes encore plus graves. C'est pourquoi une équipe de maintenance effectue des inspections après chaque cycle de feu afin de repérer les problèmes mécaniques et mener l'opération de consigne qui s'applique. Cependant, les effets de fissures mineures ou majeures sur le fonctionnement du four ne sont pas déterminés.

Maiwald et al., [79] en 2011, ont également travaillé sur la détermination des conditions du pic optimum de dégagement de volatiles par la pyrolyse du brai afin de minimiser la consommation de carburant. Il intègre dans la zone de préchauffage, un système de contrôle de la préchauffe afin de favoriser le dégagement de volatile pour que la température d'ignition et le pic de dégagement maximal de volatile coïncident de cette manière, il est possible d'optimiser la quantité suffisante de fuel pour la cuisson des anodes.

Auparavant, Mona et Melaaen en 1998 [80] ont développé un modèle mathématique en 2D qui modélise la pyrolyse du brai dans les anodes, la combustion des volatiles qui sont libérés et le transfert par rayonnement et convection des gaz vers les solides. Par utilisation du code FLUENT disponible parmi les codes CFD et qu'ils ont modifié, ils utilisèrent ce modèle pour étudier l'effet du taux de chauffage, de la composition du brai, des propriétés des anodes et de l'épaisseur du coke de garnissage sur les profils de température et le profil de gaz dans les anodes. Ce modèle tient compte du régime d'écoulement turbulent des gaz. Cinq années plus tôt, ils avaient établi un modèle transitoire en 1D pour étudier l'évolution de la température, de la pression et du gaz dans l'anode durant la cuisson. Ce modèle établit les équations de conservation

de la chaleur et de conservation de la masse. Il permet également de déterminer la composition du gaz de pyrolyse [81].

Dernièrement, dans un travail initial effectué précédant ce projet, un modèle préliminaire a été construit en utilisant une représentation simplifiée en 2D de l'écoulement des gaz. La conduction transitoire a été solutionnée sur certains plans dans les solides. Les résultats obtenus sont présentés dans des articles [62-64]. Le développement du nouveau modèle de procédé incluant tous les phénomènes importants est réalisé dans ce projet.

2-4.2. Simulation du contrôle du four

Il y a très peu d'article sur le contrôle ou la simulation du contrôle des fours de cuisson des anodes. Un fuzzy-modèle a été développé à cette fin par Maiwald et al. en 2006 [82] qui permet de savoir l'état ou la condition du four sur une échelle de 0 à 100% en fonction des données du système de contrôle du feu. Ces données portent essentiellement sur la déviation de température, l'ouverture des clapets, la chute de pression et la capacité des brûleurs.

Le mode d'injection de carburant par les brûleurs a demeuré continu, jusqu'à ce que Pechiney introduise dans la technologie des fours horizontaux, le mode d'injection impulsionnel dans les années 80. Ce mode présente un gros avantage pour le système de régulation PID utilisé qui permet d'ajuster le débit de gaz en fonction de la température. La découverte a marqué l'ère d'intégration des modules de contrôles et d'optimisation automatiques sur le four de cuisson d'anodes.

L'approche qui vise au développement de contrôleur virtuel de procédé est loin d'être aisée. Dans le sens où la majeure partie des modèles analytiques de procédé sont per se complexes. Bui et Ouellet [83] l'ont illustré dans leurs articles dédiés au contrôle optimal du four de coulée de l'aluminium. Ils y trouvèrent donc une alternative : l'écriture de l'équation du

procédé sous la forme : $\dot{x}=Ax+B$ mathématiquement exploitable pour le design d'un contrôleur où x est la variable d'état du système étudié. Pour y parvenir ils ont adopté une approche statistique évaluée à partir des données prédites de la simulation du modèle analytique du procédé.

On peut conclure que plusieurs améliorations ont été apportées aux fours de cuisson d'anodes. Cependant, l'industrie de l'aluminium est toujours à la recherche de nouveaux défis et de méthodes qui lui permettront de faire un pas vers une industrie moins énergivore. Notre projet entre également dans cette optique un modèle dynamique de procédé qui est explicité a été développé.

Les généralités sur le procédé de cuisson des anodes et la revue des travaux effectués dans le cadre de l'amélioration du fonctionnement des fours de cuisson d'anodes montrent une avancée technologique dans le domaine des fours. La plupart de ces modèles sont faites sur la base d'hypothèses similaires, mais les différents résultats obtenus peuvent témoigner de la complexité du procédé de cuisson des anodes.

Chapitre 3

MODÈLE DE PROCÉDÉ DYNAMIQUE DE CUISSON DES ANODES

3-1. Introduction

Au vu de toutes les considérations du procédé de cuisson d'anodes abordées précédemment, il n'est pas abusé de dire qu'il s'agit d'un procédé à multi-phénomènes. Il rassemble à la fois les phénomènes de dévolatilisation des composés volatiles contenus dans le brai et leur combustion. Il traite encore d'écoulement de fluide et de transfert thermique. Donc, modéliser la cuisson des anodes revient à combiner tous ces aspects sous un même modèle. C'est pourquoi, eu égard leur complexité, les modèles de procédé développés pour étudier les fours de cuisson d'anodes implémentent des représentations simplistes mais réalistes de ce procédé. Tel est le cas du modèle de procédé qui est un outil indispensable à notre étude.

3-2. Description du modèle de procédé développé

3-2.1. Caractéristiques du modèle

Ceux qui ont précédé celui utilisé par notre équipe de recherche ont été établis sur la base d'un écoulement de gaz dans une unique direction horizontale. Il s'agissait là de modèles trop simplistes qui ne tenaient pas compte de l'architecture des cloisons. Dans le modèle développé pour notre étude, le gaz est considéré en écoulement vertical. Mais la présence de baffles dans la conception des cloisons induit quatre changements directionnels à la circulation des gaz dans la cloison. Se basant sur cette approximation, il est alors judicieux et possible d'étudier l'équation de transport de la chaleur dans les gaz dans une cloison suivant quatre sous

régions. Leur écoulement dans le four peut donc être simplement représenté à la figure 3-1 ci-dessous.

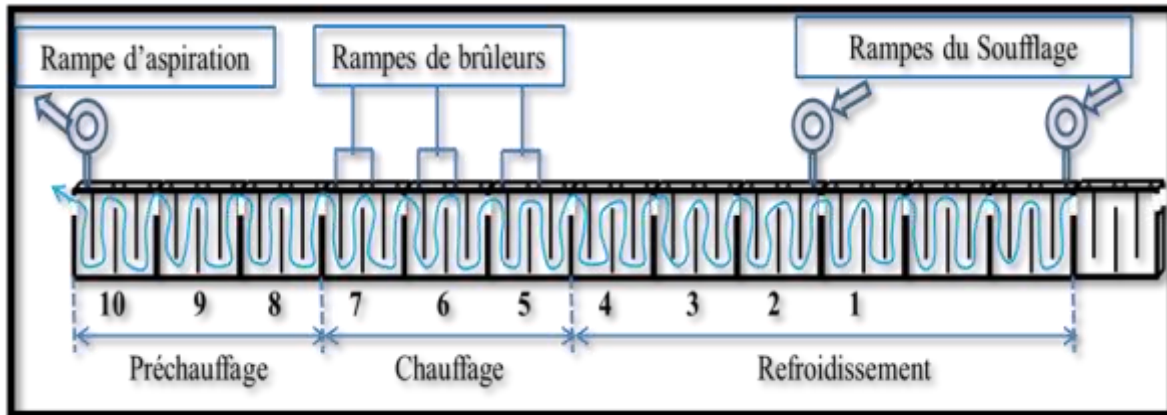


Figure 3-1: Représentation schématique de l'écoulement du gaz à travers la cloison le long du four

On établit donc un modèle de procédé sous les hypothèses suivantes partant d'un four de cuisson dont la représentation schématique est proposée à la figure 3-2 ci-après.

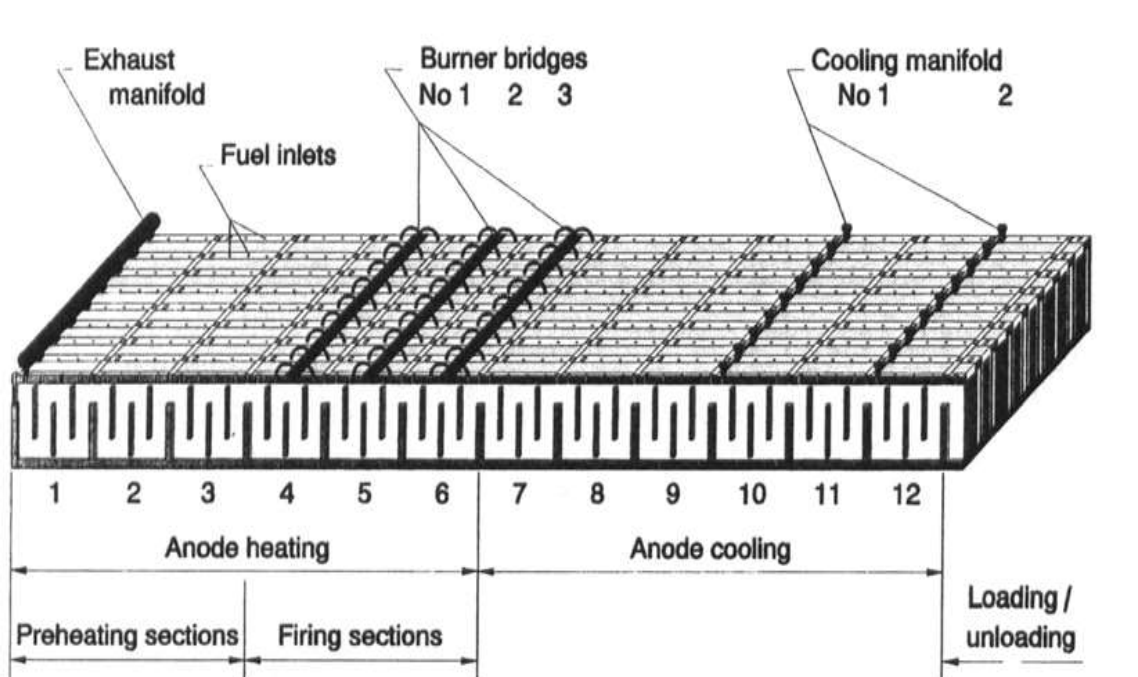


Figure 3-2 : Représentation schématique d'un four annulaire à ciel ouvert [84]

Les hypothèses sont les suivantes :

(1) Les équations de conduction dans les solides seront résolues en deux dimensions (suivant la largeur et la hauteur des alvéoles) en considérant chaque plan vertical dans chacune pris dans chacun des quatre sous plan de cloisons. La conduction dans le sens longitudinal (x) du four ne sera pas prise en compte (le gradient de température est négligeable par rapport à ceux dans les deux autres directions).

(2) La variation de température dans les cloisons le long du four est seulement considérée. En d'autres termes, les gaz parcourent la longueur du four en direction vertical comme un serpent. Ils sont étudiés en deux dimensions (suivant la hauteur des canaux de circulation des gaz dans la cloison et la longueur du four).

(3) Les termes qui représentent l'accumulation de masse et d'énergie dans les équations pour les gaz seront supposés négligeables. Cette hypothèse est basée sur le fait que la constante du temps des gaz est beaucoup plus faible que celle des solides. En effet, la constante du temps est proportionnelle au produit $m \cdot C_p$ et le rapport de ces termes pour les gaz et les solides est de l'ordre de 1 sur 10 000. On considère donc que la dynamique du système n'est influencée que par l'évolution des températures à l'intérieur des solides. Cette hypothèse est aussi formulée par plusieurs chercheurs comme Spang [85] et Franks et Miller [86].

(4) L'énergie fournie par la combustion des matières volatiles est proportionnelle à la capacité de dégagement de volatiles dans chaque cloison dans les zones de préchauffage et de chauffage. Ces capacités ont été définies en tenant compte de la fraction massique de volatiles dégagées d'une anode. Cela est considéré pour chaque composé volatile,

ceux-ci étant principalement l'hydrogène, le méthane et les hydrocarbures lourds (le goudron).

(5) La quantité d'air qui s'infiltré dans la cloison est une estimation. Cette valeur pouvait être calculée à partir des valeurs expérimentales évaluées sur des unités en opération ou bien directement déterminée dans le modèle sur la base de l'estimation de l'étanchéité à l'air du four.

(6) La combustion de l'huile à l'intérieur des chambres soumises aux feux se fait sur toute la longueur de la chambre. En d'autres termes, pour les chambres sur lesquelles sont installés les injecteurs de carburant, on suppose que la combustion s'y fait de manière uniforme et complète. Tout se passe comme si dans chacun des éléments rectangulaires de cloison s'effectuent une combustion élémentaire de carburant.

3-2.2. Équations mathématiques

Le modèle se base sur deux principaux types d'équations de bilan qui sont :

- 1) Les équations du bilan d'énergie et de masse appliquées au modèle de gaz
- 2) Les équations du bilan d'énergie pour les solides : conceptions dans les solides (le mur de brique, le coke de garnissage ou poussier et les anodes).

Rappelons que la représentation géométrique du four se fait dans les coordonnées cartésiennes. La direction X correspond à la direction longitudinale du four. La hauteur du four correspond à la direction Y et la direction Z correspond à la largeur d'une alvéole. On peut les voir à la figure 3-3. Les plans centraux d'une alvéole et d'une cloison adjacente constituent des plans de symétrie. Ainsi, le volume de contrôle dans la direction Z est compris entre le centre

d'une cloison et le centre géométrique des anodes. Ces plans de symétrie constituent une frontière adiabatique du point de vue du transfert de chaleur.

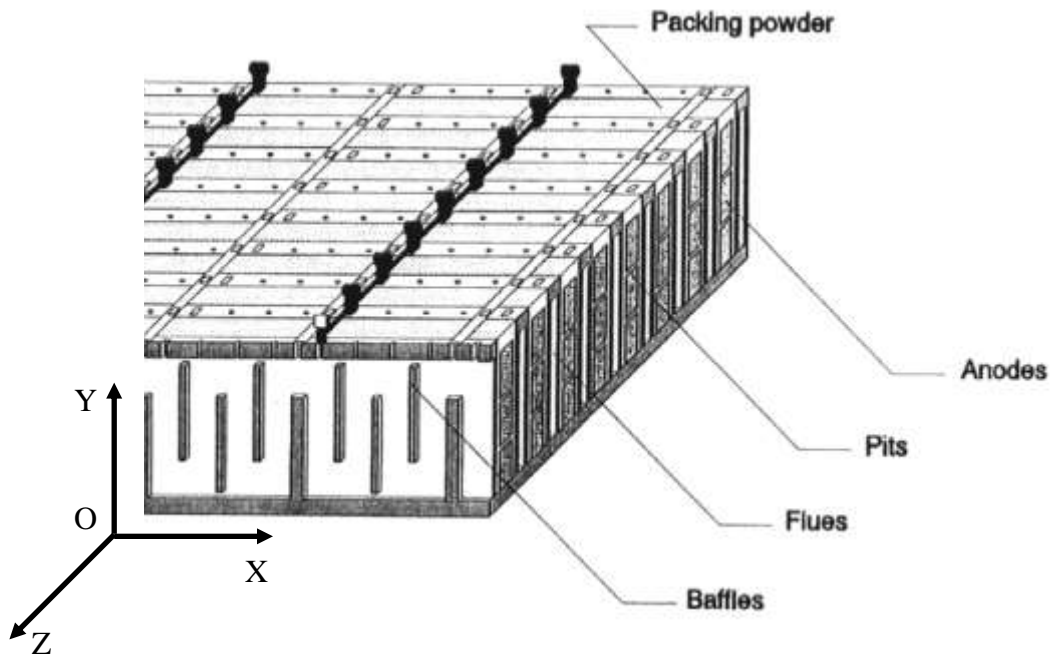


Figure 3-3 : Représentation schématique détaillée d'un four horizontal [84]

Équation de bilan d'énergie des gaz

Le développement de cette équation suivi celui de l'équation du bilan des matières est basé sur tous les phénomènes qui contribuent à la variation de la quantité d'énergie transportée par les gaz lors de leur passage dans la conduite en tenant compte des hypothèses précédemment définies. Soit le volume de contrôle tel que schématisé à la figure 3-4 ci-dessous qui a permis de réaliser le bilan d'énergie des gaz le long du four.

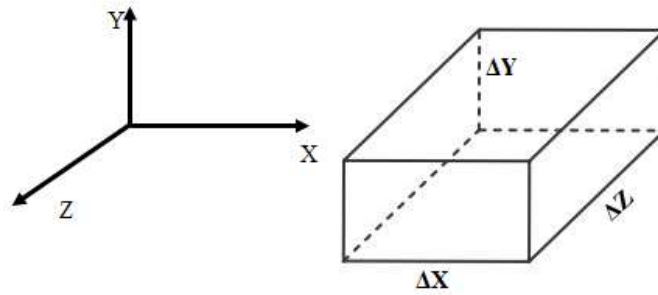


Figure 3-4: Vue en trois dimensions d'un volume de contrôle ΔV .

Le bilan d'énergie des gaz le long du four, sur cet élément de volume s'écrit (en termes de taux) :

(Somme de chaleur qui entre) – (Somme de chaleur qui sort) = (Accumulation) - (Génération)

$$\text{or Accumulation} = m_g C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (3.1)$$

et *Génération = Chaleur de combustion - Consommation d'énergie*

Le terme d'*accumulation* a été négligé du fait de l'hypothèse formulée précédemment. Ainsi, le bilan d'énergie pour les gaz s'écrit :

$$\dot{m}_g C_{pg} (T_g(\text{out}) - T_g(\text{in})) = \lambda \sum \dot{m}_{gi} C_{pgi} (T_{gi} - T_{\text{inf}}) + h_T P_{eq} (T_s - T_g) + \lambda \dot{m}_{\text{Vol}} H_{\text{Vol}} + \dot{m}_f H_f - Q_{PGC} \quad (3.2)$$

$\sum \dot{m}_{gi} C_{pgi}$ est la somme des produits des masses par leur capacité thermique de chaque constituant du gaz dans la cloison ($\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

$\dot{m}_{\text{Vol}} H_{\text{Vol}}$ et $\dot{m}_f H_f$ désignent la chaleur provenant de la combustion respectivement des éléments volatiles et de carburant.

\dot{m}_{Vol} est le flux massique des matières volatiles dégagées dans le four ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

\dot{m}_f est le flux massique de carburant injecté au four ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$).

H_{Vol} et H_f sont les chaleurs de combustion respectivement des matières volatiles et de carburant ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Le terme représentant la chaleur provenant de la combustion des éléments volatils (hydrogène, méthane et goudron) est la somme d'énergie produit par la combustion de chacun d'eux. Soit :

$$\dot{m}_{Vol}H_{Vol} = \dot{m}_{H_2}H_{H_2} + \dot{m}_{CH_4}H_{CH_4} + \dot{m}_{C_xH_y}H_{C_xH_y} \quad (3.3)$$

$h_T P_{eq} (T_s - T_g)$ désigne le transfert de chaleur entre les gaz et les solides.

$Q_{PGC} = s \cdot h_{tsq} (T_{surf} - T_i)$ représente la perte de chaleur par unité de longueur vers

l'atmosphère et à travers la fondation. s représente le facteur de perte. On suppose que les pertes vers la fondation sont un peu moins que celle vers l'atmosphère.

h_{teq} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) est le coefficient global de transfert de chaleur qui prend en compte la conduction en haut du bloc et le transfert de chaleur convectif et radiatif du haut du block à l'atmosphère.

T_i est la température ambiante (°C).

T_{Surf} est la température à la surface de l'alvéole ou la température du bloc de solide à la fondation.

\dot{m}_g est le flux massique local de gaz y compris l'infiltration (kg/s). Dans le modèle, l'infiltration est imposée directement dans les zones désirées.

λ est un coefficient qui marque le chauffage. Dans les zones de sous pression (typiquement sections de chauffage), $\lambda = 1$; dans les zones où les pressions sont positives (sections de refroidissement), $\lambda = 0$.

Le coefficient total de transfert de chaleur h_T entre le gaz et les solides est une combinaison des coefficients convectif et radiatif.

$$h_T = h_{conv} + h_{rad} \quad (3.4)$$

Le coefficient de transfert convectif de chaleur est déterminé en utilisant la corrélation de Dittus-Boelter [87] donnée par l'équation 3.5:

$$h_{conv} = \left(\frac{k_g}{D_h} \right) 0.023 Re^{0.8} Pr^\gamma \quad (3.5)$$

k_g est la conductivité thermique de gaz ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

D_h est le diamètre hydraulique représentatif à l'intérieur de la cloison ; il est égal à quatre fois l'aire transversale entre les chicanes divisées par le périmètre de cette aire.

Pr est le nombre de Prandtl du gaz.

γ est un exposant = 0.3 pour les sections de chauffage et 0.4 pour celles de refroidissement.

Re est le nombre de Reynolds de l'écoulement donné par :

$$Re = \frac{\dot{m}_g D_h}{A_T \mu} \quad (3.6)$$

A_T est l'aire transversale entre deux chicanes adjacentes.

μ est la viscosité dynamique en $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.

Le coefficient de transfert de chaleur par radiation est donné par la relation suivante :

$$h_R = \sigma \left(\frac{\varepsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_w^4}{T_g - T_w} \right) \quad (3.7)$$

σ est la constante de Stefan-Boltzman = 5.67×10^{-8} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

ε_g est l'émissivité de gaz, seuls H_2O et CO_2 sont considérés car ils participent dans le transfert de chaleur par rayonnement.

α_g est l'absorptivité de gaz, seuls H_2O et CO_2 sont considérés car ils participent dans le transfert de chaleur par rayonnement.

Le détail sur ε_g et α_g pour des gaz mixtes peut être trouvé dans [87] .

Les éléments volatiles libérés du brai dans le bloc de carbone se répartissent en trois groupes : l'hydrogène, le méthane et le goudron. La libération de chaque composant volatile s'effectue dans un domaine de température précis, mais sa cinétique pourrait être exprimée par l'équation générale 3.8 suivante. Les débits des volatiles calculés pour le cas étudié sont ajoutés dans le modèle directement.

$$\frac{dX_i}{dT_a} = \frac{k_{0i}}{a} [\exp(-E_{0i}/RT_a)] (1 - X_i)^{n_i} \quad (3.8)$$

$a = \frac{dT_a}{dt}$ est le taux de variation de la température des anodes ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$).

X_i est la conversion fractionnelle de l'élément volatil i , où i dénote « goudron, méthane ou hydrogène ».

$k_{0,i}$ et $E_{0,i}$ sont respectivement le facteur apparent pré-exponentiel et l'énergie apparente d'activation.

n_i l'ordre apparent de réaction.

Équation de bilan d'énergie pour les solides

La conduction dans les solides s'effectue en deux directions. Suivant la direction Z et la direction Y pour chaque plan X considérant. Ainsi, l'équation de transfert de chaleur par conduction dans les solides en régime transitoire est la suivante :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{s(y,z)} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{s(y,z)} \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) - spQ_{ps} \quad (3.9)$$

avec k_s la conductivité thermique du solide variant avec la position dans le four vu que le terme « solide » désigne l'ensemble anode, coke et brique.

Le dernier terme « spQ_{pz} » représente la perte de chaleur de solide dans l'atmosphère et à travers la fondation. Le coefficient « sp » désigne une pondération de la perte de la chaleur. On suppose que la perte de chaleur dans la fondation est de moindre intensité qu'à la surface. Ainsi, on aura :

$$sp_{fondation} < sp_{surface} \quad (3.10)$$

L'accumulation de chaleur est due au transfert de chaleur entre le gaz dans la cloison et la paroi de la cloison (surface du mur réfractaire).

3.3. Discrétisation des équations du modèle

La discrétisation d'une section du four est aussi illustrée à la figure 3-5 et on applique les cas de transformations correspondant à chacune des sections du four de cuisson.

Ce modèle comprend deux sous modèles dont un sous-modèle de solide et un sous-modèle de gaz. Le couplage de ces deux modèles est assuré par le transfert de la chaleur des gaz (qui circulent dans la cloison) au solide. Sa particularité est qu'il permet de visualiser en 2D la distribution de la température du gaz dans la cloison à tout moment de la cuisson. De même, la distribution de la température à travers le bloc de solides constitué de briques, de coke de garnissage et d'anodes est étudiée en 2D. Plus précisément, l'étude se fera suivant les plans verticaux formés à partir de l'orientation des gaz illustrée à la figure 3-5.

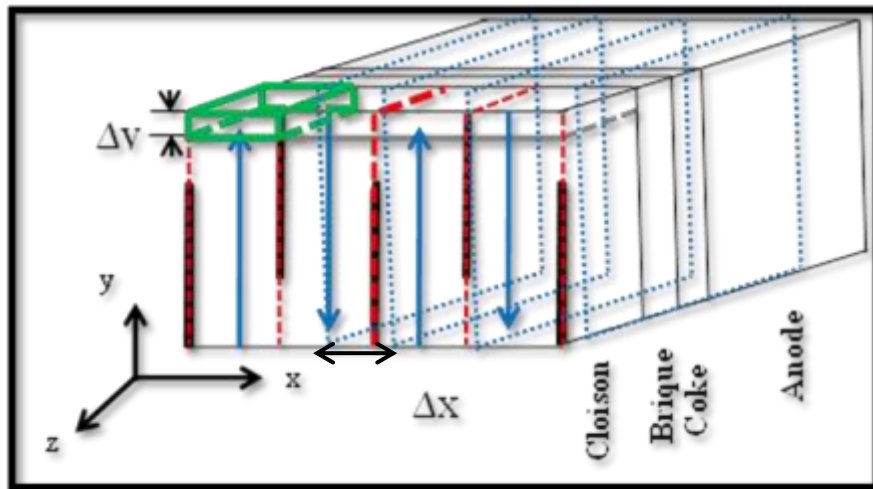


Figure 3-5 : Discrétisation d'une section du four

Chacune de ces quatre sous-régions dans la cloison est subdivisée en sous-éléments (parallélépipède de $\Delta x \Delta y \Delta z_{\text{cloison}}$), et on peut donc déterminer la température pour chacune des positions x et y données. Cependant, dans le modèle de solide, l'équation du transfert de chaleur par conduction est résolue par différences finies en 2-D. En raison du déplacement du gaz en 2D,

un élément de solide donné voit sa température affectée par les températures de gaz des nœuds voisins. Pour chaque plan vertical en x , l'équation de transfert de chaleur par conduction est résolue suivant les axes y et z . De cette manière, les températures de chaque élément de solide $T(x, y, z)$ sont influencées par les températures aux quatre éléments nodaux voisins qui l'entourent tel que présenté à la figure 3-6 suivante. En somme, la température de chaque élément nodal situé dans le solide dépend à la fois de la température du gaz et donc des solides de ses nœuds voisins.

Le modèle de gaz découle des équations de conservation de la matière et d'énergie sur chacun des éléments parallélépipédiques. Il tient compte d'une représentation quantitative de l'infiltration d'air dans les zones de dépression et la combustion des volatils qui viennent des anodes. Les équations obtenues ont été discrétisées et traduites en langage de programmation Fortran. Les solutions sont donc calculées à partir de sous programmes appelées sous routines.

Le programme « Modèle de procédé » comprend trois sous routines. La première traite du bilan de masse dans les gaz issus de l'infiltration d'air, de la combustion du carburant et des volatils. La deuxième effectue le transport de la chaleur des gaz vers les solides en tenant compte d'une estimation des pertes de chaleur à la surface et dans les fondations. Enfin, la troisième effectue la permutation par déplacement du feu d'une cloison et également l'enfouissement de nouvelles anodes. L'architecture du modèle représenté par suite illustre d'avantage les interactions entre ces sous-programmes.

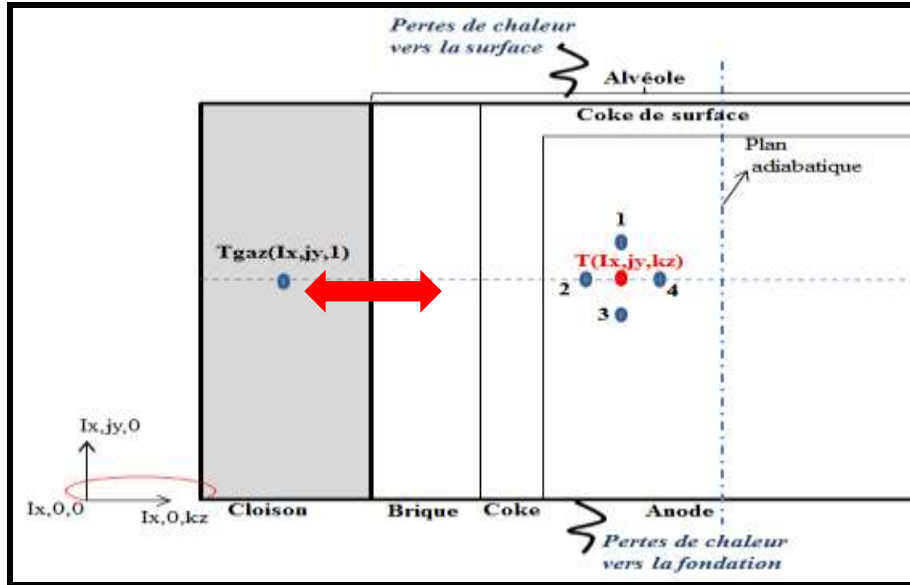


Figure 3-6 : Schéma d'une coupe transversale d'une section élémentaire incluant la cloison et l'alvéole (\rightarrow chauffage des solides et \leftarrow refroidissement des solides)

La méthode d'approximation d'Euler explicite a été retenue pour trouver une solution de la distribution temporelle de la température dans les solides. Il est important de retenir que le modèle de procédé développé est une imitation mathématique du procédé de cuisson.

3.4. Architecture du modèle

Ce modèle est un simulateur qui rend compte de l'état d'évolution de la cuisson des anodes au fil du temps tel que le présente la figure 3-7 grâce à une mise à jour du profil à chaque pas de temps. Les caractéristiques du four et le profil de distribution initial dans les solides constituent les entrées primaires du programme. Ainsi, les équations de bilan de masse et d'énergie dans les gaz étant résolues pour chaque pas de temps, il est possible de calculer la chaleur transférée aux solides. Tout se passe comme si on impose un flux de chaleur à la partie du four en contact avec le mur de solide.

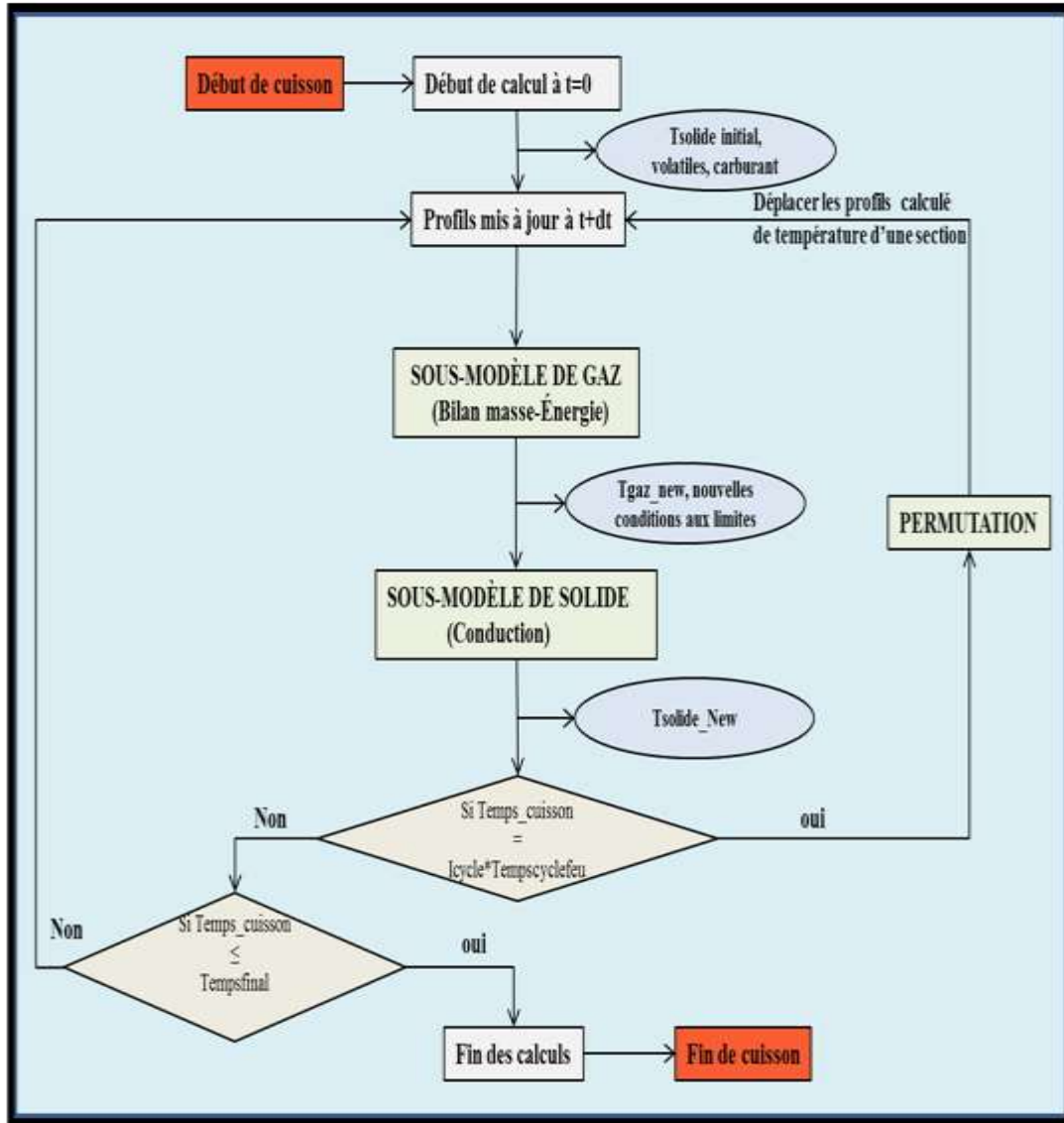


Figure 3-7 : Architecture du modèle de procédé dynamique de cuisson des anodes

On obtient une condition aux limites de type Neumann qui est utilisée dans la résolution. On utilise la distribution de la température précédemment calculée pour estimer la nouvelle distribution. Cette dernière correspondant à la température à l'instant présent de manière à avoir l'équation où T représente la nouvelle distribution et T^0 l'ancienne distribution de température dans les solides.

$$T = A * T^0 + B \quad (3.11)$$

Rappelons que la cuisson d'anode depuis son enfouissement dans le four jusqu'au défournement s'effectue en une durée totale appelée temps de cuisson. Ce temps de cuisson est subdivisé de manière équitable en plusieurs intervalles qui marquent les cycles de feu dont les durées varient en fonction de l'usine. Lorsque la durée d'un intervalle atteint celle d'un cycle de feu, on effectue un déplacement de l'ensemble des rampes installées sur le four d'une section comme on peut le voir à la figure 3-8.

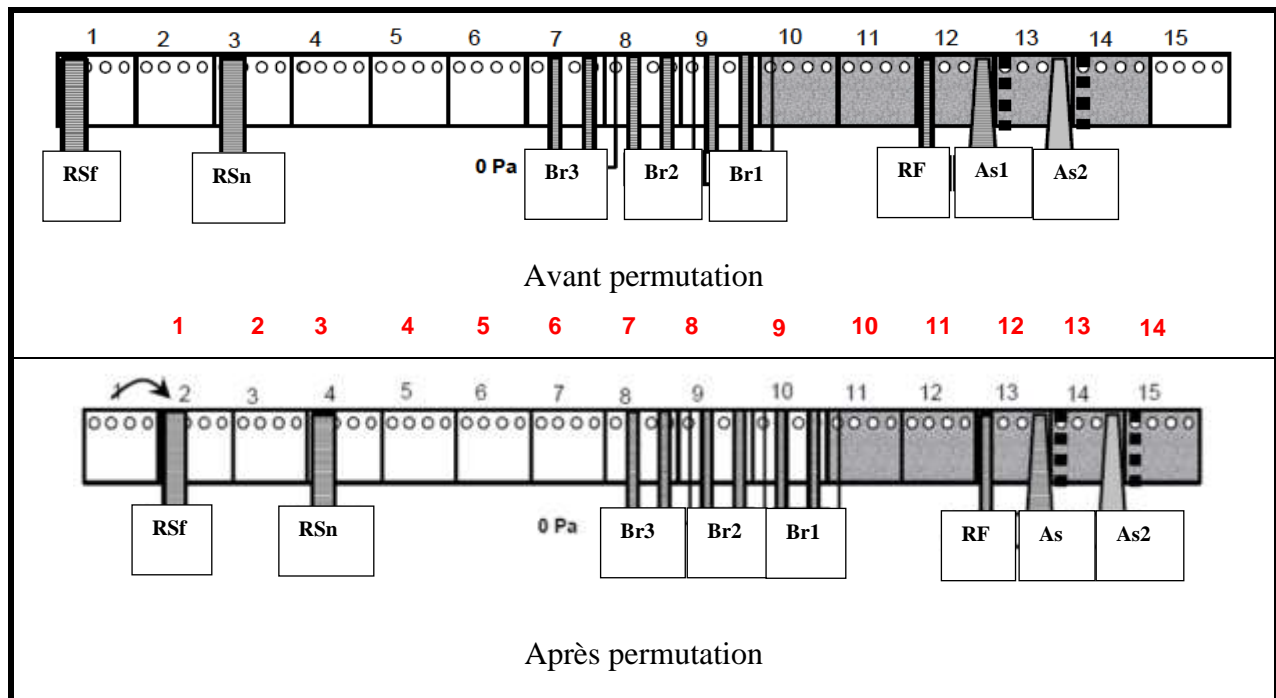


Figure 3-8 : Schéma explicatif de la permutation des rampes

RS(f,n): Rampe de soufflage forcé ou naturel
 avec : Br(1,2,3): Rampe de Brûleurs 1, 2, 3
 RF: Rampe de fumées
 As(1,2): Rampe d'aspiration

C'est la permutation des rampes. Lorsque la permutation est effectuée, il en résulte les modifications suivantes d'après le schéma de la figure 3-8:

- La nouvelle numérotation des sections est celle en rouge.
- La section 1 est prête pour le défournement car elle contient les anodes cuites qui sont refroidies.
- La « nouvelle section 1 » (en rouge), dans le procédé réel et dans la mise à jour du programme, aura comme température de solide, celle « l'ancienne section 2 » qui a été précédemment calculée. C'est la nouvelle section de soufflage. Le gaz est donc injecté à une température ambiante en surface. Cela marque la mise à jour du profil de gaz.
- De cette manière, les nouvelles sections posséderont comme température de solide en fin de permutation celle de leur ancienne nomination à l'exception de la dernière section. En effet, c'est la section d'aspiration des gaz qui correspond à la section d'enfournement des anodes. À ce moment, les anodes entrent à une température froide. Ainsi la dernière section prend la température des solides à un seuil relativement bas, mais supérieure à la température de l'air environnant.

En somme, cette étape de cuisson est symbolisée dans le programme grâce un remplacement de l'ancien profil T^0 par un profil qui tient compte des changements dus à la permutation. L'évolution temporelle de la cuisson est aussi marquée dans le programme informatique par un pas de temps qui divise un cycle de feu suivant le critère de stabilité de Fourier. Une mise à jour est effectuée à chaque pas de temps. Ainsi, en variant les données d'entrée du simulateur, on peut observer l'impact des paramètres sur la distribution de la température du four. L'étude paramétrique est donc rendue possible car le modèle renseigne sur la composition des gaz, sur la distribution des températures des gaz en 2D et celle des solides en 2D a fil du temps. Il est possible d'obtenir une représentation en 3D dans les solides si on représente chaque plan x tout le long du four.

Chapitre 4

RESULTATS ET DISCUSSION

4-1. Introduction

Cette partie présente les résultats de validation du modèle ainsi que ceux de l'étude paramétrique. On présentera les résultats de l'étude paramétrique obtenus par simulation dans diverses conditions de fonctionnement. Alors, on traitera successivement de l'influence du débit de carburant ajouté, de la quantité de volatiles dégagés durant la cuisson des anodes. L'intérêt est porté dans un premier temps sur le carburant car il s'agit d'un paramètre de cuisson ajustable. À côté, la quantité de volatiles dégagés peut être assimilée à un paramètre peu modulable au même titre que les caractéristiques du four de cuisson d'anodes, cependant, leurs effets ont été évalués sur le procédé de cuisson des anodes.

On présentera les résultats de l'étude paramétrique en fonction des trois zones (refroidissement, chauffage et préchauffage). Le tableau 4-1 donne les plans de présentations (montrés sur les figures 4-1 et 4-2) des températures prédites (de gaz et de solides) dans l'étude paramétrique. Les paramètres sont évalués sur un écart de $\pm 20\%$ de la valeur de référence du modèle. Il est également important de souligner que seul le paramètre étudié varie alors que les autres sont considérés à leur valeur dite standards.

Tableau 4-1 : Plans de présentation des résultats de l'étude paramétrique
(voir les figures 4-1 et 4-2)

Zone	Distribution de température des gaz	Distribution de température dans les solides
Refroidissement	Section 3	Plan P1 de la section 3
Chauffage	Section 6	Plan P1 de la section 6
Préchauffage	Section 9	Plan P1 de la section 9

Dans la suite, on prendra comme sens de l'écoulement celui indiqué sur le dessin inférieur de la figure 4-1. Celles-ci correspondent au sens du gaz dans les éléments de cloisons. Toutes les observations ont été faites après deux cycles de feu. Chacune des figures ci-après présentent séparément les résultats obtenus pour les gaz et les solides dans le four.

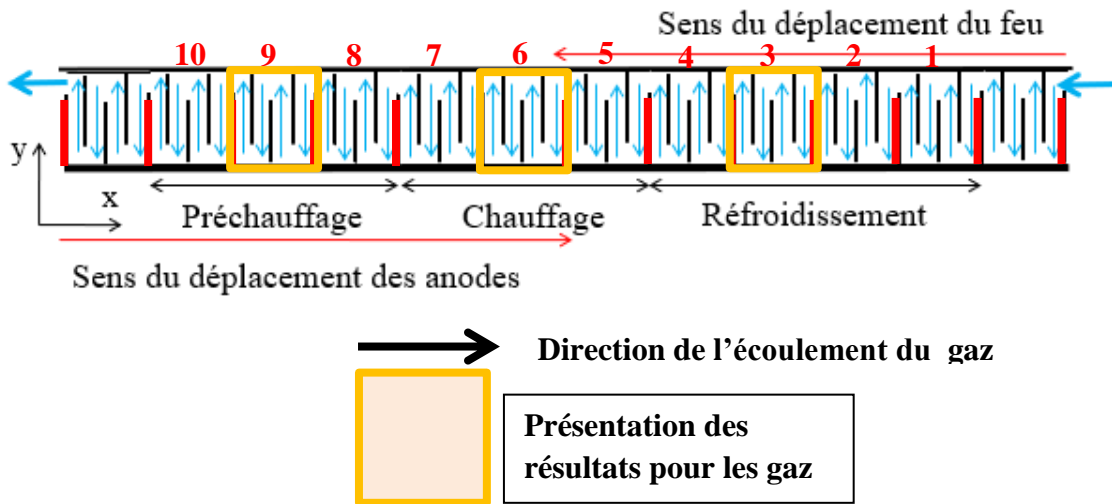


Figure 4-1 : Les 10 sections du four sur lequel l'étude paramétrique a été réalisée (les températures de gaz prédites dans la cloison sont présentées dans les sections montrées en jaune et le sens de l'écoulement des gaz sur les figures qui présentent les résultats pour les gaz est indiqué sur le dessin inférieur)

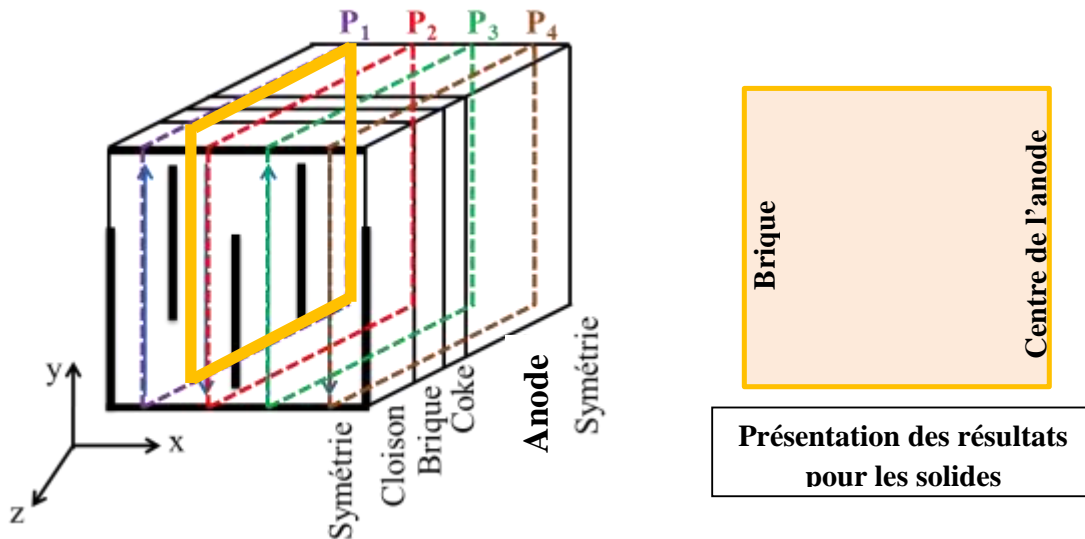


Figure 4-2 : Les plans dans une section où le transfert de chaleur dans les solides est solutionné (les températures de solides prédites sont présentées sur le plan P1 montré en jaune)

4-2. Validation du modèle développé

Il est important de rappeler que dans le cadre de la cuisson des anodes dans les fours, c'est l'énergie qui provient des gaz qui circulent dans la cloison qui sert à cuire les anodes. Ainsi, suivre l'évolution thermique des gaz et s'assurer d'une bonne répartition de la chaleur dans le four est déjà une bonne condition pour avoir de bonnes températures de cuisson. C'est pourquoi, dans le cadre de la validation de notre modèle, nous avons effectué une comparaison des données de l'usine recueillies par un thermocouple inséré dans une cloison du four que nous avons modélisé durant la cuisson. Les résultats prédits par notre modèle se superposent bien au profil de température obtenu par les données provenant de l'usine comme il est possible de constater sur la figure 4-3. Par conséquent, on peut considérer que notre modèle est validé et peut être ainsi utilisé pour réaliser l'étude paramétrique.

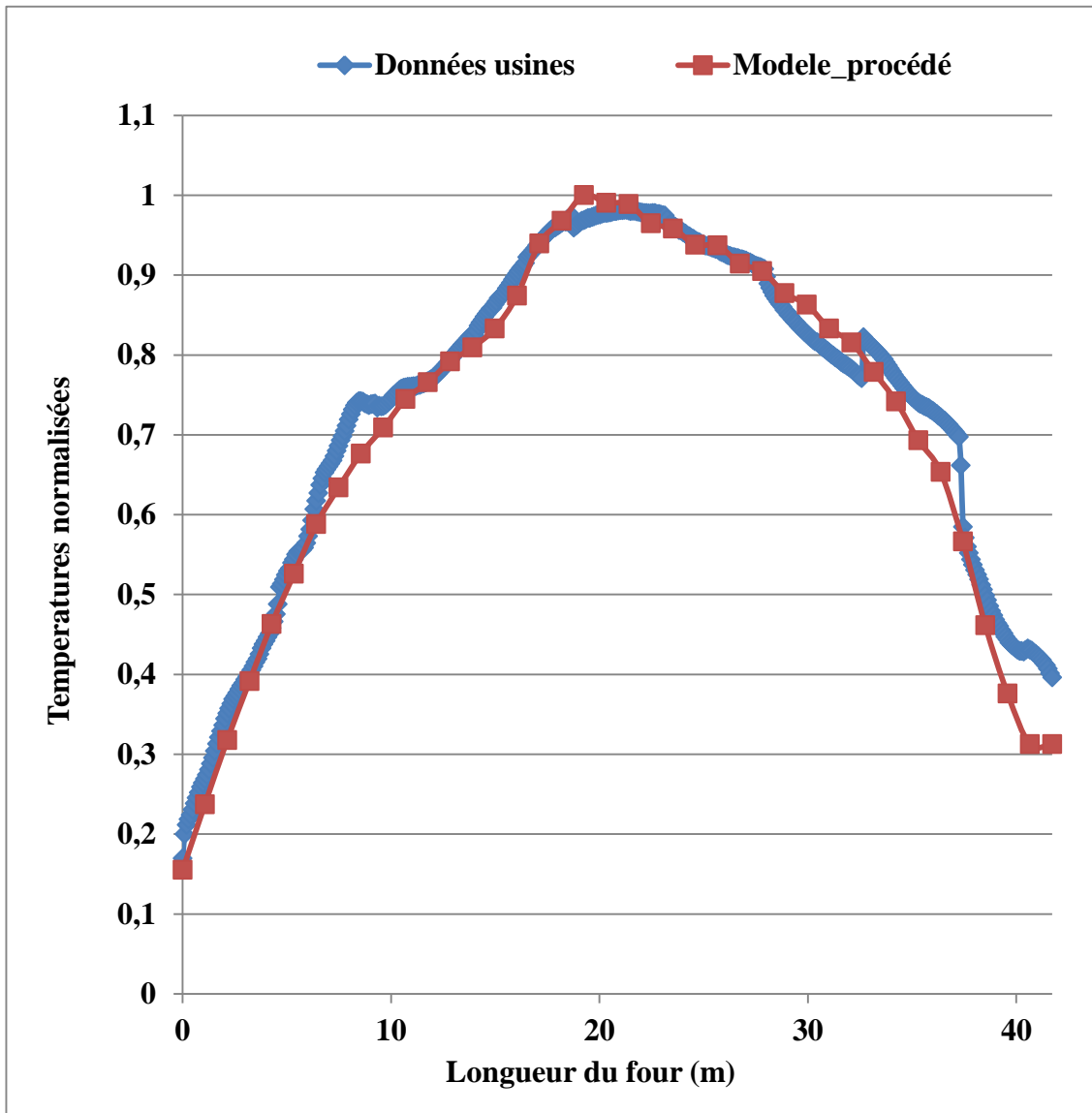


Figure 4-3 : Comparaison du profil de température des gaz prédit par le modèle avec celui mesuré à l'usine

4-3. Influence du débit de carburant

4-3.1. Zone de refroidissement

Cette zone est caractérisée par le refroidissement des anodes de carbone grâce aux rampes de soufflages naturel et forcé (des ventilateurs servent à propulser l'air vers les autres

cloisons). L'air qui s'y introduit dans la cloison s'échauffe par transfert de la chaleur provenant des anodes cuites au contact de la paroi. On ne peut pas observer une grande influence du débit de carburant sur la distribution de la température dans cette zone en raison de l'entrée d'air qui s'effectue à la même température ambiante. Cependant, on remarque une variation de la température des gaz car due à l'augmentation du niveau de chaleur dans les anodes avec le débit injecté. En somme, les anodes ont en réserve plus de chaleur à transférer. Les figures 4-4 et 4-5 présentent une bonne illustration de l'effet de l'augmentation du débit de carburant sur la distribution de la température dans une chambre de la zone de refroidissement des anodes. On y voit les lignes de courant de température dans une chambre et celle à travers le plan de solide respectivement.

Comparativement à la distribution de la température dans la condition standard du procédé, on observe un échauffement des gaz de la cloison lorsqu'on augmente le débit de carburant. Cette observation peut rendre compte du réalisme du modèle de procédé développé. Les gaz soufflés atteignent rapidement des températures élevées comme on peut le voir sur les figures ci-dessous. Au niveau des solides, on remarque que les couleurs deviennent de plus en plus foncés. Le jaune tend à être éclipsé par des teintes rougeâtres avec l'augmentation du débit de carburant.

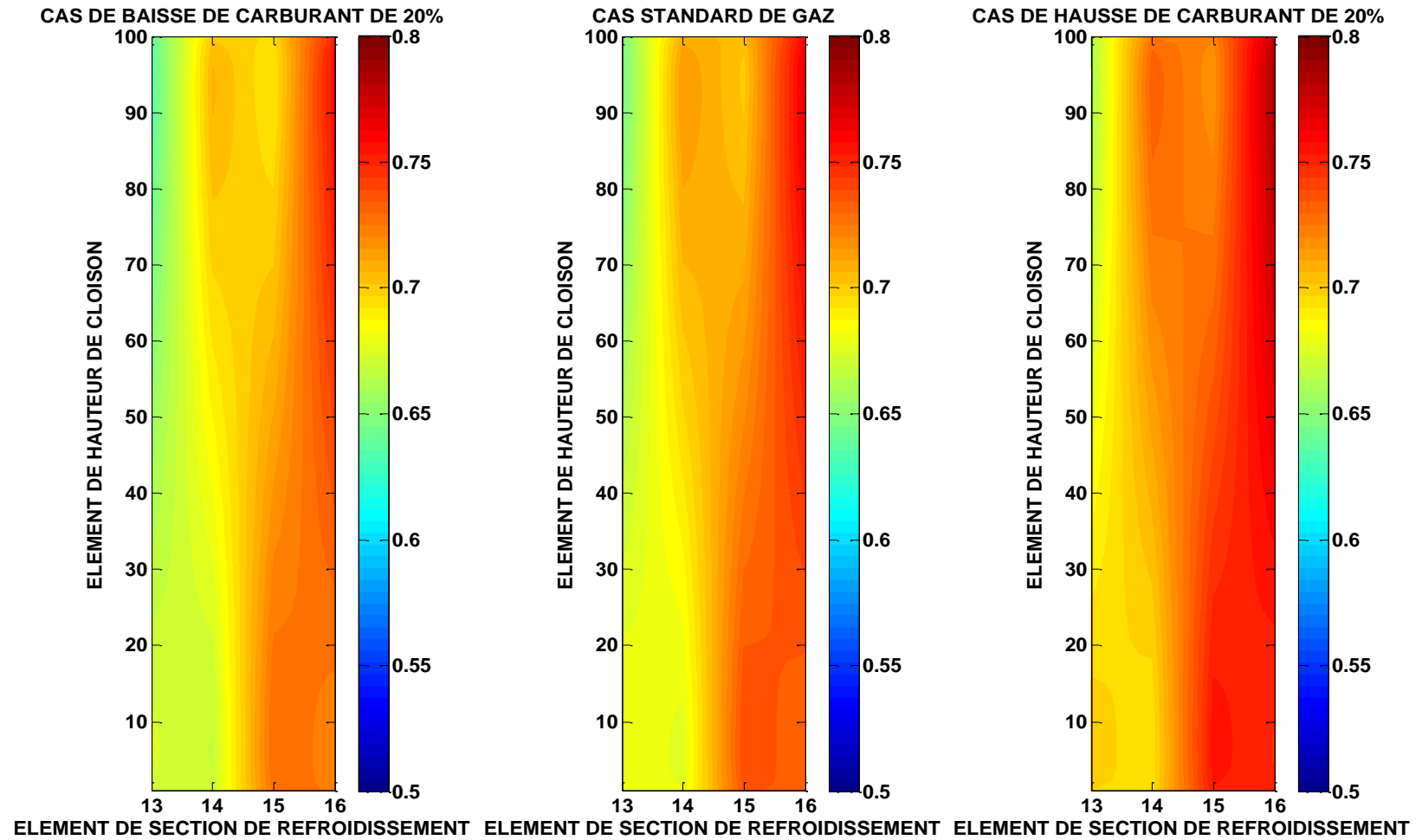


Figure 4-4 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement.

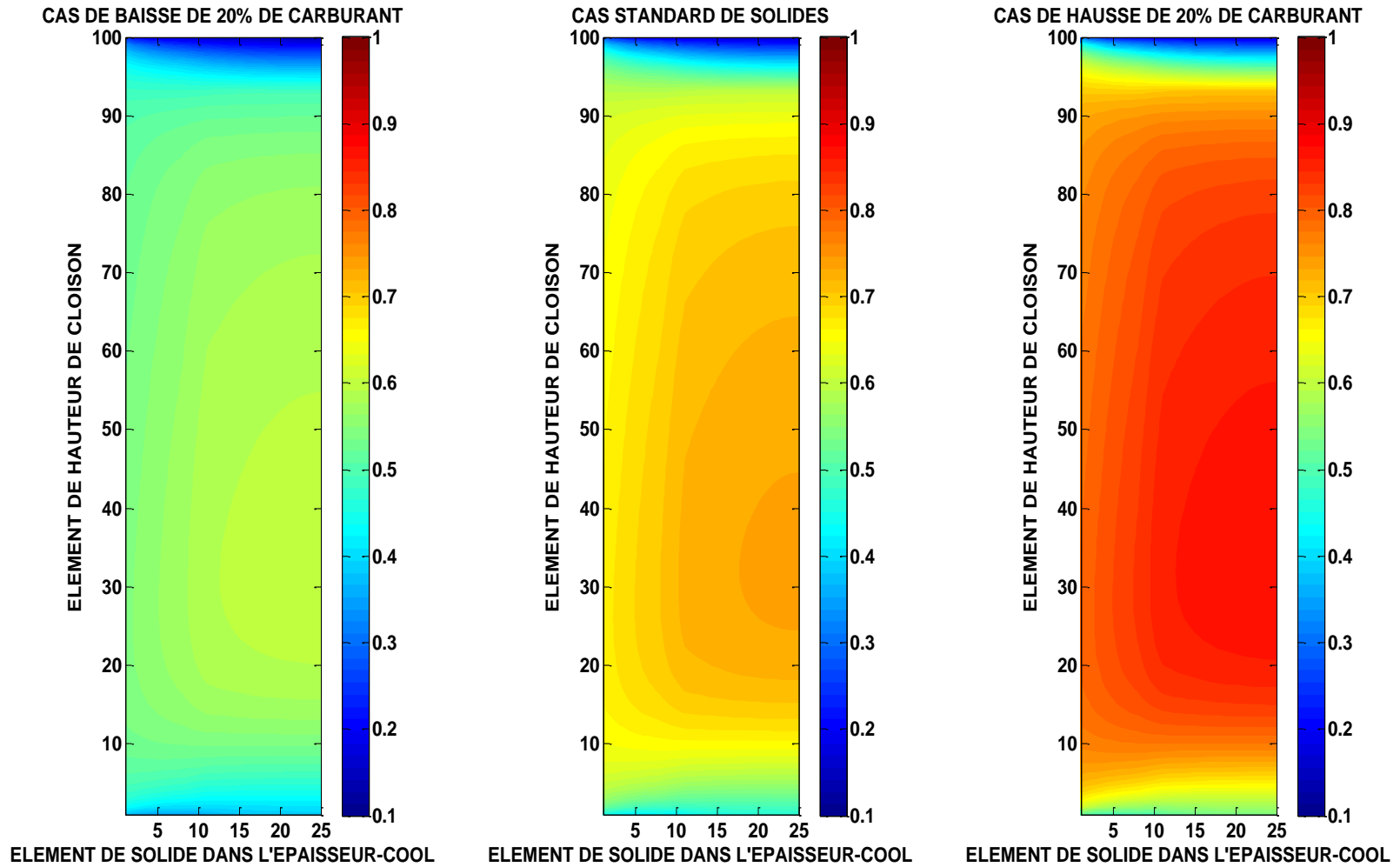


Figure 4-5 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température dans les solides pour la zone de refroidissement

4-3.2. Zone de chauffage

Rappelons que la zone de chauffage est la zone communément appelée zone de brûleurs à cause de la présence des six brûleurs (deux par section) par lesquels est injecté le combustible. L'injection de l'huile se fait à contre-courant par impulsion. Cette mesure vise à permettre une bonne répartition du combustible à travers la cloison et favoriser un mélange avec le gaz qui circule en contre sens.

Sur les figures 4-6 et 4-7 sont présentés les résultats des changements de débits de carburant sur les distributions de la température dans les gaz et les solides de la zone de chauffage. On peut y remarquer dans la cloison les endroits où est injecté le carburant. Il s'agit des ouvreaux n°2 et n°4 d'une section de brûleur donné. En effet, un pouvoir calorifique supplémentaire induit des températures plus élevées. Cette observation est la même dans toutes les zones de chauffage pour le four. Seul le niveau maximal de cuisson diffère en fonction du débit de carburant.

Une interprétation générale pourrait être faite concernant la quantité d'énergie disponible. En effet, plus un système thermique dispose de l'énergie, plus il va transférer cette énergie au système voisin d'énergie relativement basse dépendamment des résistances de transfert entre ces deux milieux. Il est très important de tenir compte de la résistance de transfert entre les deux milieux qui dépend fortement des propriétés des matériaux utilisés pour la conception des fours. C'est pourquoi, bien qu'il s'agisse de paramètres non-évolutifs, on étudie par la suite l'impact du changement de conductivités des matériaux sur la cuisson des anodes (impactes sur les températures).

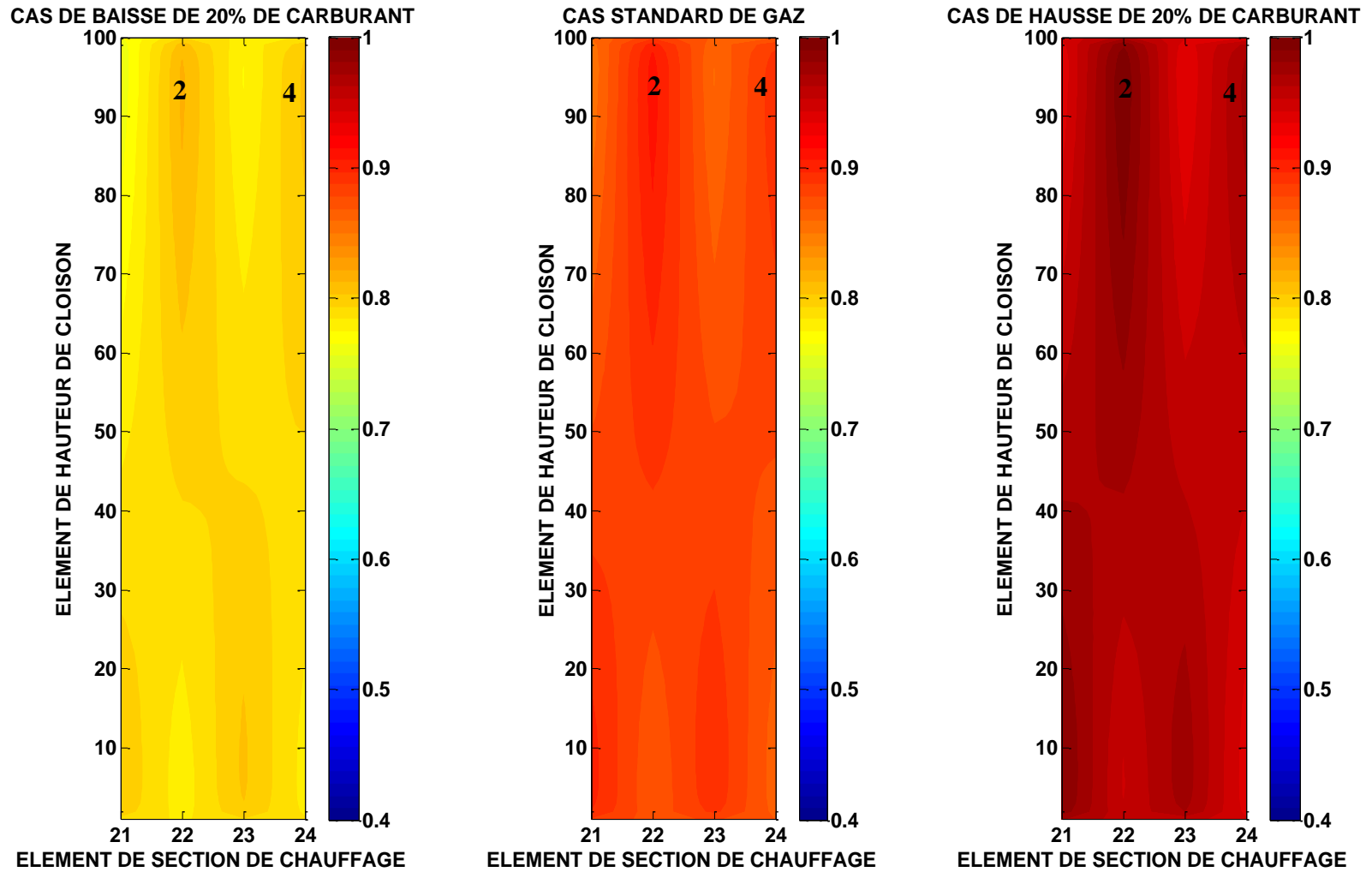


Figure 4-6: Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage

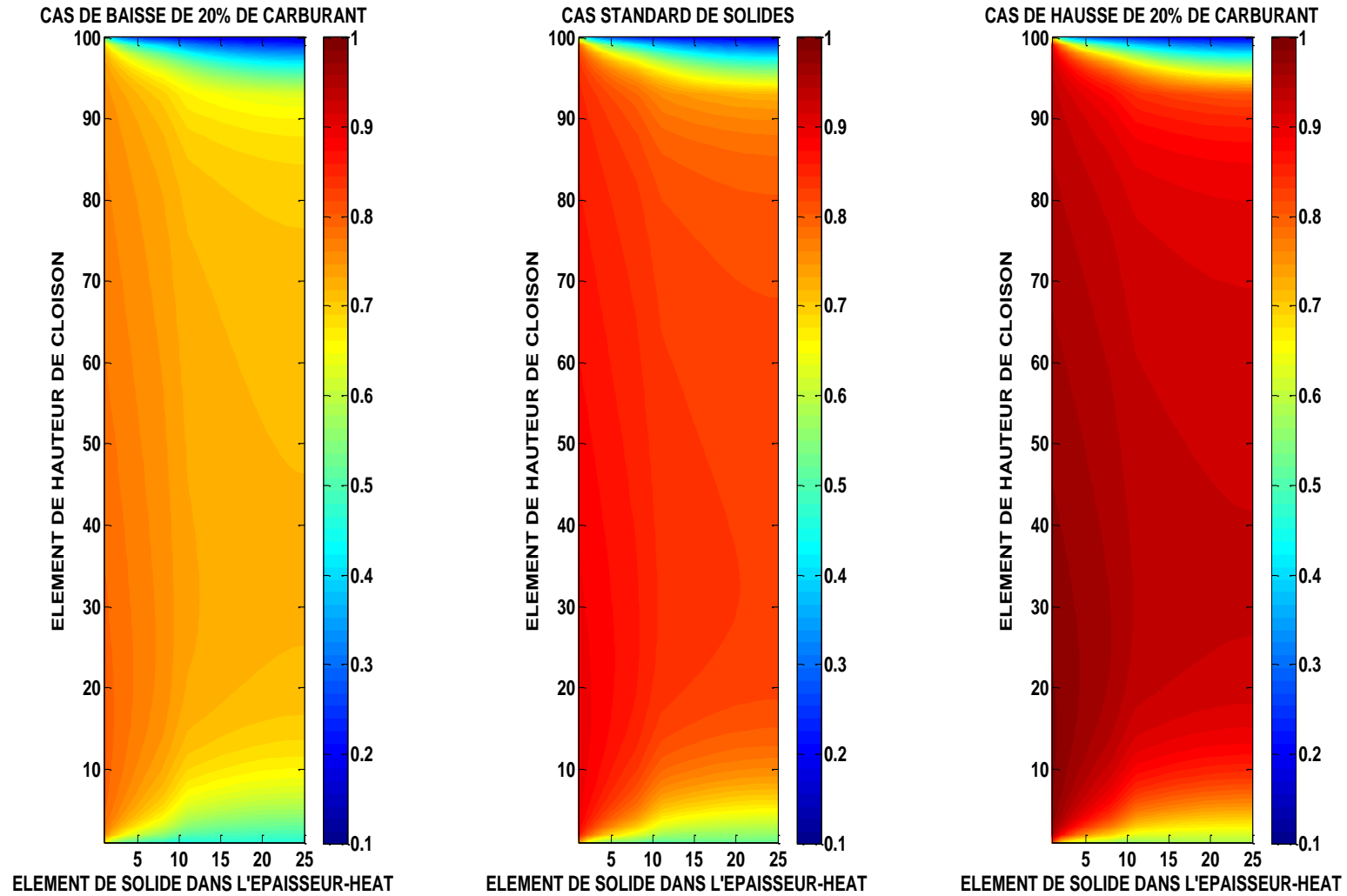


Figure 4-7 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage

4-3.3. Zone de préchauffage

La zone de préchauffage correspond également au refroidissement des gaz. Encore, on peut remarquer sur les figures que le niveau énergétique influence la distribution des zones de point chaud et point froid dans les différents plans étudiés dans les cloisons. Les endroits les plus chauds correspondent sur les figures aux teintes allant du jaune orangé au rouge et les endroits les plus froids sont ceux dont la teinte varie du bleu au verdâtre. On y chauffe les solides d'où la présence de zone à haute température vers la surface et la propagation de l'énergie vers le centre comme le présente les figures 4-8 et 4-9. Ce programme pourrait également être utilisé pour mesurer les effets des propriétés de matériaux, sachant que le bloc de solide est un milieu hétérogène.

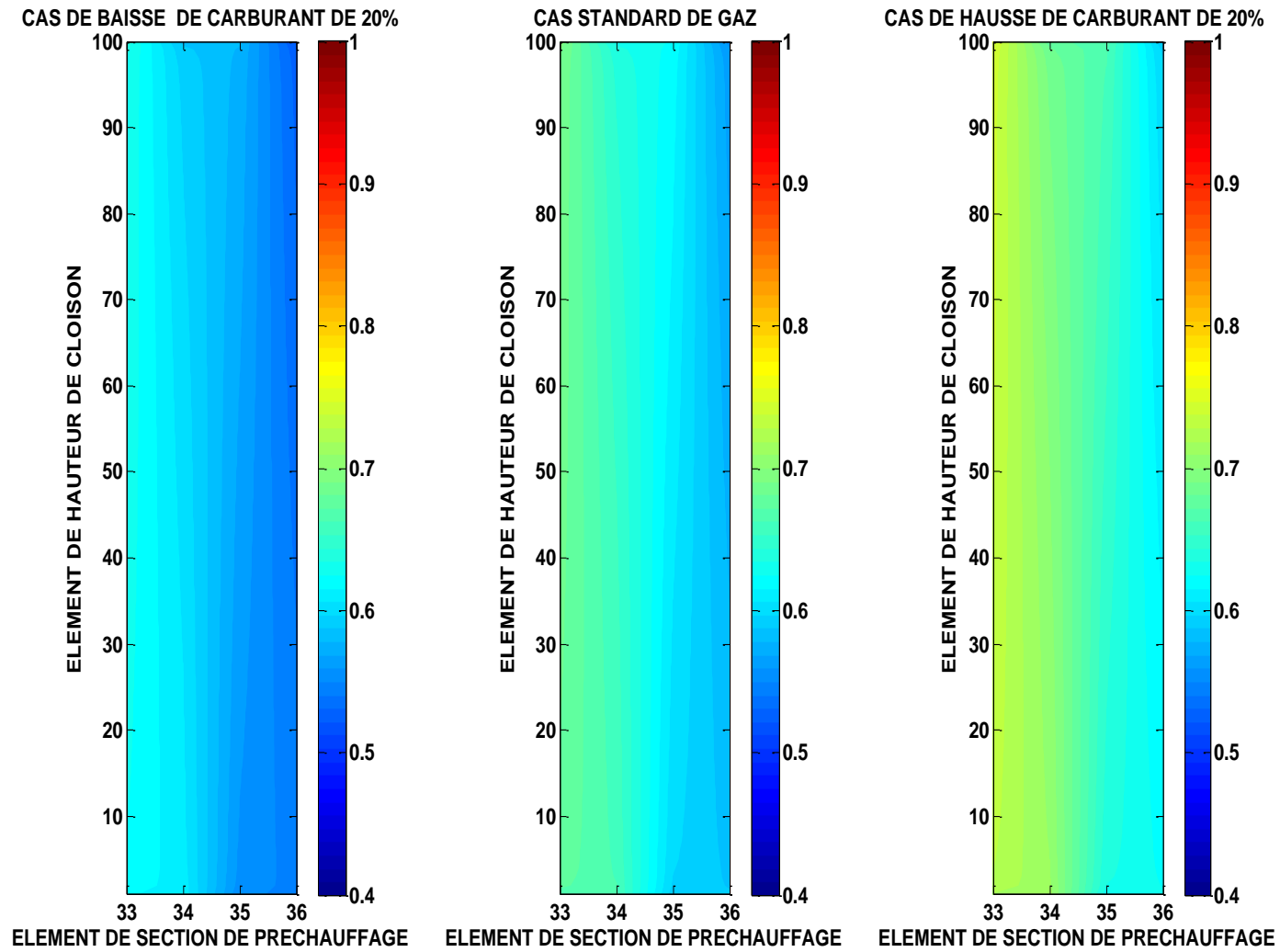


Figure 4-8 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage

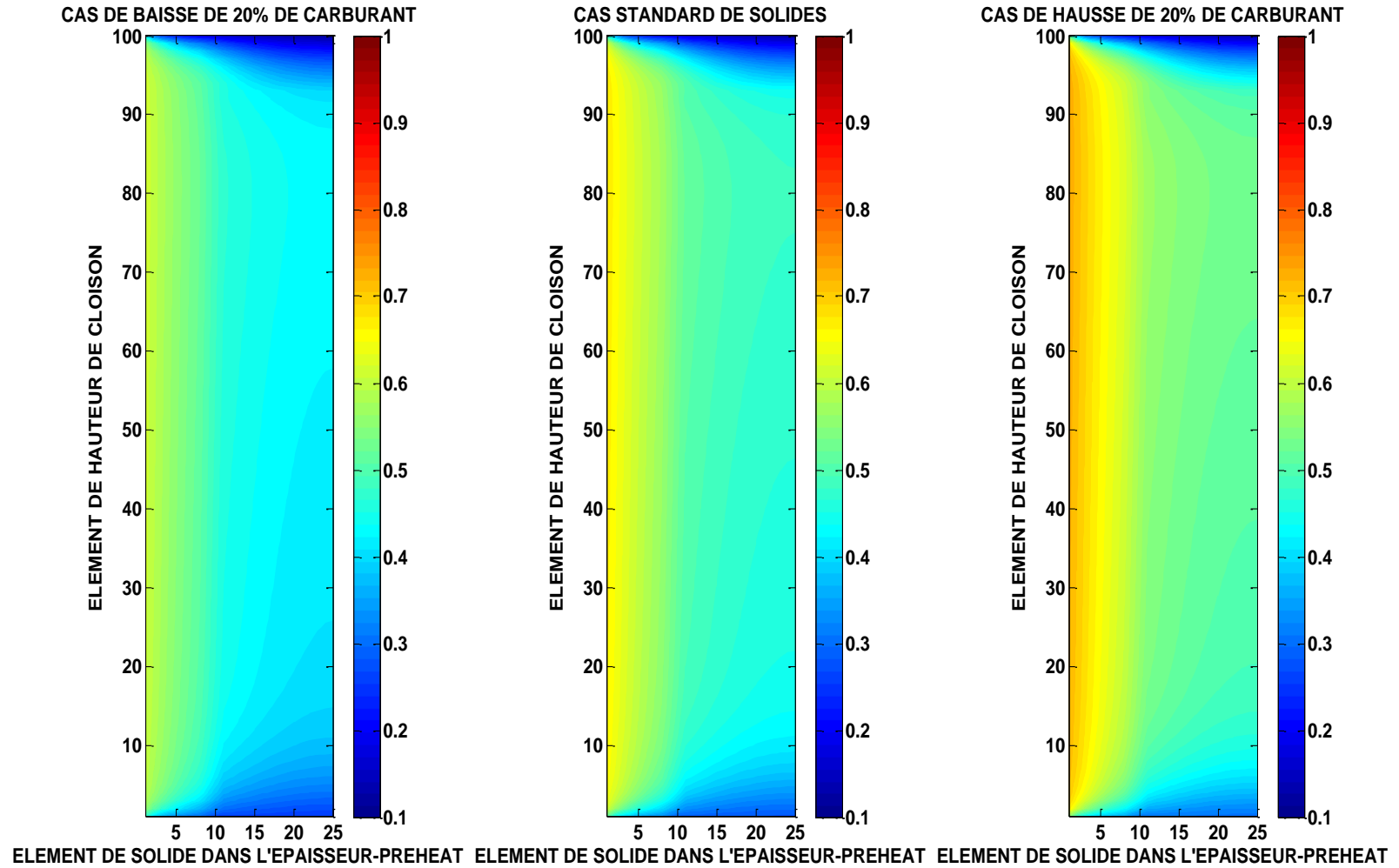


Figure 4-9 : Influence du changement de débit de carburant sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage

Les observations ci-dessous faites sur l'effet de la quantité de débit de carburant injectée sur la distribution des températures dans les gaz et les anodes sont objectives dans la mesure où elles respectent les principes de la thermodynamique. La température augmente davantage avec le débit de carburant. Dans le cas des solides précédemment évoqué, il s'agissait d'un milieu hétérogène formé par les briques réfractaires, le coke de remplissage et le bloc d'anodes de carbone. Cependant, on ne peut pas encore porter une critique qualitative sur ce paramètre sans tenir compte des effets des autres paramètres. Il faudrait donc se référer à la conclusion de ce chapitre.

Toutefois, analysons l'impact du changement de débit de carburant ajouté sur l'évolution des températures de gaz et d'anodes le long du four pour le procédé. Sur les figures (figures 4-10, 4-11, 4-12 et 4-13) ci-dessous sont présentées des évolutions comparatives des températures par rapport à un régime de fonctionnement défini dans le modèle comme des conditions standard de cuisson.

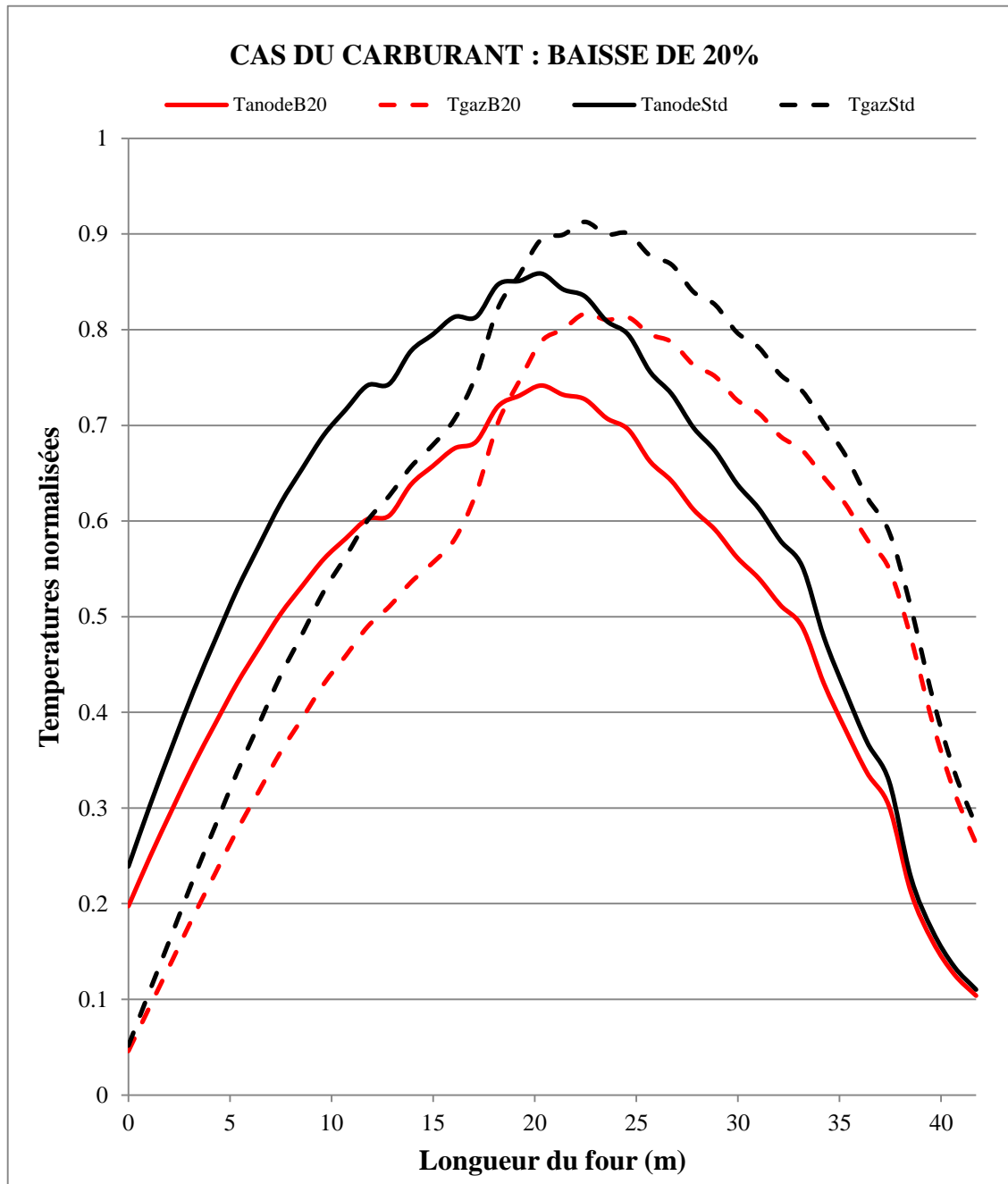


Figure 4-10 : Graphes montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une baisse du débit de carburant de 20% par rapport au débit utilisé dans des conditions

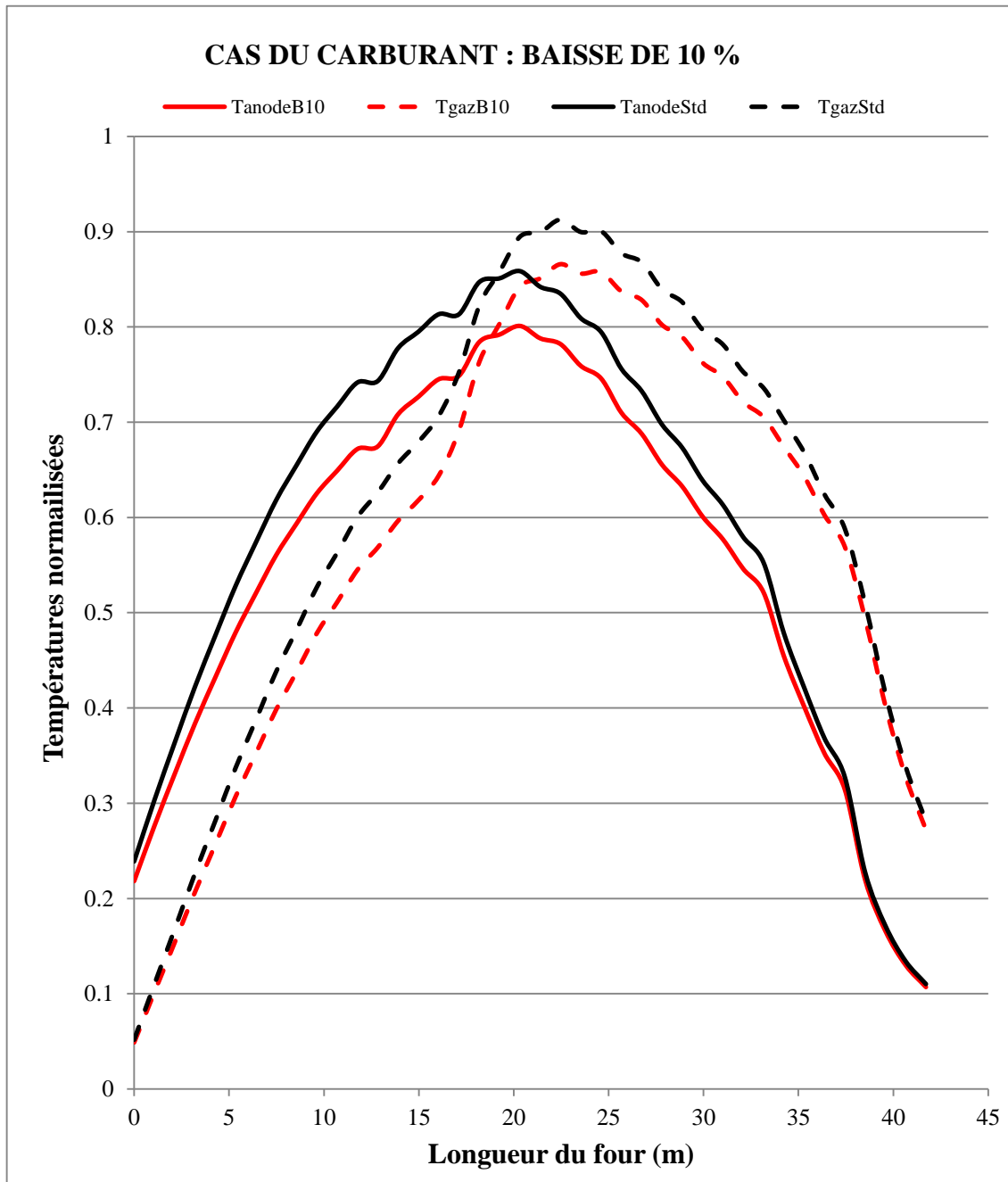


Figure 4-11 : Graphe montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une baisse du débit de carburant de 10% par rapport au débit utilisé dans des conditions standards

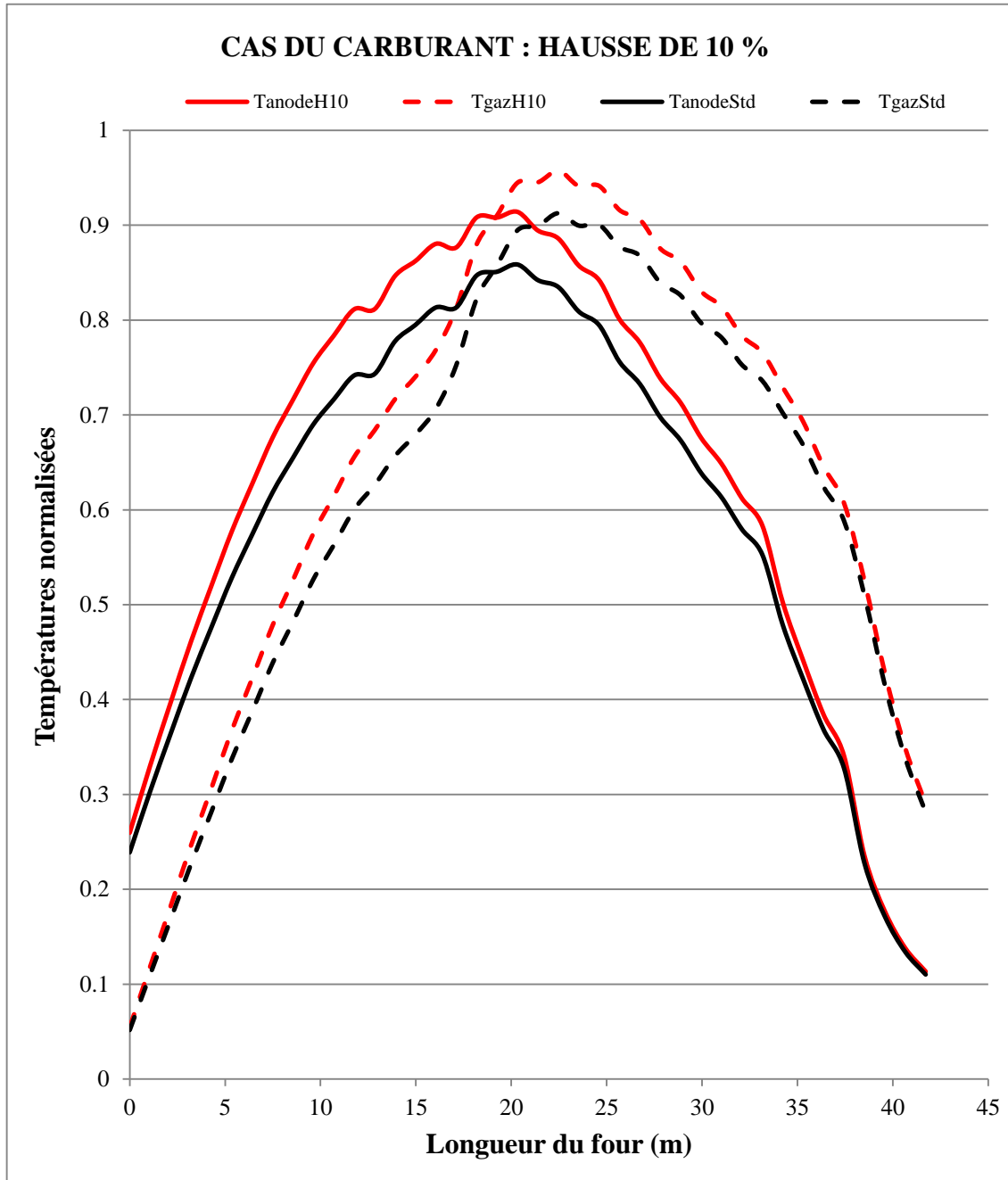


Figure 4-12 : Graphe montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une hausse du débit de carburant de 10 % par rapport au débit utilisé dans des conditions standards

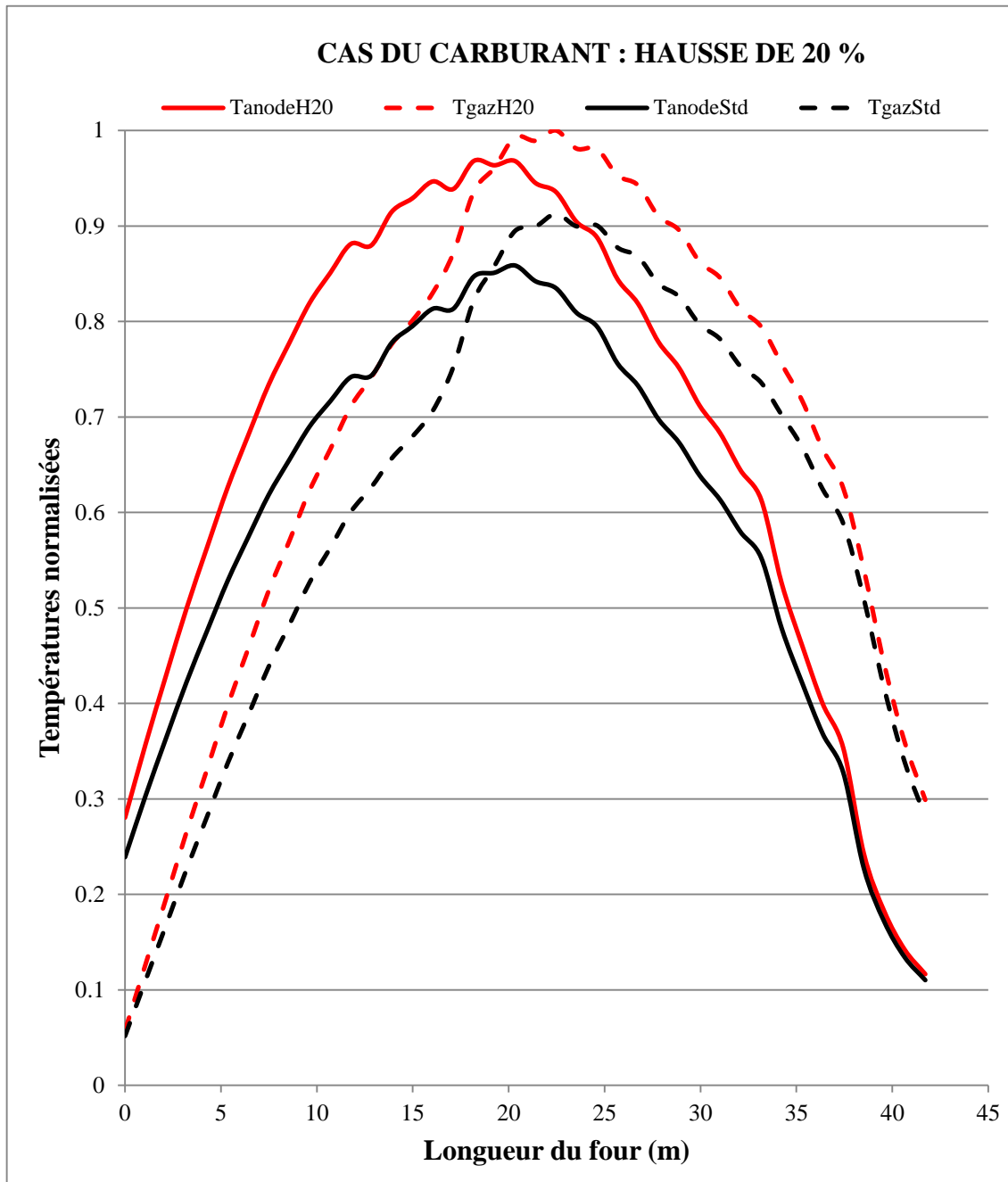


Figure 4-13 : Graphes montrant la comparaison entre les profils de température dans le cas d'une hausse du débit de carburant de 20% par rapport au débit utilisé dans des conditions standards

D'après l'analyse des quatre graphes précédents, on pourrait dire que l'impact d'une modification de la quantité de carburant n'est pas négligeable pour la cuisson des anodes. On y observe que l'influence du carburant est plus perceptible dans la zone de chauffage des anodes durant la cuisson.

En somme, une augmentation ou une diminution de la quantité de carburant injectée dans les ouvreaux augmente ou diminue la température maximale de cuisson des anodes. De cela pourrait en résulter une « sur-cuisson » ou une « sous-cuisson » des anodes. Dans le cas d'une « sur-cuisson », les anodes sont exposées à un risque de choc thermique qui pourrait engendrer des fissures dans le bloc si le temps de refroidissement n'est pas suffisamment long. Si elles ressortent « sous-cuites », cela pourrait favoriser les réactions secondaires au CO_2 car la structure cristalline n'est pas atteinte. Cette observation est en accord avec celle faite par Baiteche dans son mémoire [11] lorsqu'il déduisit de son étude de l'influence du débit de carburant sur la température finale de cuisson des anodes.

4-4. Influence des volatiles

Une anode dégage généralement des volatiles d'environ 5-6% de sa masse totale, ce qui correspond à approximativement 40% du brai ajouté comme liant. La quantité des volatiles dégagés peut varier dépendant du type de brai. Ces volatiles sont composés du goudron, du méthane et de l'hydrogène. Lorsqu'on varie la quantité de volatiles qui participe à la cuisson des anodes, on doit ajuster la recette de fabrication des anodes. Le système de contrôle installé sur le four fait l'ajustement nécessaire du débit de cuisson tout en approximant la valeur cible de température.

4-4.1. Zone de refroidissement

Notons que la zone de refroidissement est celle où on abaisse la température des anodes pour qu'il ne dépasse pas un seuil situé entre 250°C et 300°C [88, 89]. Contrairement à la zone de chauffage sous l'influence d'une variation de débit de carburant, la distribution de la température varie, mais peu dans ce cas. En effet, le dégagement stratégique des volatiles dans les zones de préchauffage entraîne leur absence dans les gaz de la zone de refroidissement des anodes. La combustion de la quantité de volatiles ajoutés va apporter plus de chaleur en supplément. De ce fait, vu que les anodes ont un niveau d'énergie relativement plus élevé, la distribution de la température augmente également avec l'ajout de volatiles. Les figures 4-14 et 4-15 montrent l'effet de la variation de la quantité de volatils sur la distribution de la température dans les gaz et les solides respectivement. Un zoom de l'échelle permet de mieux observer une augmentation de la température dans les blocs de solides à la figure 4-16. L'impact de la combustion des matières volatiles pourraient donc être mieux perçue au niveau de la zone de préchauffage des anodes et plus principalement sur la température maximale de cuisson.

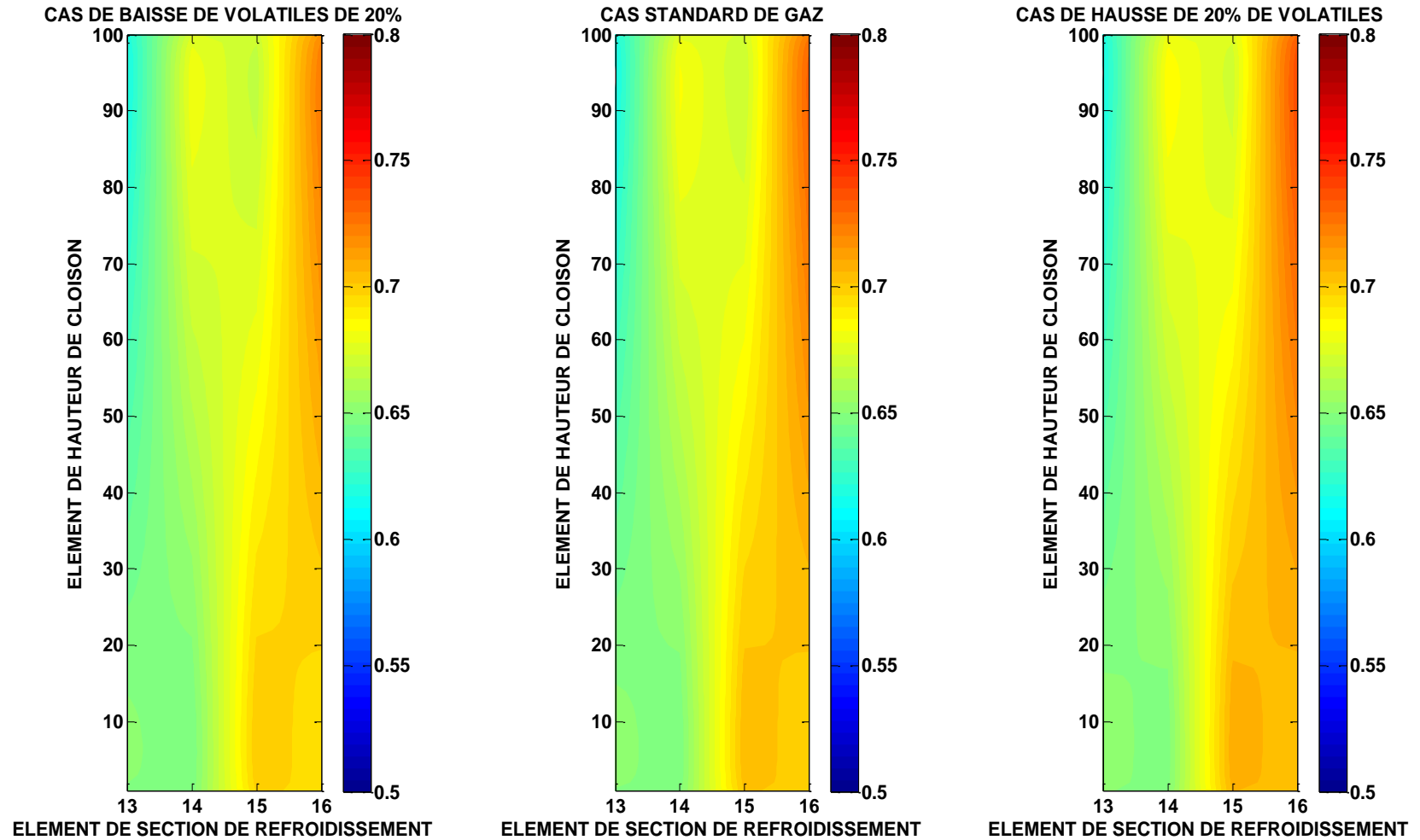


Figure 4-14 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement

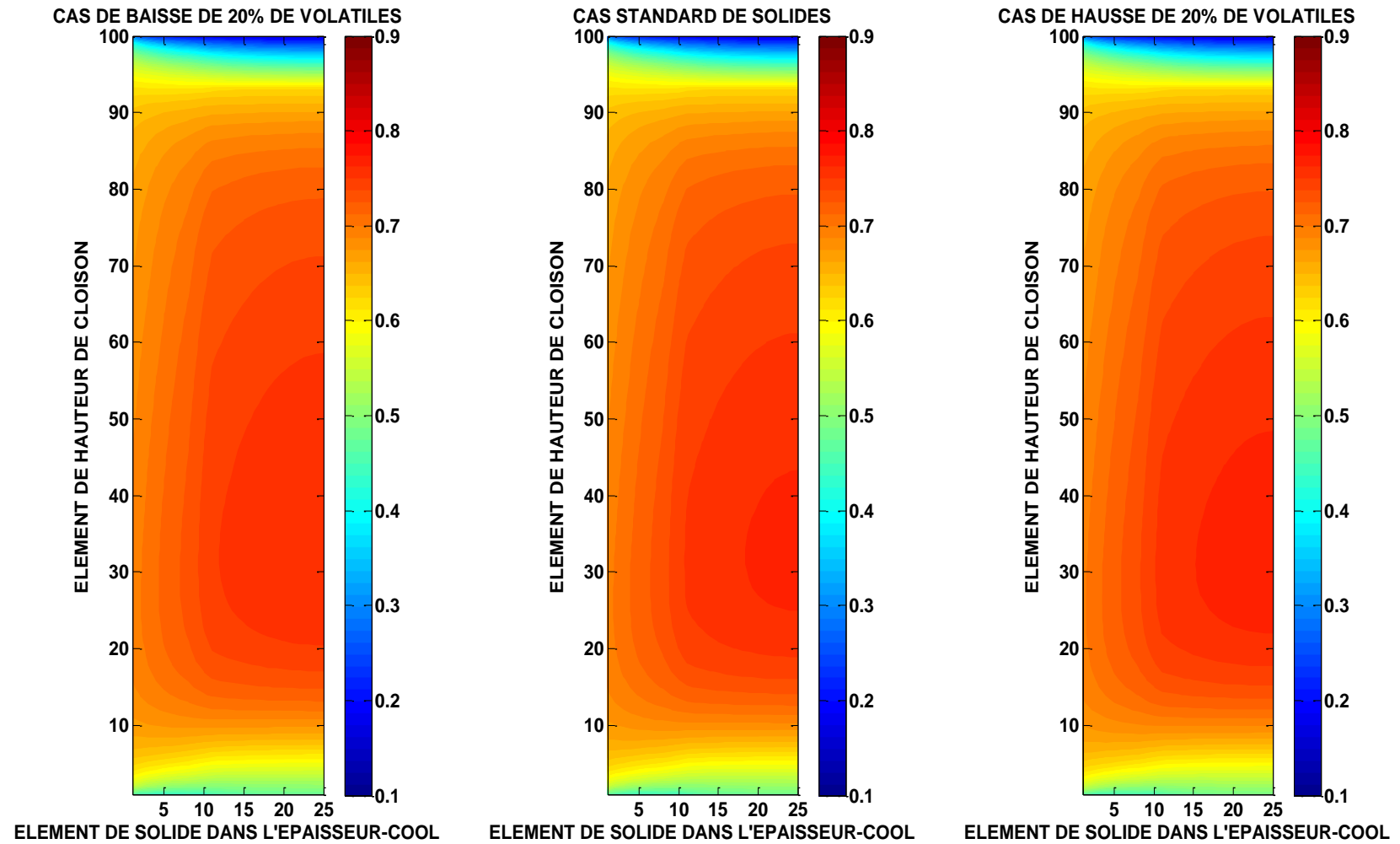


Figure 4-15 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement

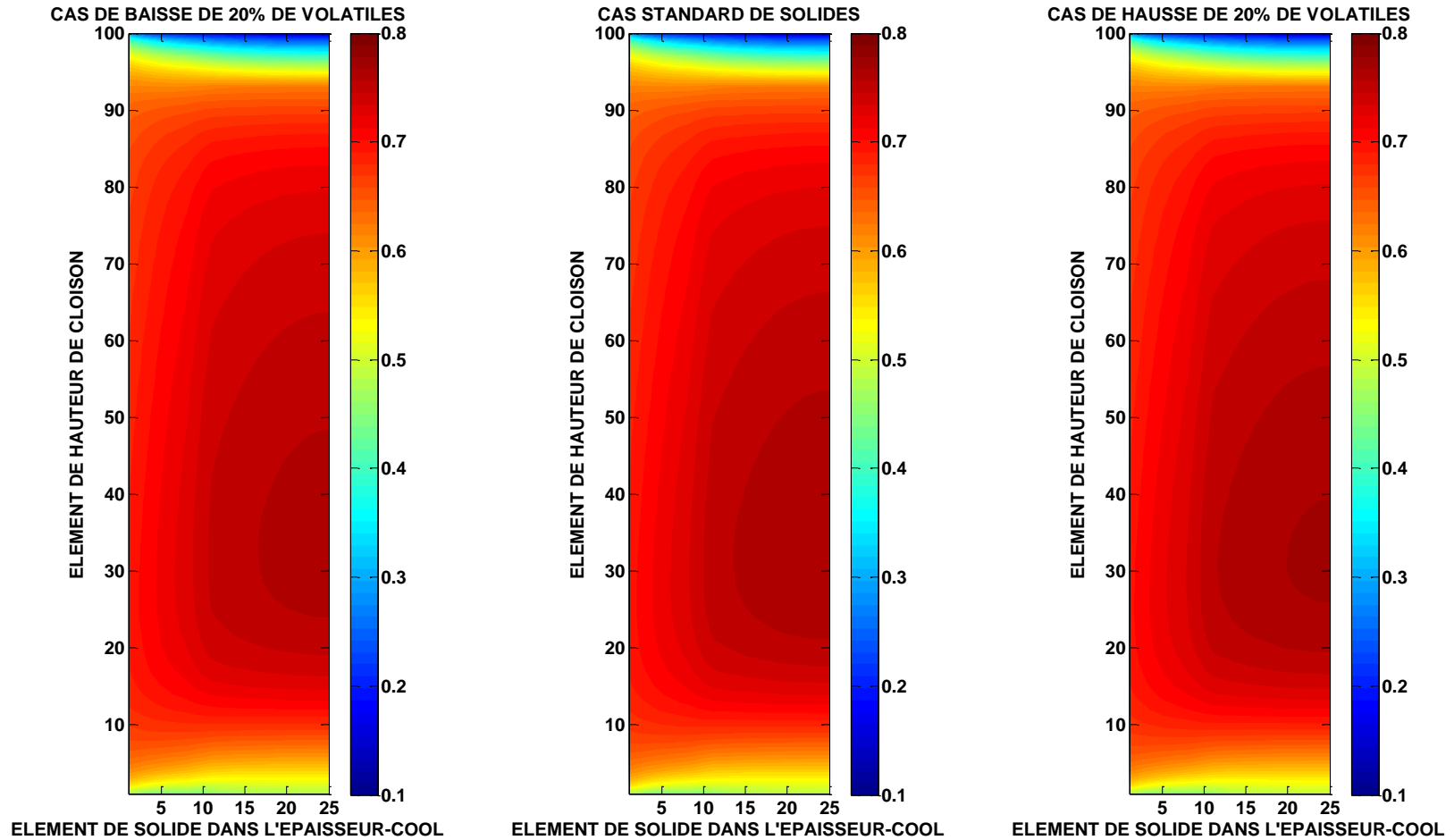


Figure 4-16 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement (la figure 4-15 est visualisée sur une autre échelle)

4-4.2. Zone de chauffage

Les volatiles dans une anode donnée enfournée sont supposés avoir été majoritairement dégagés dans les sections de préchauffages 8 et 9 des anodes. Dans des conditions avec un dégagement optimal, la combustion des volatiles libère environ 50% de l'énergie nécessaire à la cuisson des anodes ou encore à la cokéfaction du brai. L'autre moitié est ajoutée dans la zone de chauffage. Ainsi, d'une augmentation de la quantité de volatiles ajoutée peut résulter des changements importants au procédé de cuisson des anodes.

En effet, sur les figures 4-17 et 4-18 on observe les deux distributions de température respectivement dans les gaz de la cloison et dans les solides pour la variation de la quantité des volatiles brûlés. L'augmentation de la chaleur dégagée par la combustion des volatiles augmente la température dans les gaz et dans les solides. Dans la cuisson, la combustion des volatiles constitue une grande réserve énergétique. Normalement, son augmentation ou sa diminution dépend du type de brai, et la différence est compensée par l'ajout ou la diminution de l'injection du carburant. Les résultats viennent confirmer les observations de la littérature comme celles de Keller et Sulger [3] et également de Charette et al. [51]. Les volatiles occupent une part d'énergie importante dans le procédé de cuisson des anodes.

La figure 4-19 présente les effets de la combustion des volatiles et du carburant sur la même échelle de température sous la forme non normalisée. C'est évident que ces deux composants, qui fournissent l'énergie au procédé durant la cuisson, ont un impact important.

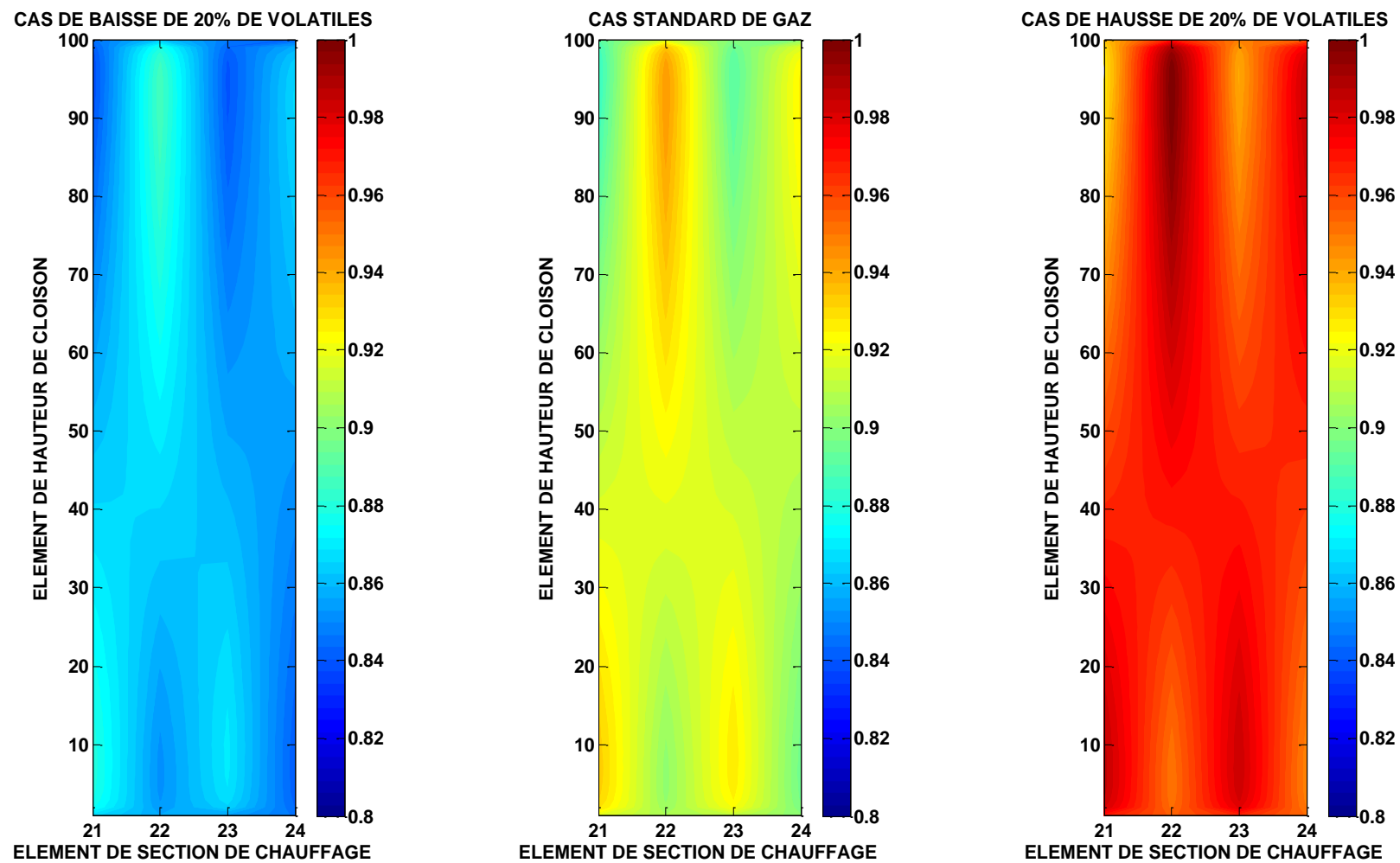


Figure 4-17 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage

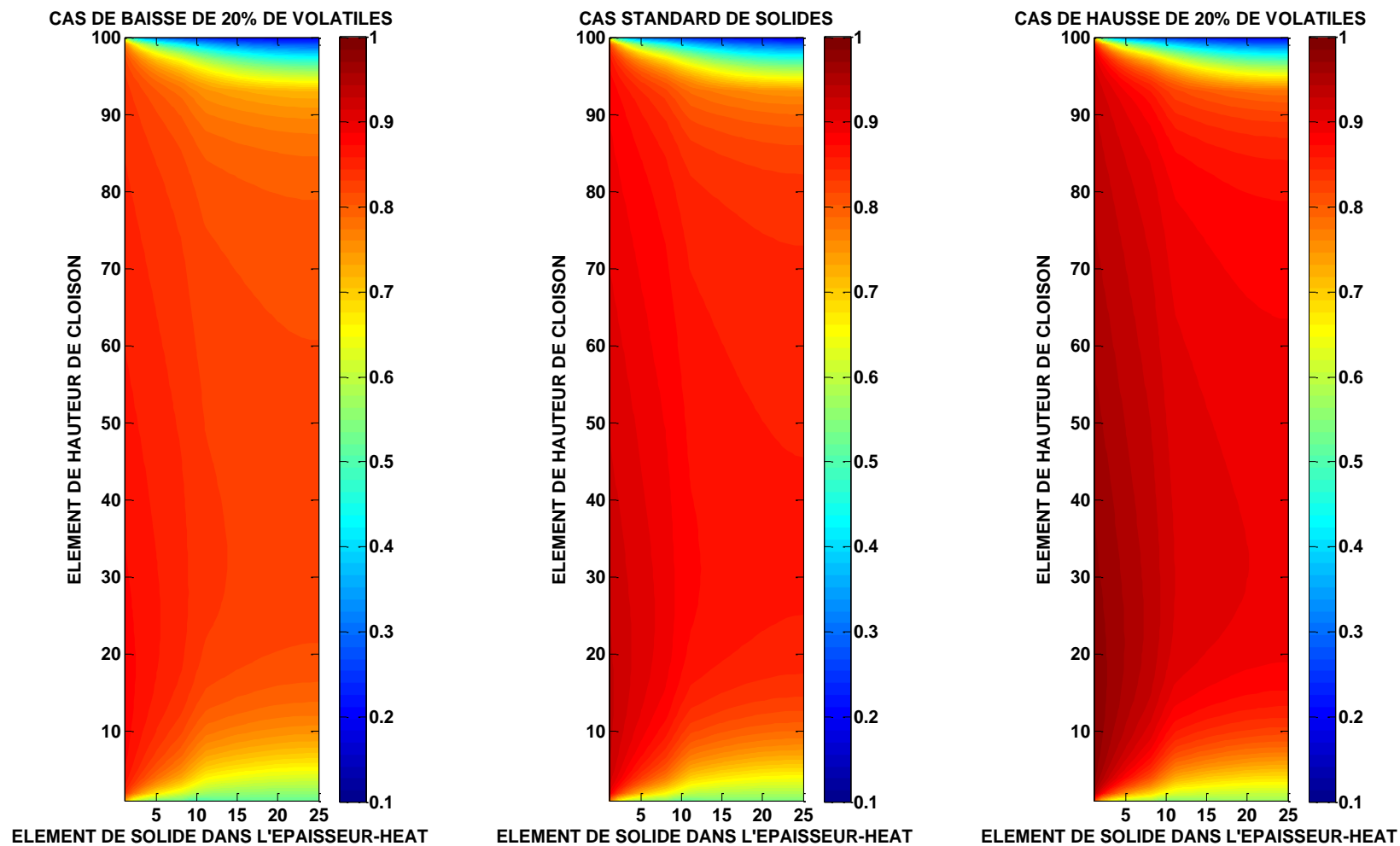


Figure 4-18 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage

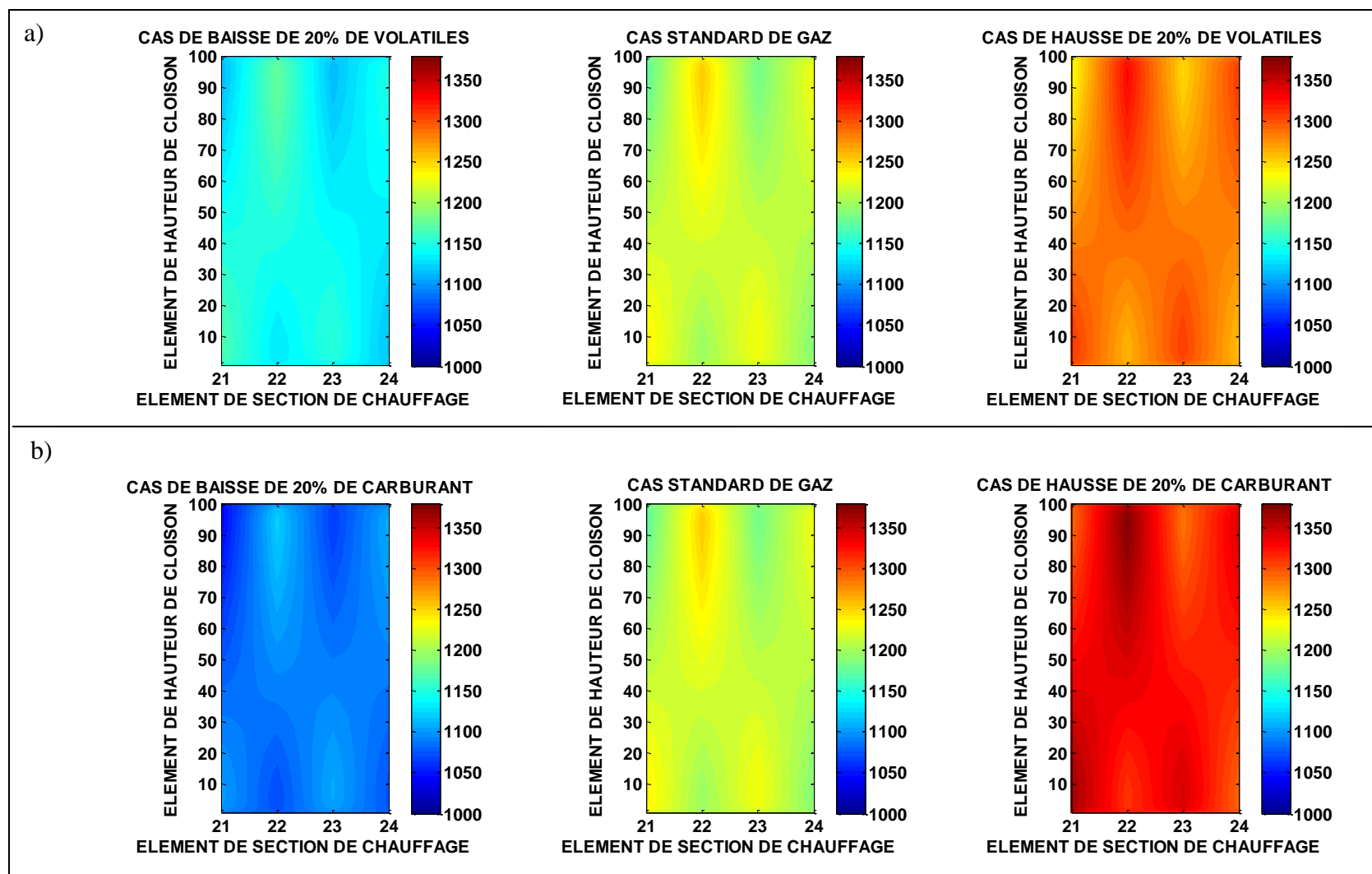


Figure 4-19 : Distribution de la température (en °C) des gaz dans la zone de chauffage montrant

a) l'influence des volatiles et b) l'influence du carburant

4-4.3. Zone de préchauffage

Les volatiles dégagés cèdent leur l'énergie au chauffage des gaz dans la cloison. Les figures 4-20 et 4-21 montrent les résultats des simulations effectués sous des changements de quantités de volatiles. Les changements de températures qui évoluent plus rapidement vers des zones de températures plus élevées avec l'augmentation de la quantité de volatiles. C'est pourquoi, il est important de trouver la bonne quantité de volatiles qui interviendra dans la recette de fabrication des anodes de carbones pour les besoins économiques.

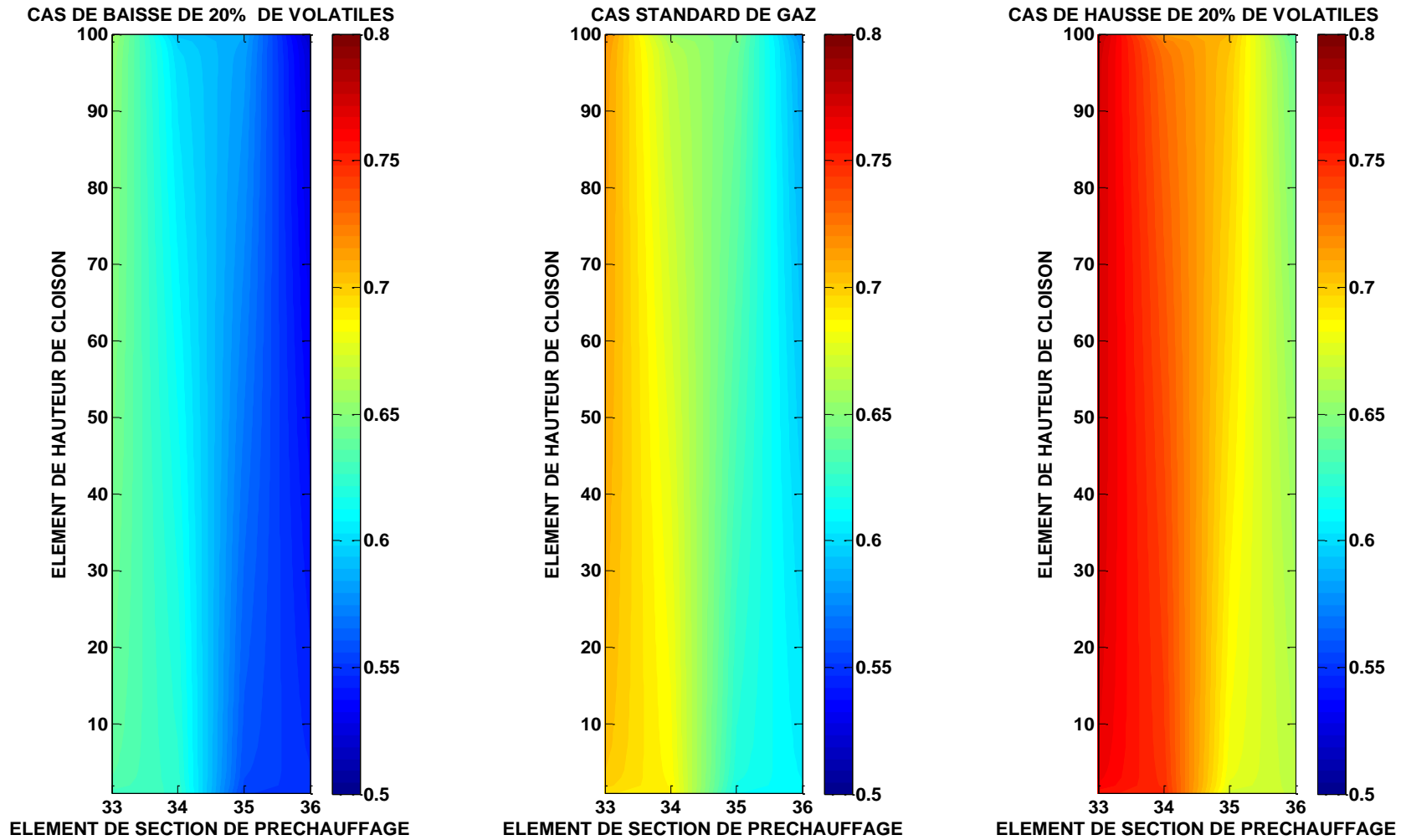


Figure 4-20 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage

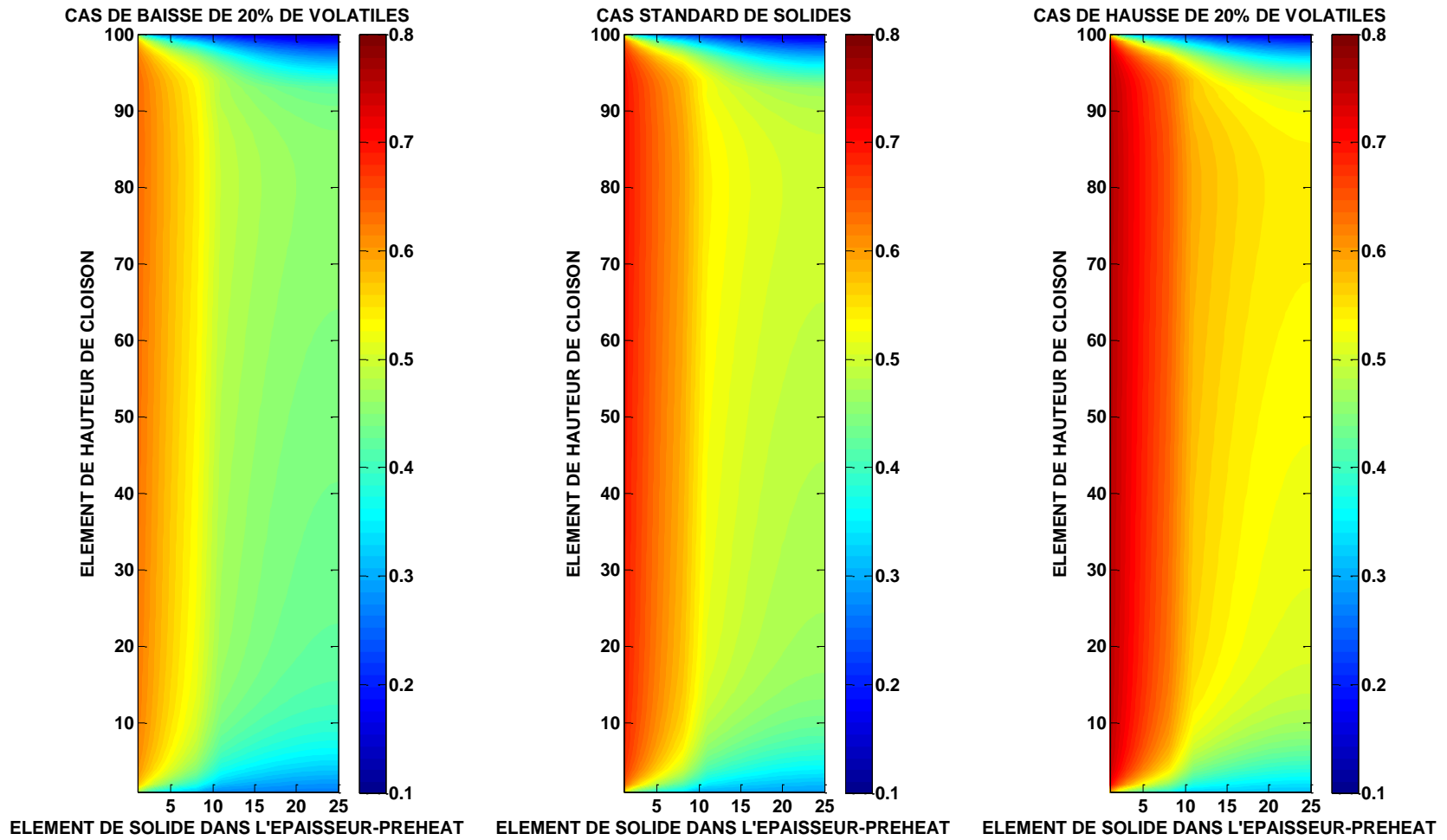


Figure 4-21 : Influence du changement de débit de volatiles dégagés sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage

L'étude comparative de l'évolution des profils de températures en réaction au changement de conditions énergétiques plus précisément avec des quantités de matières volatiles dégagées différentes est présentée sur les figures suivantes. Les figures 4-22, 4-23, 4-24 et 4-25, ci-après montrent les résultats de simulation du modèle pour les profils de températures et de gaz en faisant varier les débits de matières volatiles de -20%, -10%, +10% et +20% de la valeur dans les conditions standards du procédé.

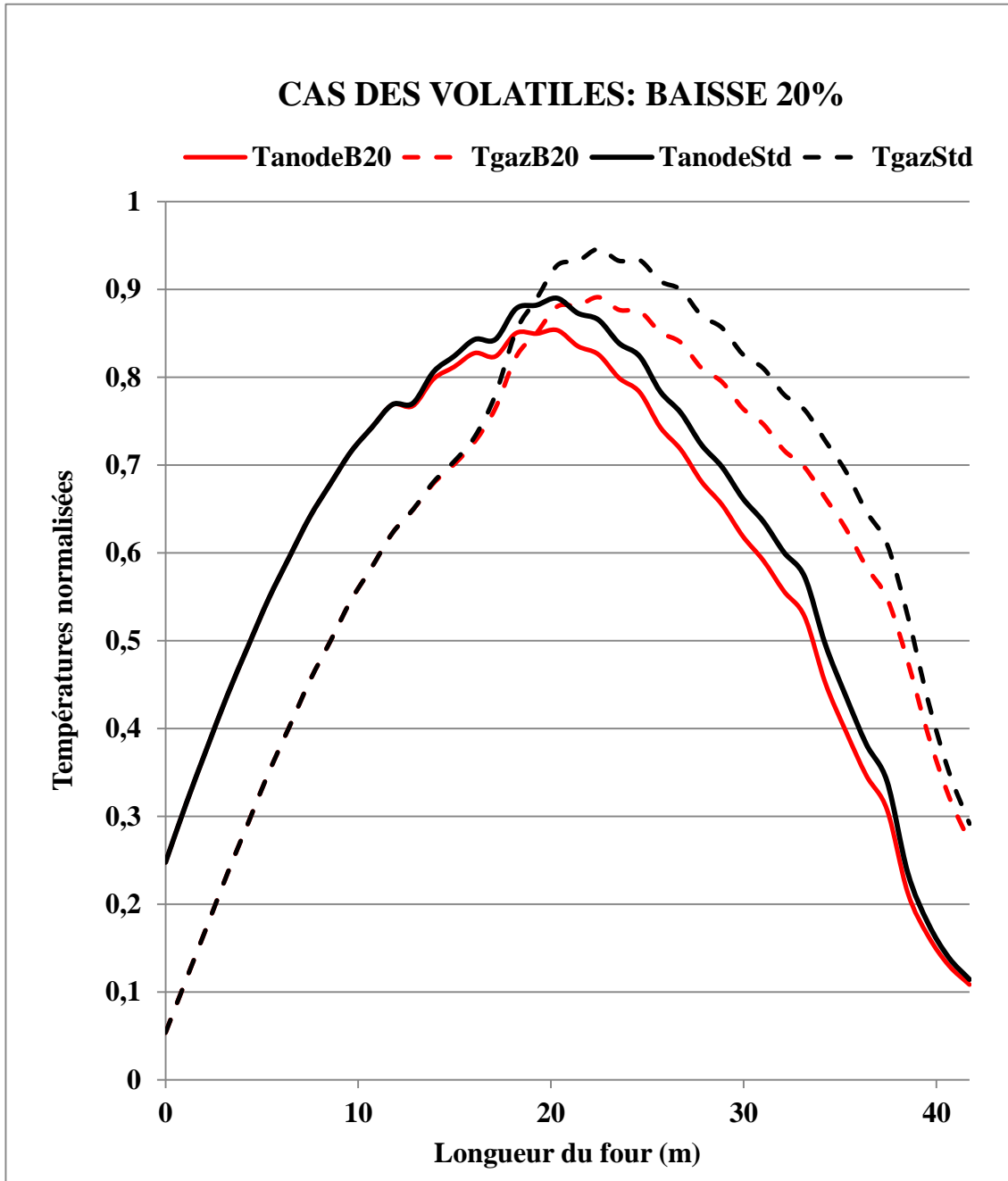


Figure 4-22 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une baisse de 20% de la quantité de volatiles

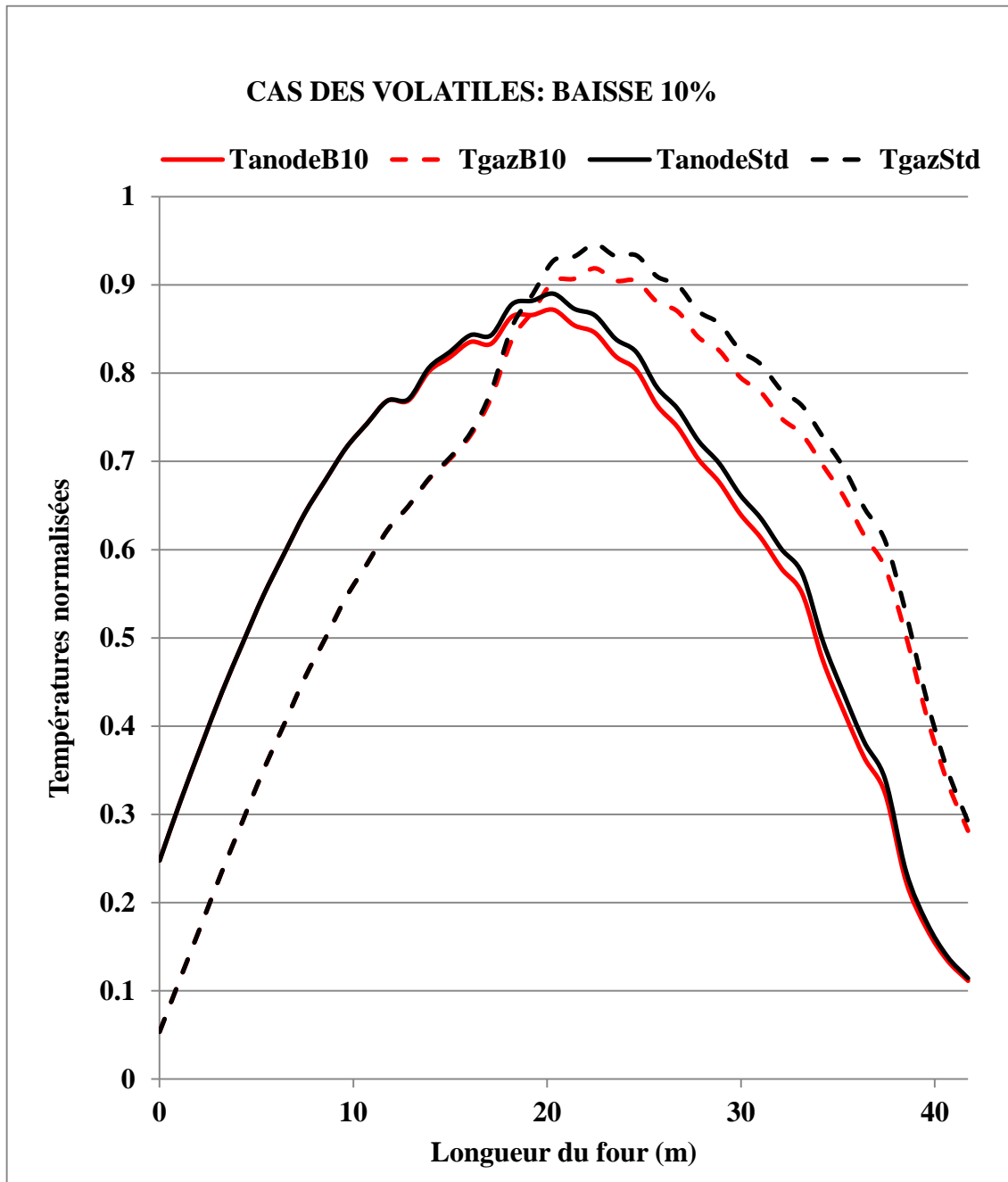


Figure 4-23 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une baisse de 10% de la quantité de volatiles

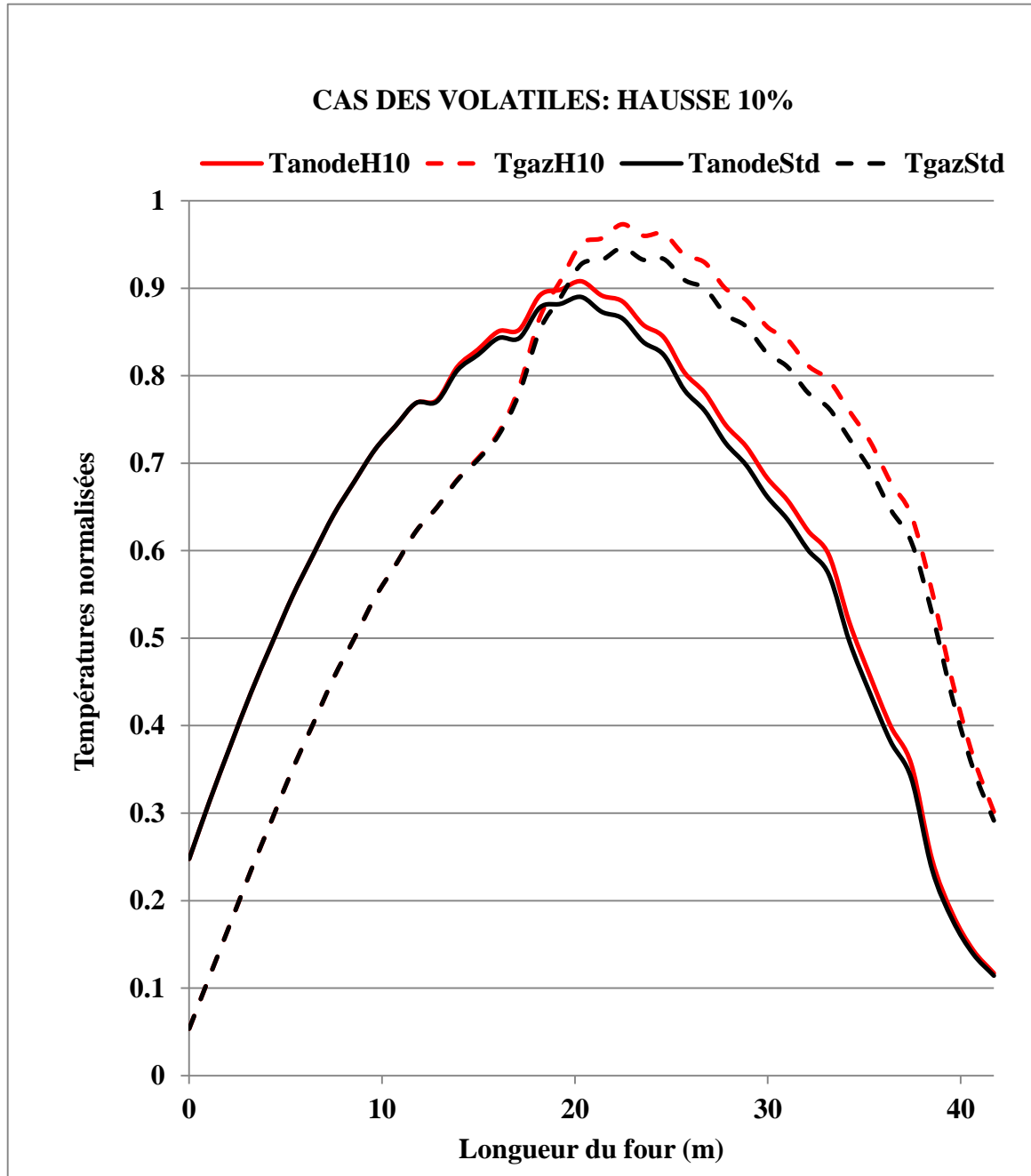


Figure 4-24 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une hausse de 10% de la quantité de matières volatiles dégagée

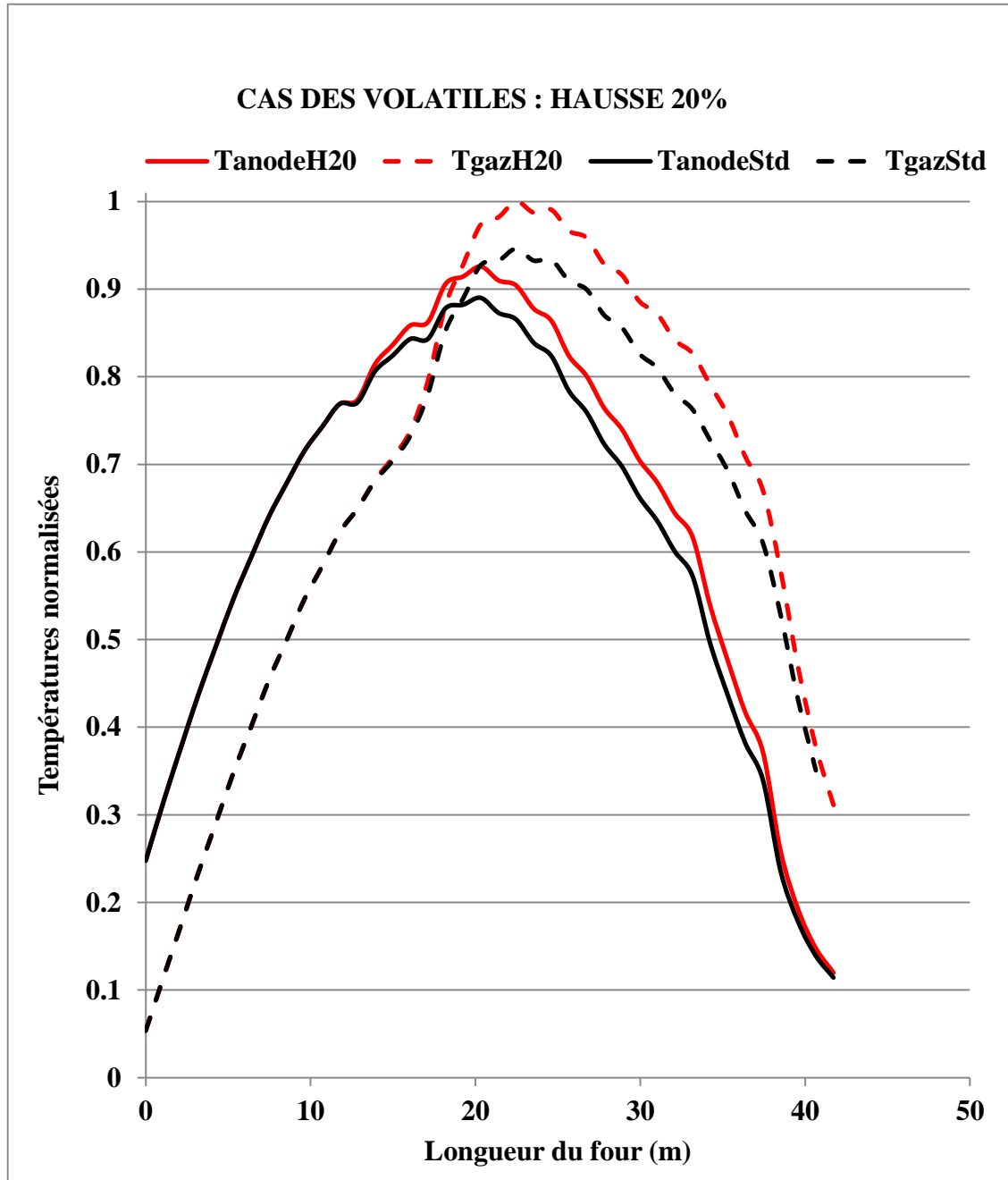


Figure 4-25 : Profils de température au centre des anodes et dans les gaz pour une hausse de 20% de la quantité de matières volatiles dégagée

4-5 Influence du diamètre hydraulique

Le conduit de circulation des gaz est perçu comme un canal rectangulaire dans lequel circulent les gaz de combustion combinés à l'air soufflé et infiltré. Ainsi dans le cas d'un écoulement interne à travers un conduit tel que la cloison, on définit un diamètre effectif encore appelé diamètre hydraulique L défini comme suit :

$$L=4A_c/P \quad (4.1)$$

Lorsqu'on parle de réduction du diamètre hydraulique, on réduit la longueur caractéristique du conduit de circulation des gaz comme illustré par le schéma de la figure 4-26. En général, la longueur et la hauteur d'une cloison dépendent des dimensions des anodes ; mais sa largeur peut être changée, ce qui modifie le diamètre hydraulique affectant les coefficients de transfert de chaleur et le temps de résidence des gaz.

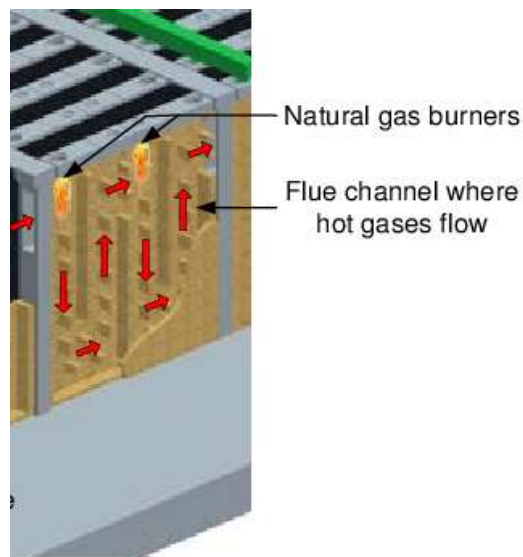


Figure 4-26 : Schéma d'une coupe longitudinale présentant l'intérieur d'une cloison dans un four horizontal de cuisson d'anodes

En effet, le coefficient de transfert de chaleur est inversement proportionnelle au diamètre hydraulique des cloisons par la formule suivante [87] :

$$h=Nu(k/L) \text{ avec } Nu=0.664Pr^a Re_L^b \quad (4.2)$$

où Pr et Re_L sont respectivement des nombres adimensionnels de Prandtl et de Reynolds. Donc, l'augmentation du diamètre hydraulique diminue le transfert de chaleur par convection à cause de la baisse du coefficient convectif. En même temps, une telle augmentation du diamètre hydraulique augmente le temps de résidence, ce qui favorise le transfert de chaleur.

Les figures 4-27 et 4-28 montrent l'effet qu'un changement de la géométrie peut occasionner sur l'évolution de la température durant la cuisson dans la zone de refroidissement. Ici, l'impact de la baisse du coefficient convectif est plus important et diminue le transfert de chaleur des anodes aux gaz. Donc, quand on augmente le diamètre hydraulique, l'air reçoit moins de chaleur et reste légèrement plus froid (la figure 4-27), et les anodes demeurent un peu plus chaudes (mais c'est difficile de voir cet effet sur la figure 4-28 à cause des différences minimes). Dans la zone de refroidissement, l'air ne participe pas dans le transfert de chaleur par rayonnement ; seulement les murs échangent la chaleur radiative.

Les résultats dans les zones de chauffage et de préchauffages sont illustrés respectivement aux figures 4-29 et 4-30 puis aux figures 4-31 et 4-32. On peut voir que l'effet de l'augmentation du temps de résidence est prédominant dans la zone de chauffage, résultant des températures plus élevées (les figures 4-29 et 4-30). Dans la zone de préchauffage, on observe la même tendance, mais à un niveau beaucoup moins prononcé. Les zones de chauffage et de préchauffage sont gouvernées par le phénomène de transfert par rayonnement à cause de la présence des gaz comme CO_2 et H_2O contrairement à la zone de refroidissement.

Une augmentation de l'apport énergétique dans le four entraîne une augmentation générale du niveau de cuisson notamment lorsqu'on augmente les débits de carburant et de volatiles. Ces résultats viennent également confirmer les travaux de Keller et Disselhorst qui ont été réalisés en 1981 [58]. Ils ont également trouvé que le que le temps de résidence des gaz dans la cloison augmente la température, ce qui appuie les observations faites pour la zone de chauffage dans le cas du diamètre hydraulique.

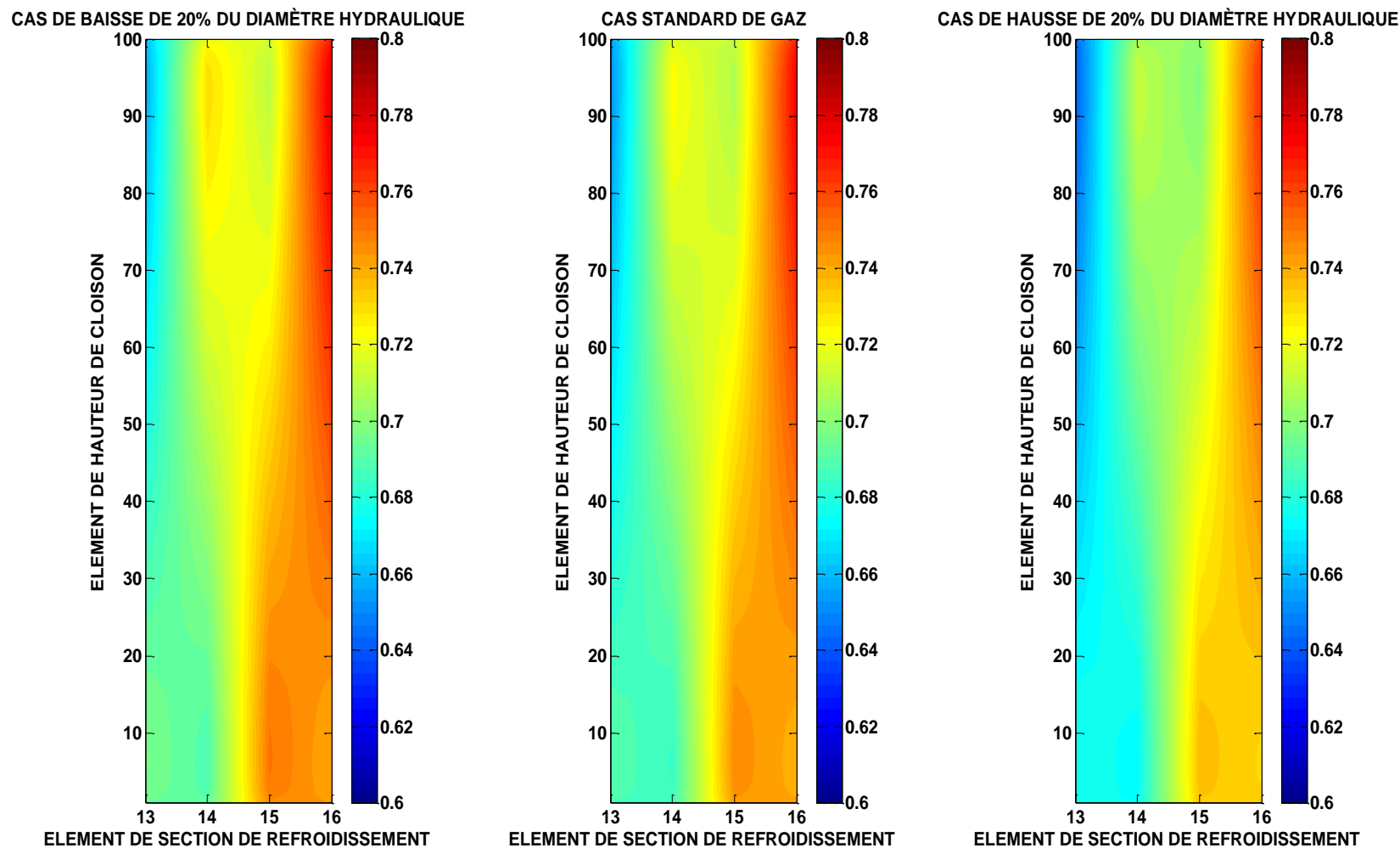


Figure 4-27 : Influence du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement

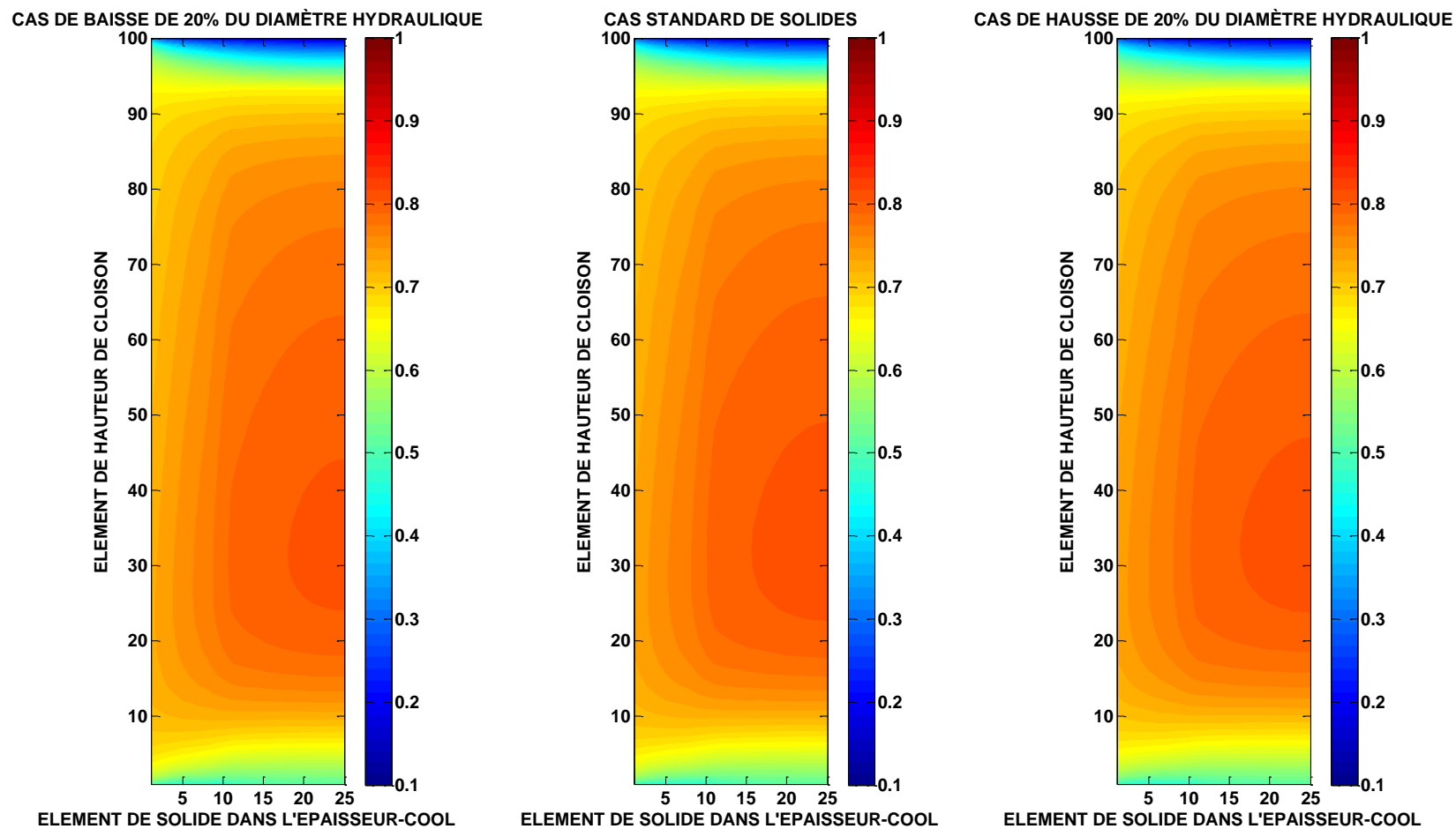


Figure 4-28 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement

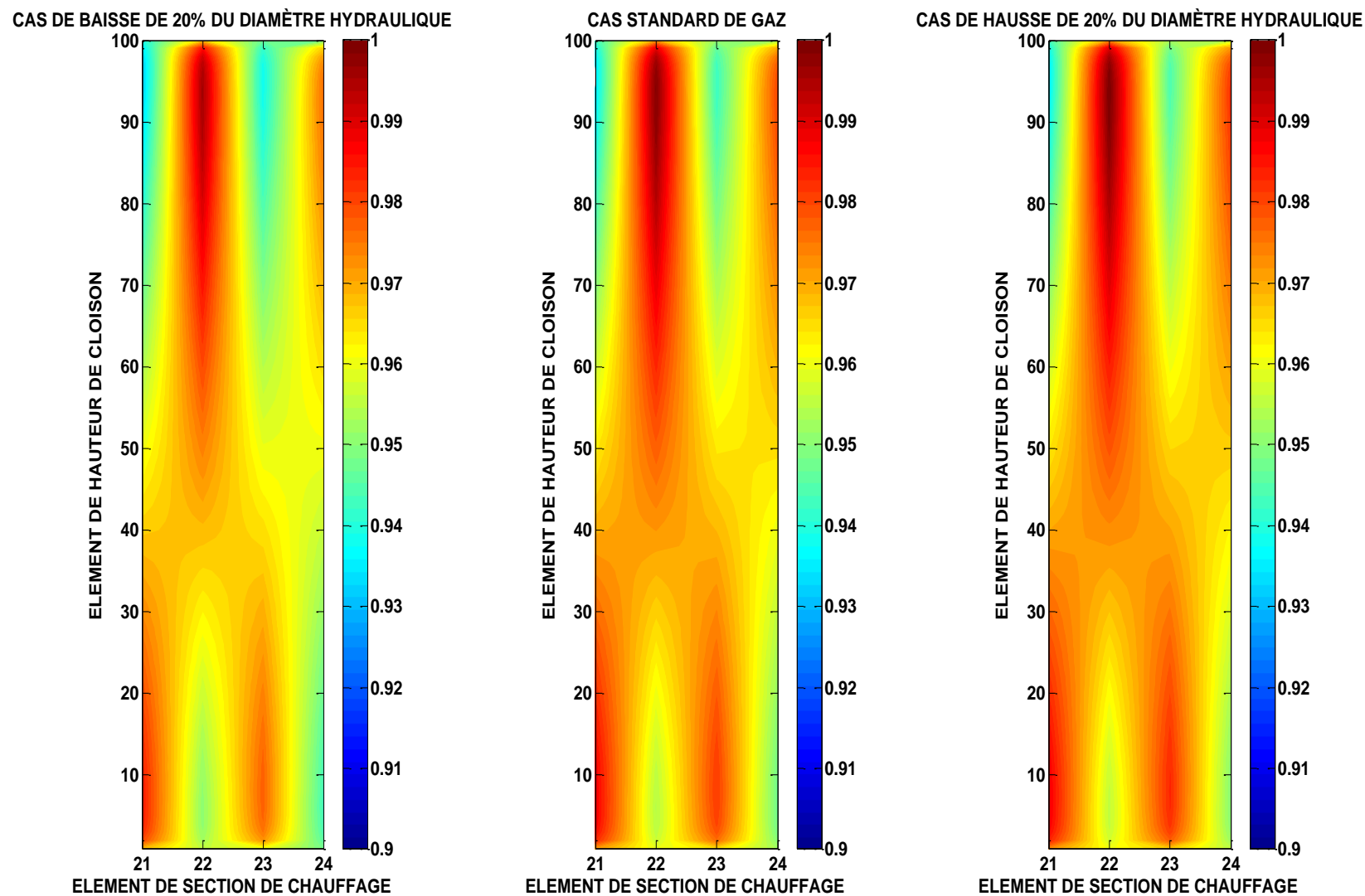


Figure 4-29 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage

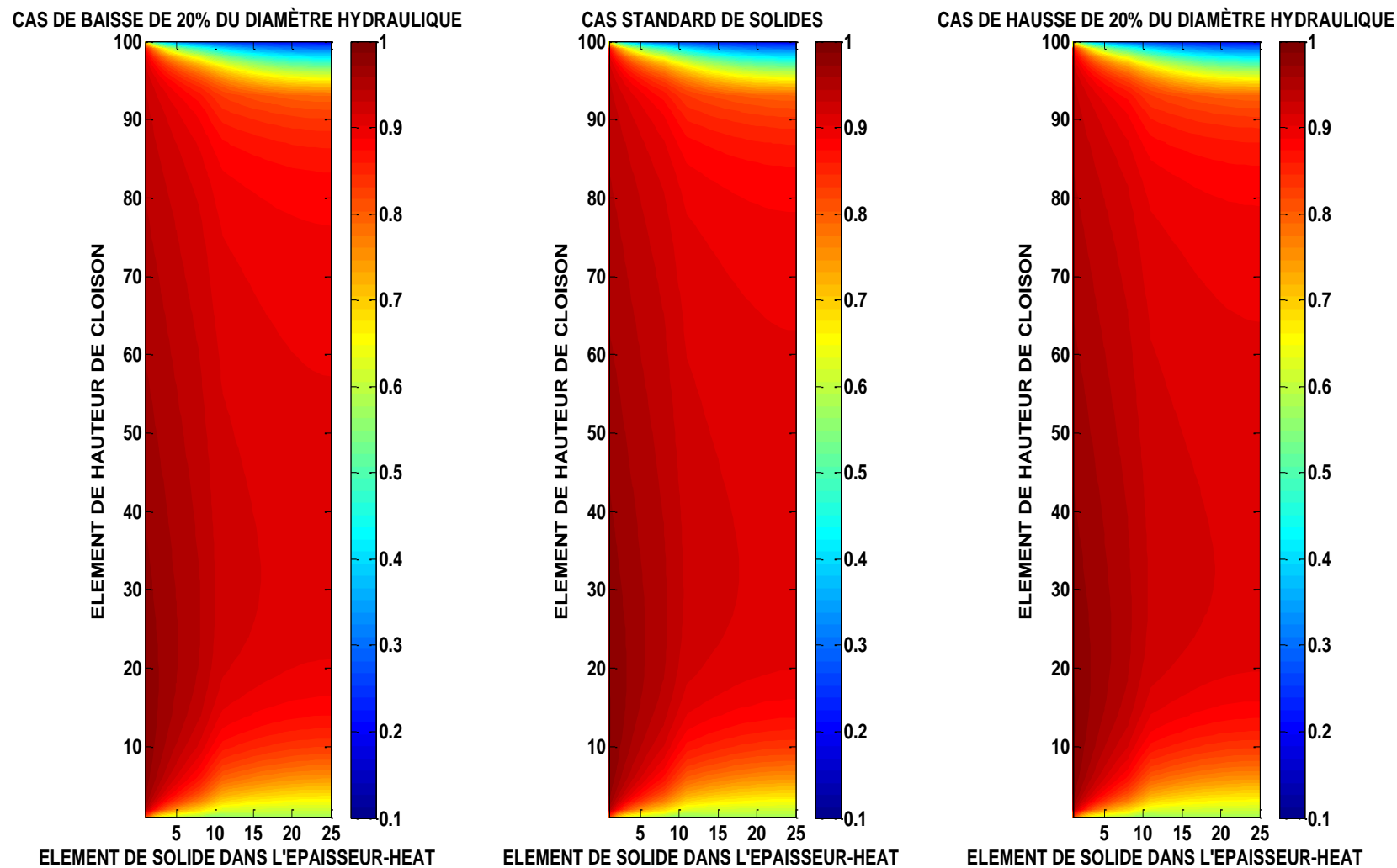


Figure 4-30 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage

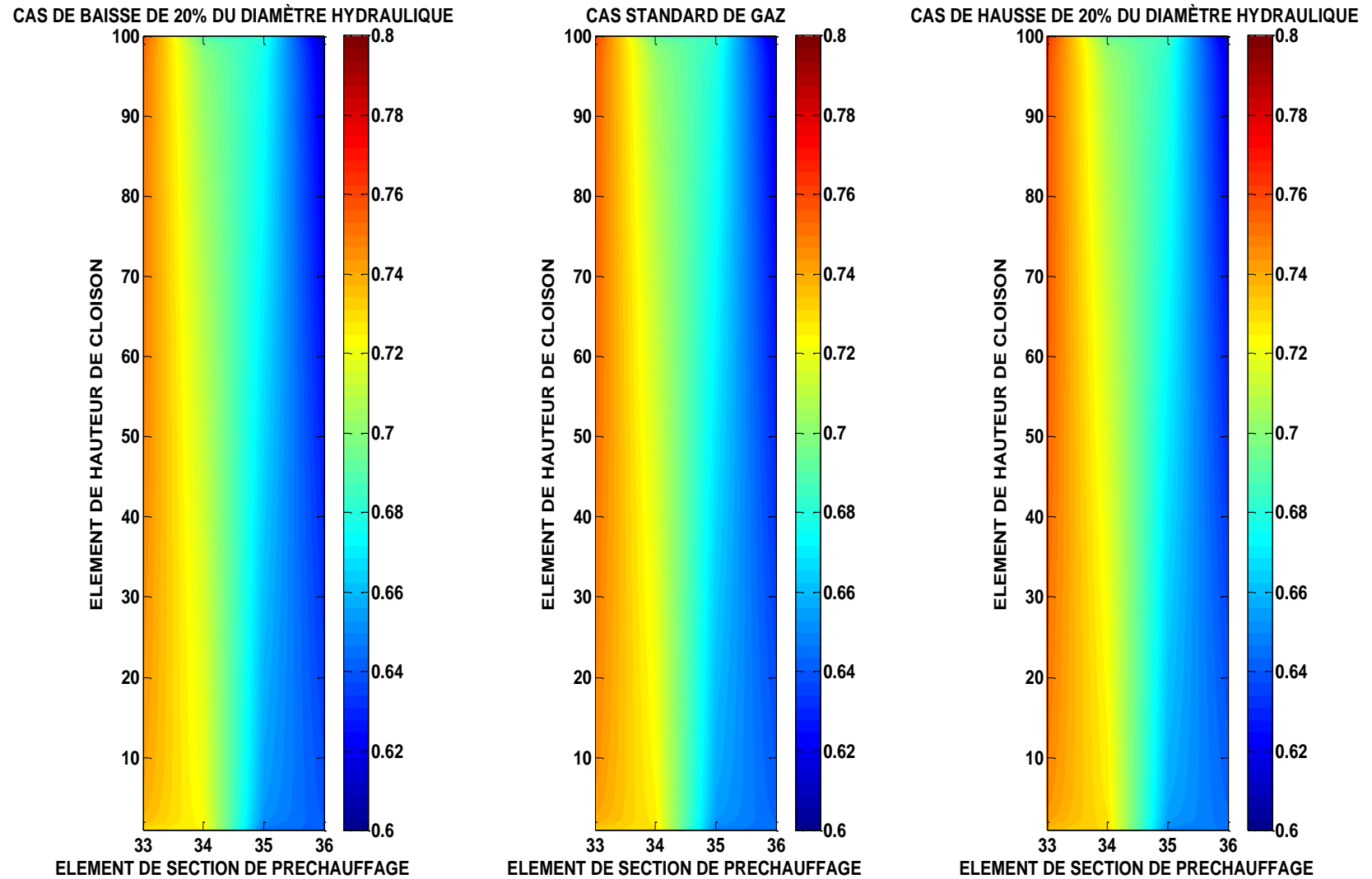


Figure 4-31 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage

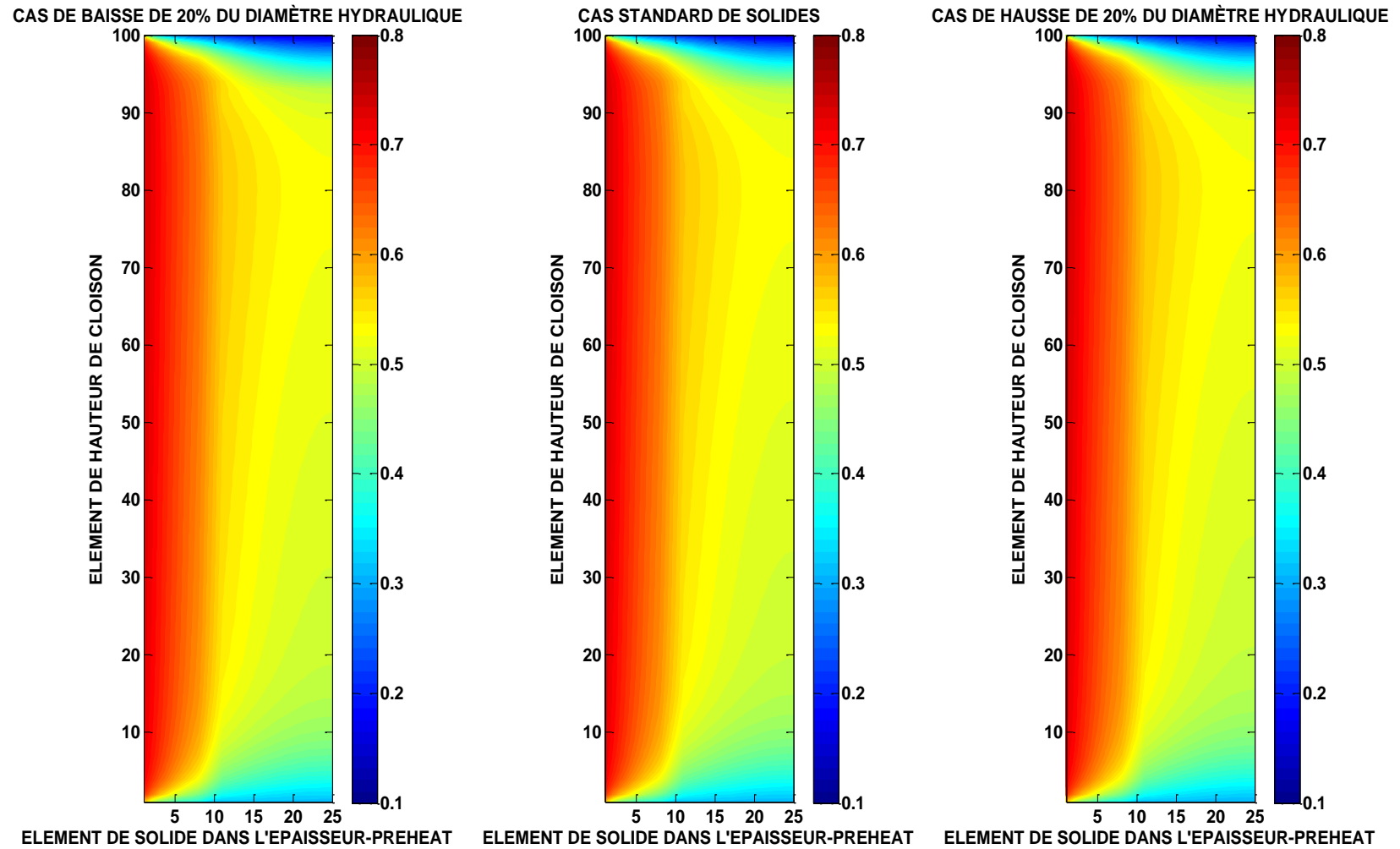


Figure 4-32 : Effet du changement du diamètre hydraulique sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage

4-6. Influence de la conductivité thermique des matériaux

Le coke de garnissage et les briques réfractaires sont des matériaux qui jouent chacun des rôles importants dans le procédé de cuisson des anodes. En effet, le coke est utilisé pour assurer une résistance à la déformation des anodes durant la cuisson. Il sert également de barrière protectrice aux anodes contre l'oxydation afin de ne pas les exposer directement à l'air. De ce fait, il engendre une résistance thermique beaucoup plus élevée que les deux autres solides dû à la porosité du coke. De même, les briques réfractaires avec lesquelles sont construites les cloisons offrent une résistance thermique. Quand on varie la conductivité thermique de certain pourcentage sans changement d'autres propriétés, la diffusivité thermique (la propriété importante pour la conduction transitoire) varie par le même pourcentage. L'étude de l'impact de leur conductivité thermique et par conséquent de leur diffusivité thermique sur la distribution des températures a été effectuée.

On observe successivement l'effet de l'évolution de la conductivité thermique des briques réfractaires pour les différentes zones sur les figures légendées de la figure 4-33 à la figure 4-38. L'augmentation des conductivités thermiques facilite le transfert de chaleur entre les solides et les gaz ; donc, quand la conductivité thermique diminue, la température des gaz est plus élevée dans les zones de chauffage et de préchauffage et plus faible dans la zone de refroidissement. Par contre, dans les solides, la variation de la diffusivité thermique affecte le transfert de chaleur et en même temps la distribution de la température dû à l'impact sur la distribution du stockage de l'énergie. Naturellement, les températures des solides suivent une tendance inverse à celle des gaz ; mais, il est plus difficile de voir ces variations à cause de l'impact sur la distribution de la chaleur. Pour voir clairement l'impact de la conductivité thermique sur la distribution de température des solides, il faut comparer les profils sur tous les

plans (P1 à P4, voir la figure 4-2). Aussi, le trempage des anodes pendant des longues périodes à haute température les permet d'atteindre des températures semblables dans les différents cas. La conductivité thermique des briques est donc un paramètre important pour la cuisson des anodes.

Les mêmes observations sont faites pour le coke de garnissage sur les figures légendées de la figure 4-39 à la figure 4-44. On observe les mêmes tendances que celles de la conductivité thermique des briques. Ayant la plus grande résistivité thermique des trois solides, l'impact de la variation de la conductivité thermique (et la diffusivité thermique) sur les températures est plus subtile.

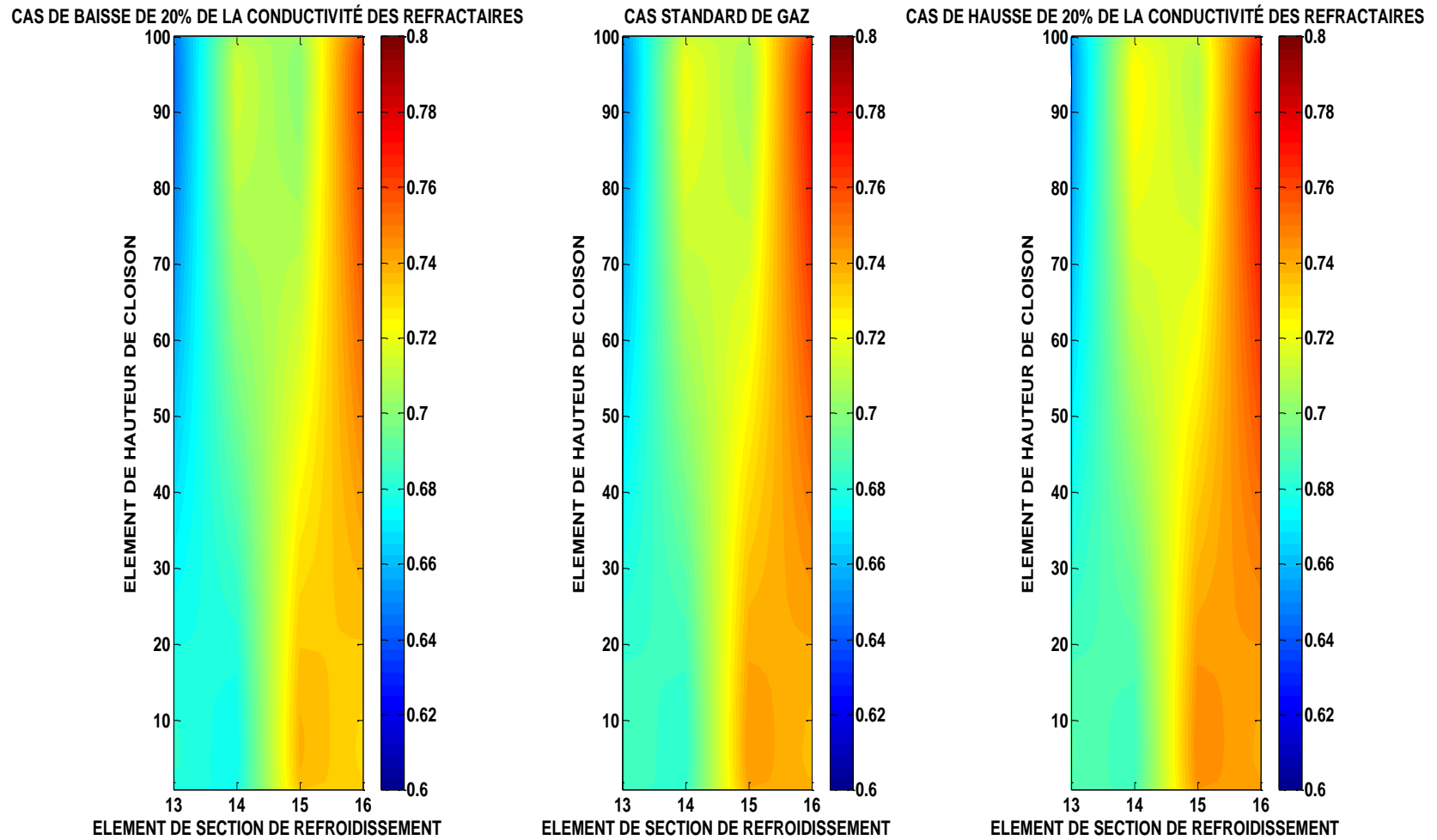


Figure 4-33 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement

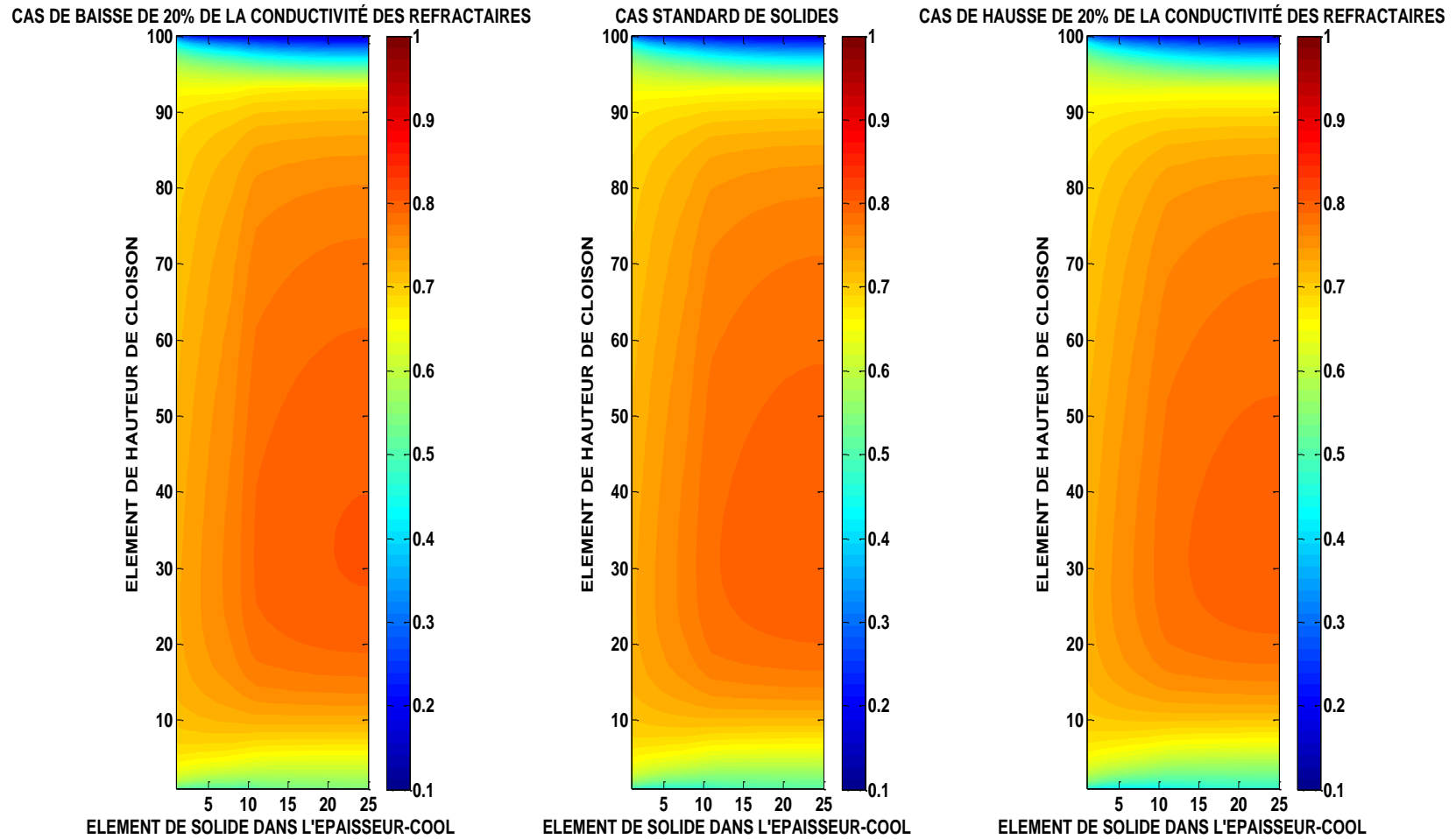


Figure 4-34 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement

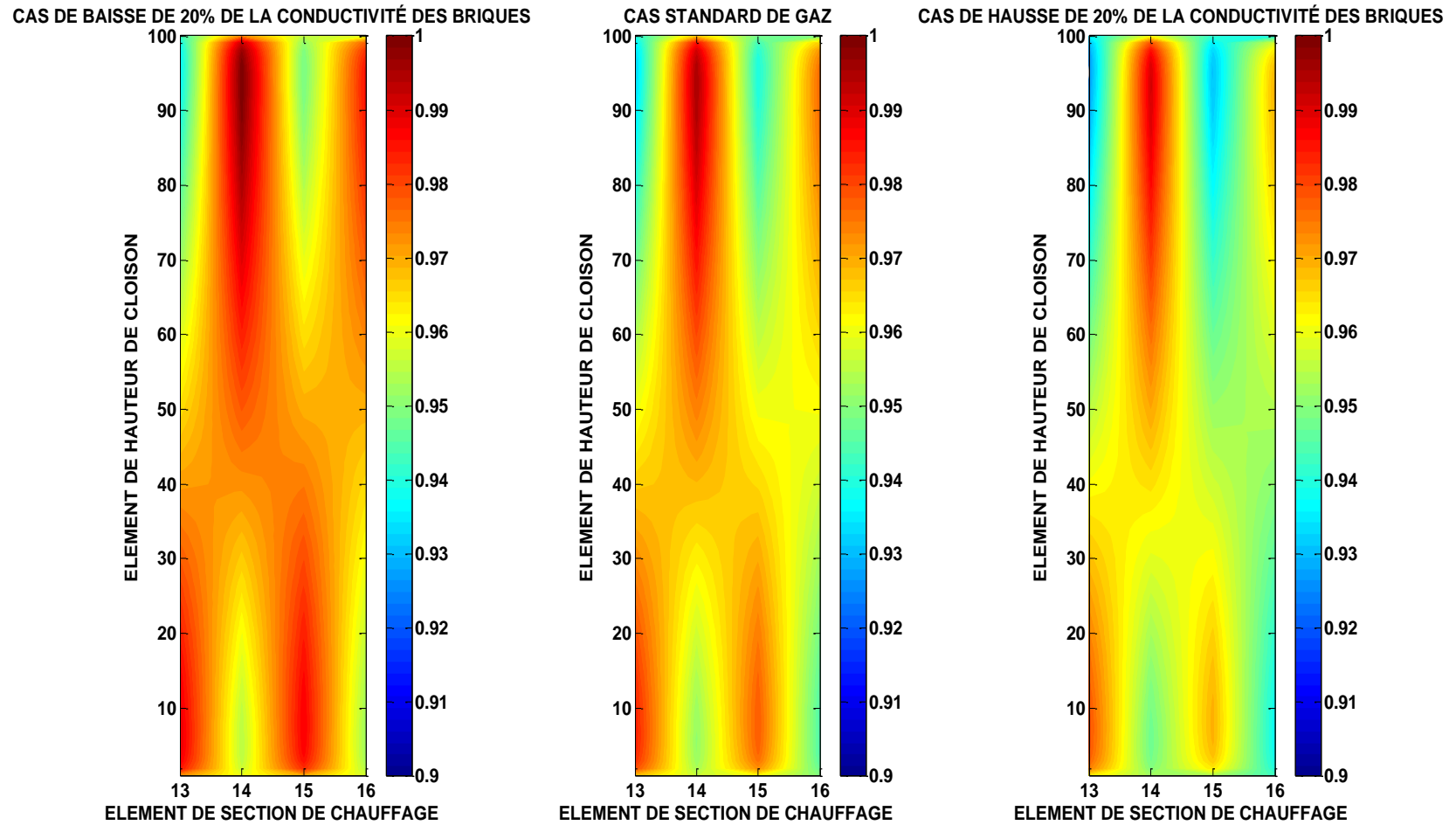


Figure 4-35 Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage

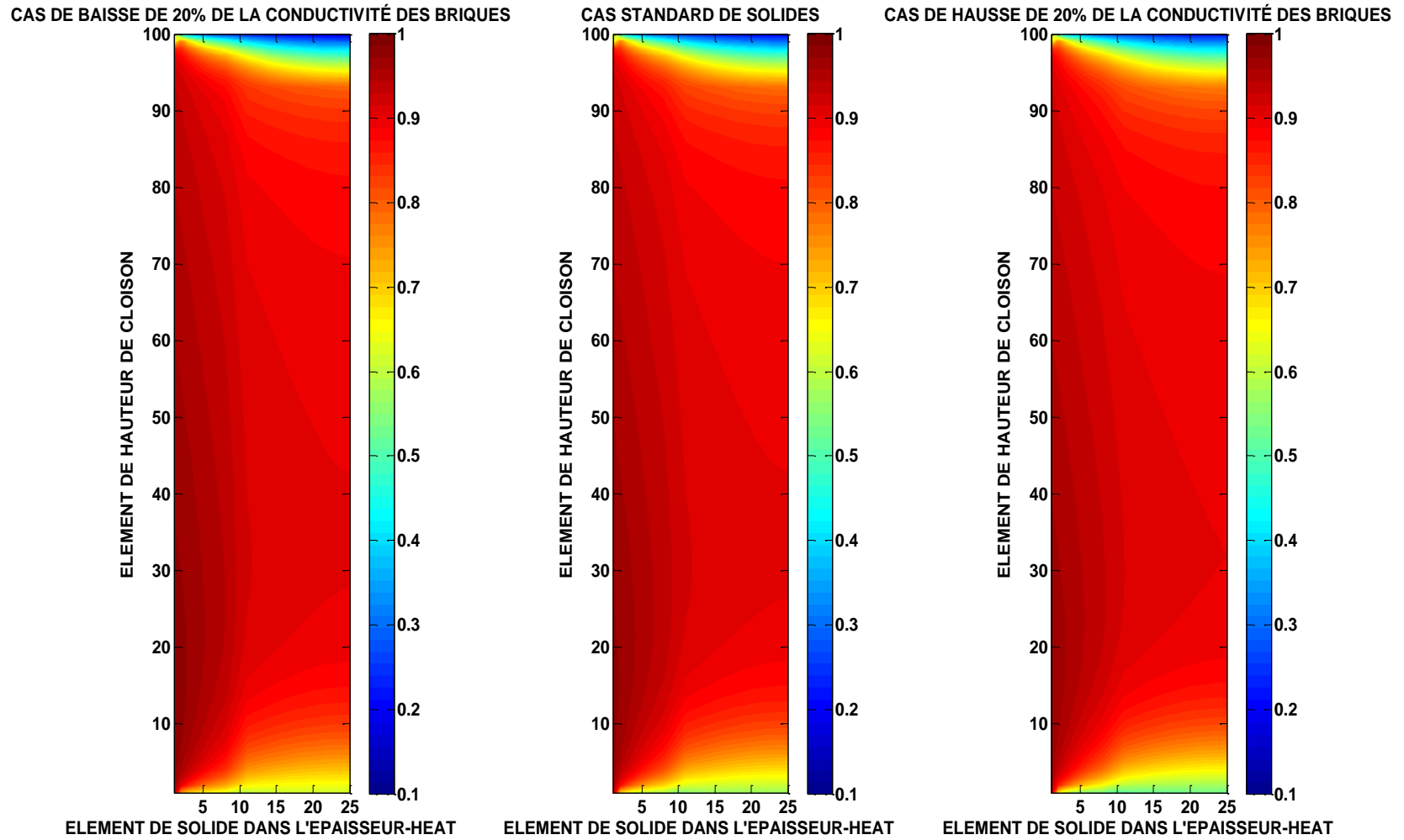


Figure 4-36 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage

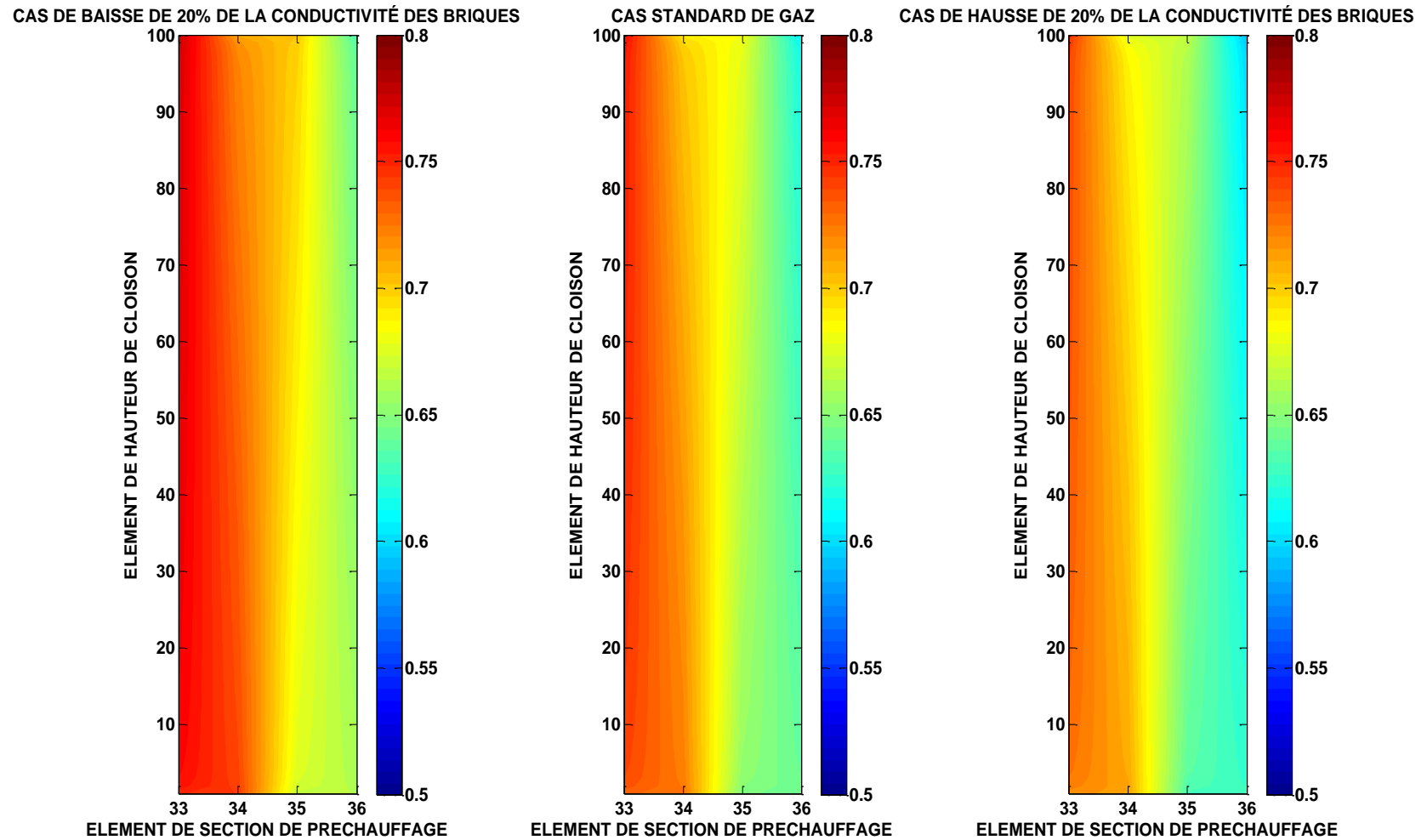


Figure 4-37 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des gaz pour la zone de préchauffage

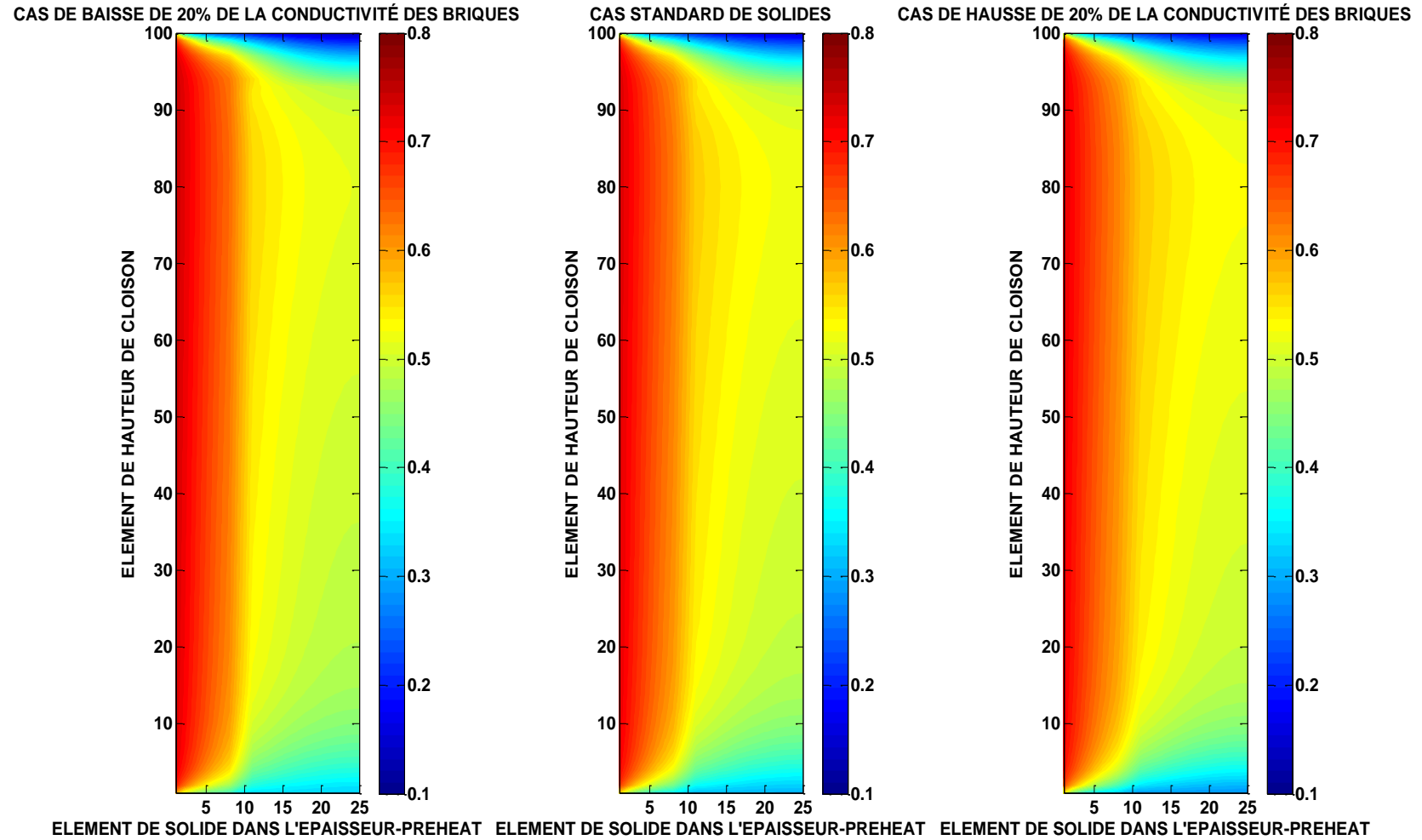


Figure 4-38 : Effet de la conductivité thermique des briques réfractaires sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage

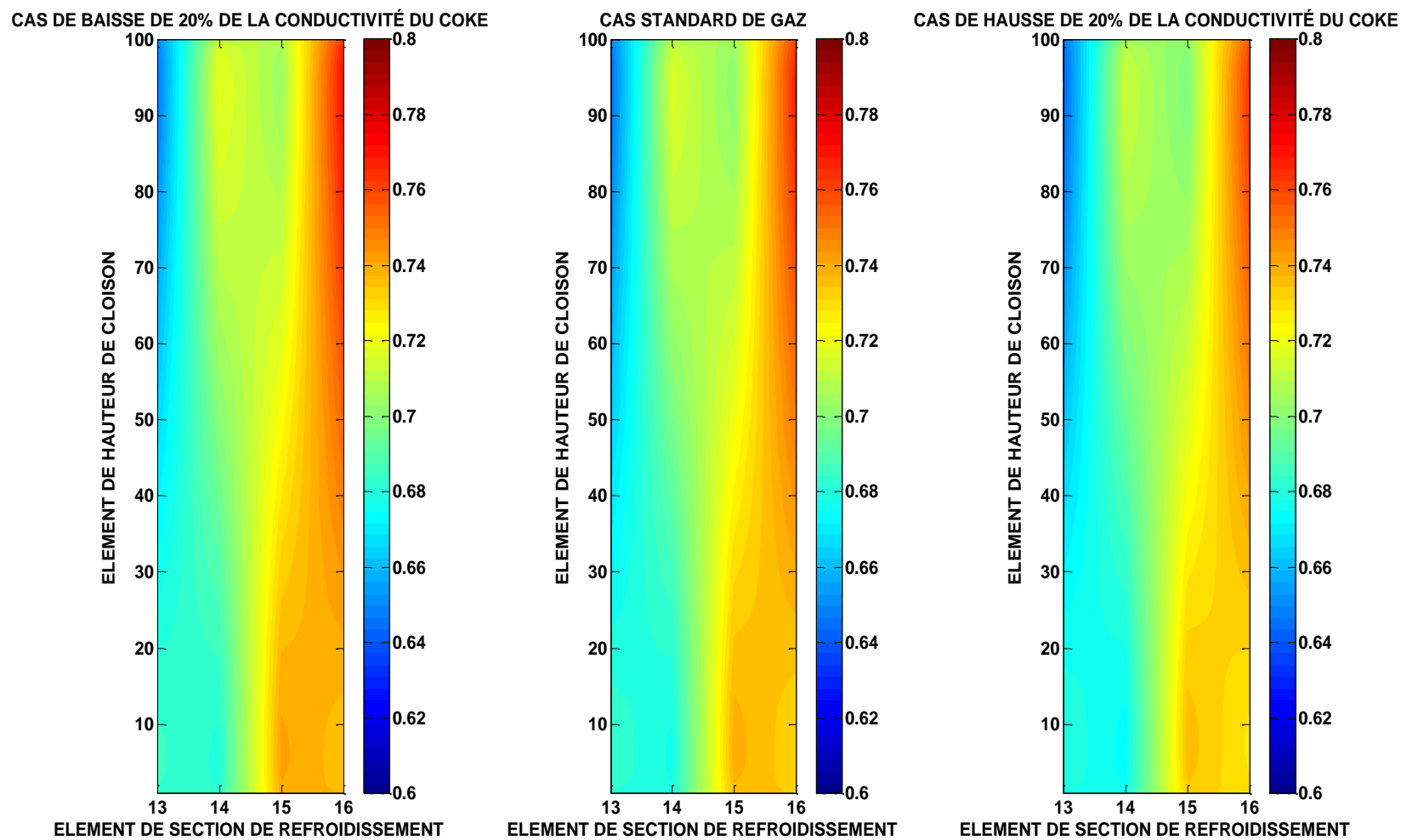


Figure 4-39 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des gaz pour la zone de refroidissement

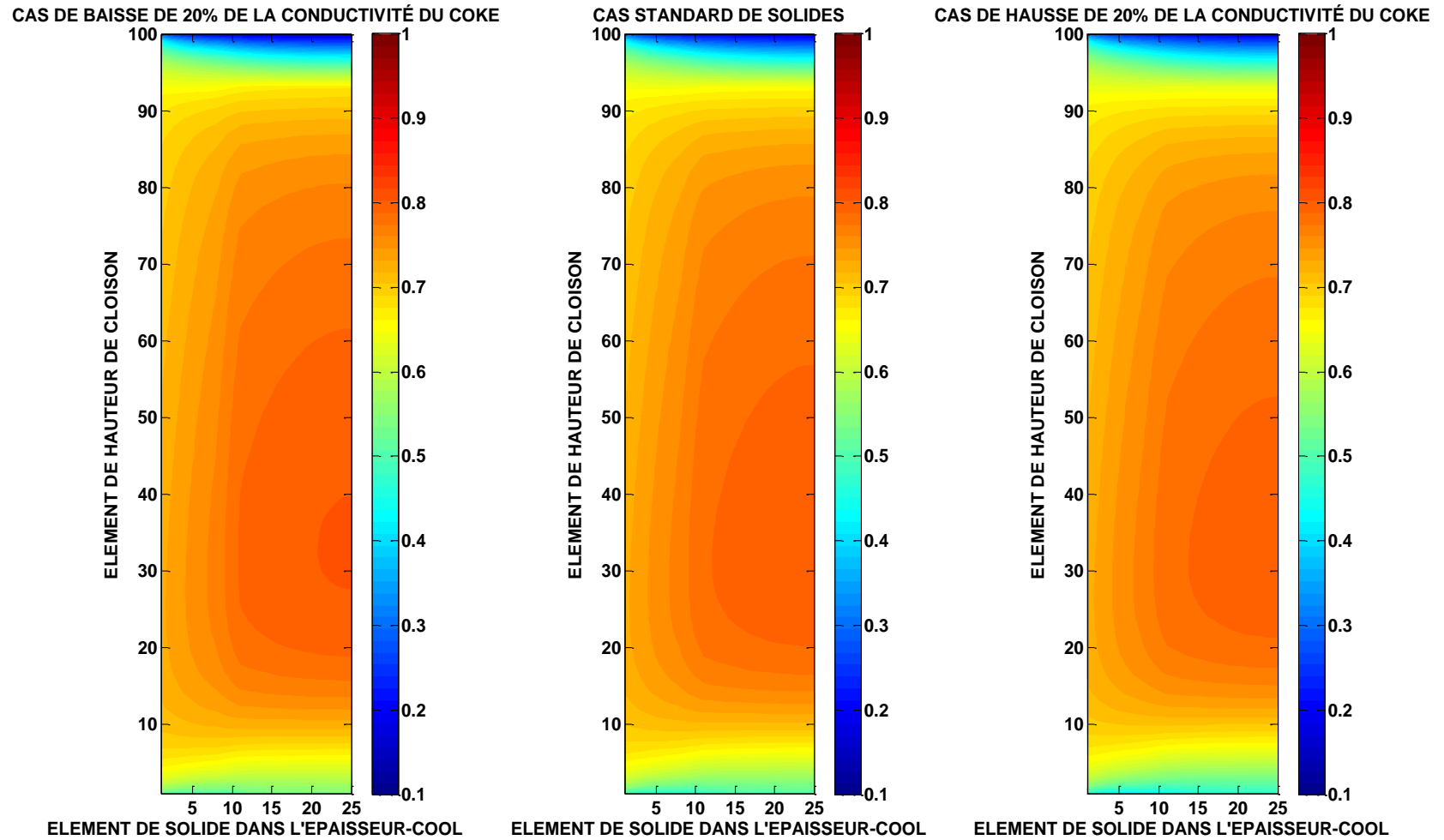


Figure 4-40 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de refroidissement

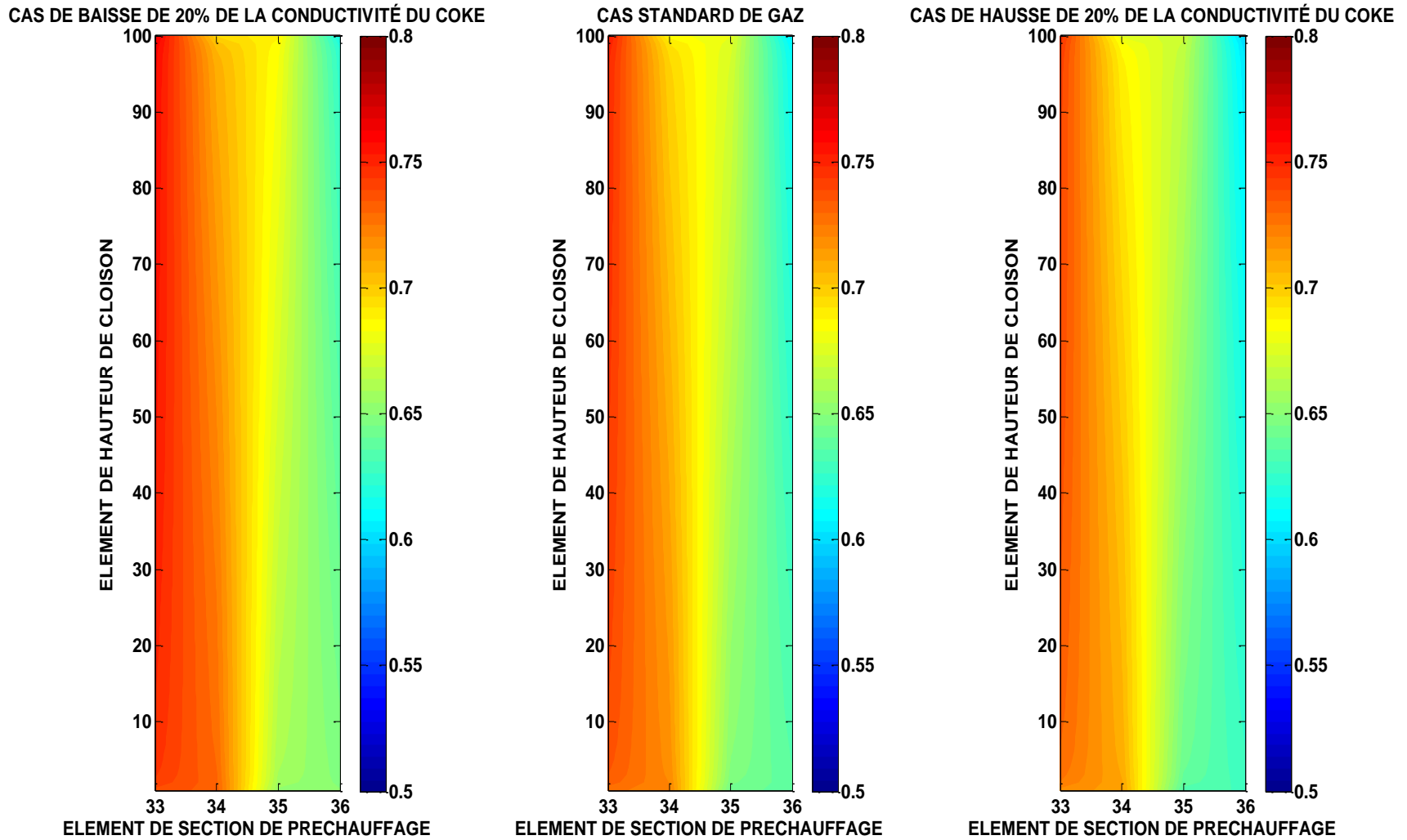


Figure 4-41 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des gaz pour la zone de chauffage

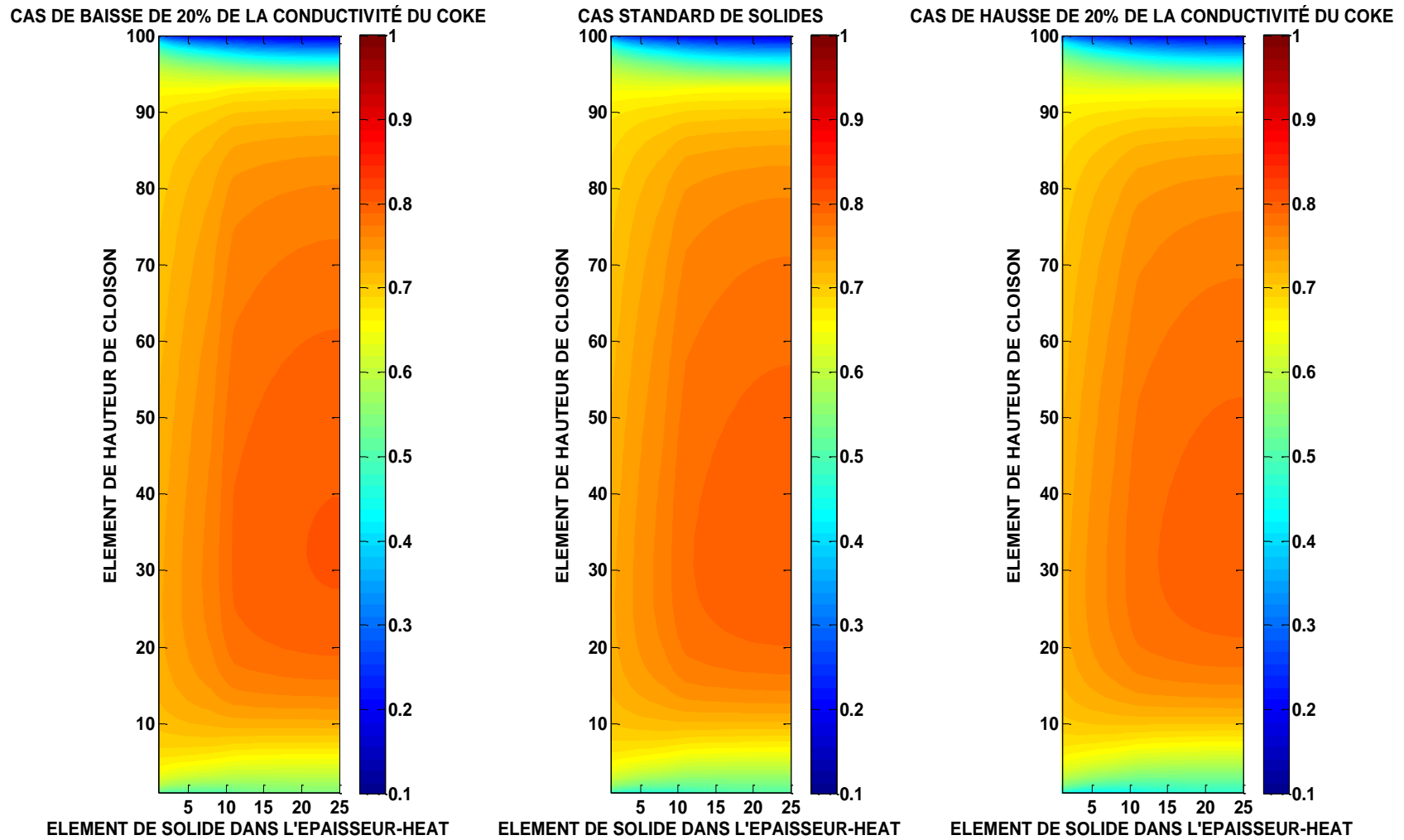


Figure 4-42 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de chauffage

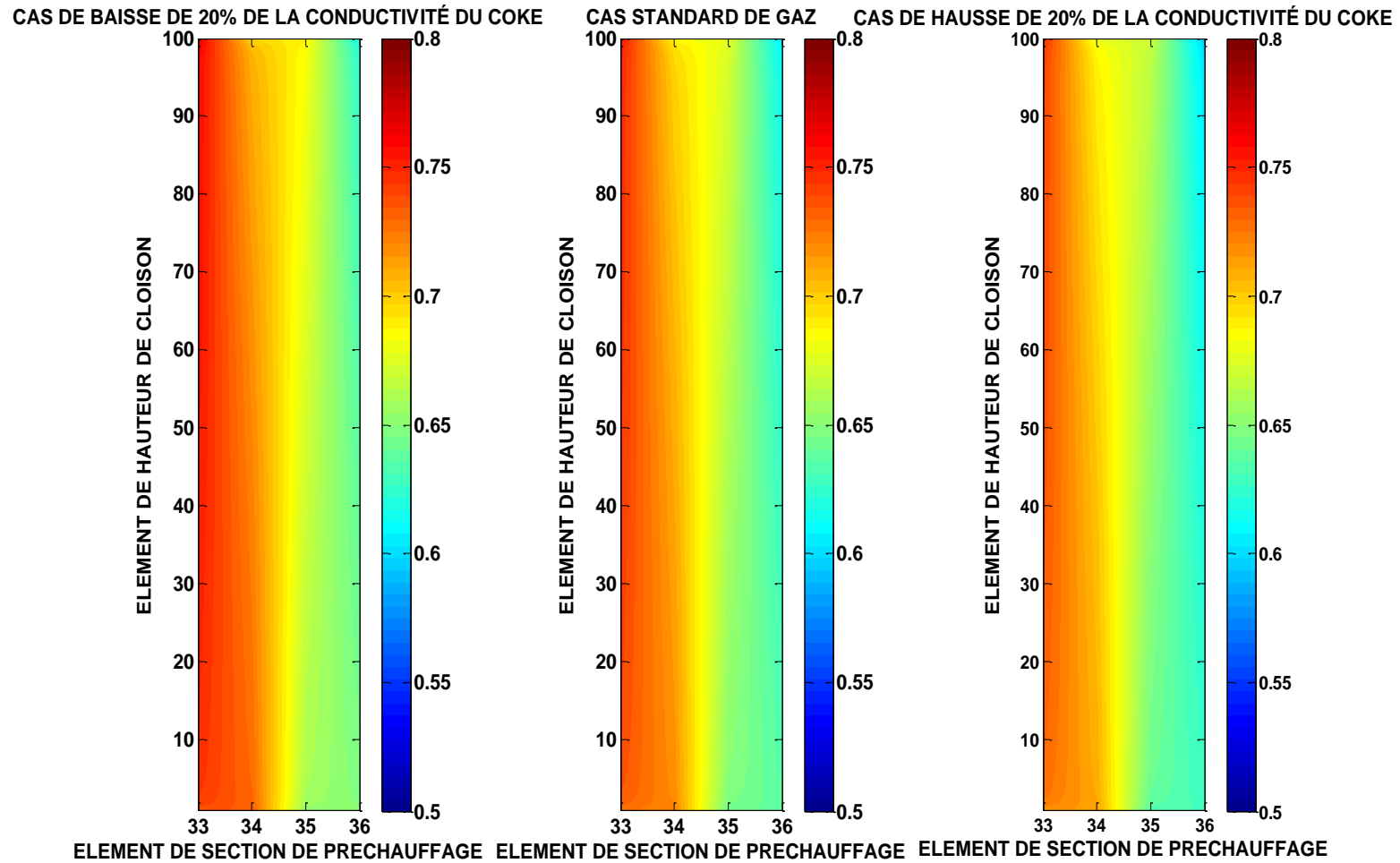


Figure 4-43 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température dans les gaz pour la zone de préchauffage

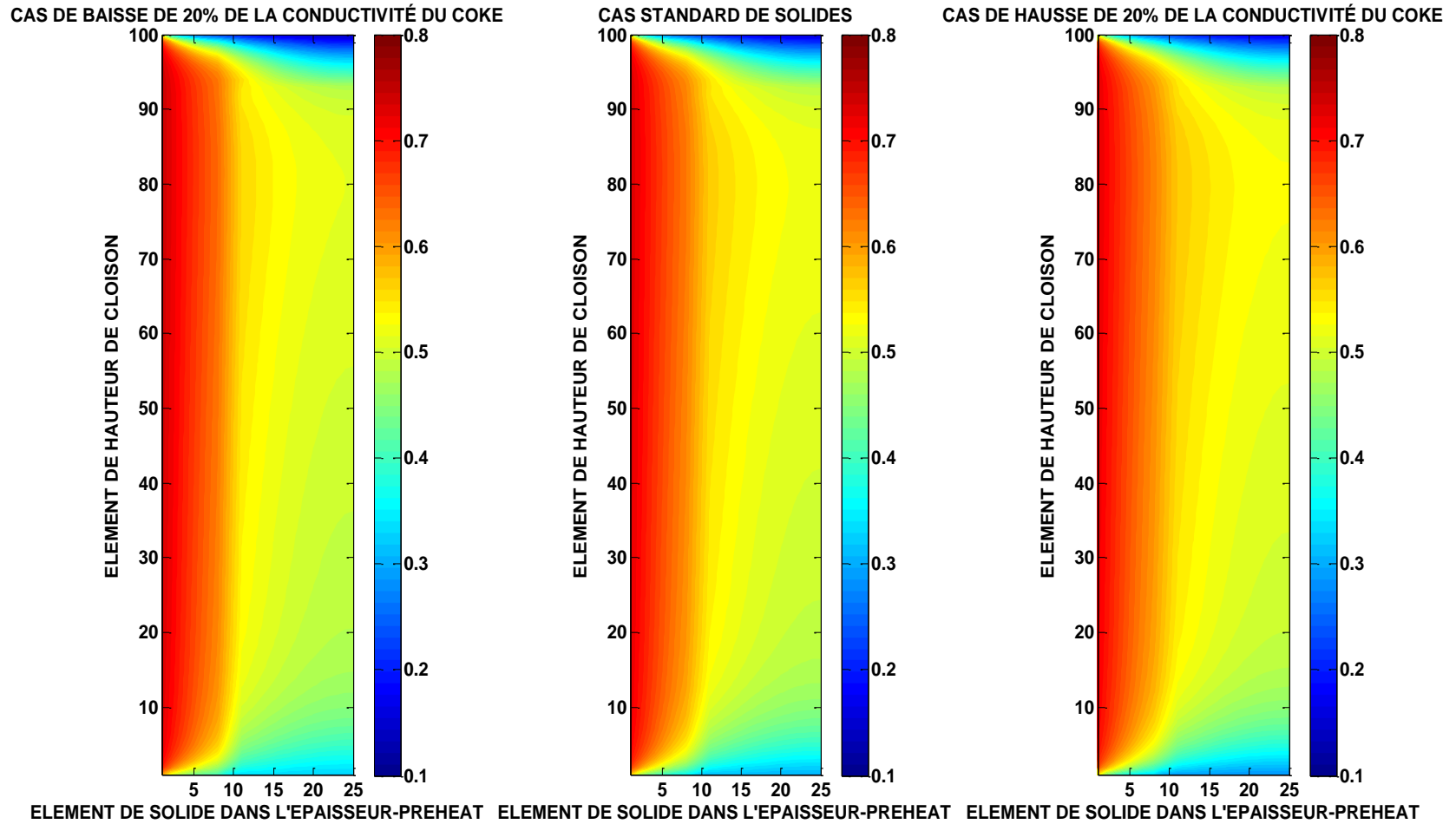


Figure 4-44 : Effet de la conductivité thermique du coke de remplissage sur la distribution de température des solides pour la zone de préchauffage

Chapitre 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5-1. Conclusions

La modélisation mathématique des fours de cuisson d'anodes a permis d'explorer plusieurs aspects du procédé de cuisson des anodes dans ces enceintes. Notamment des aspects faisant intervenir les contraintes liées au procédé de cuisson des anodes en lui-même. On pourrait nommer les contraintes énergétiques de cuisson des anodes comme les quantités de carburants et de matières volatiles combustibles qui interagissent durant la cuisson. Certaines contraintes géométriques qui se rattachent plus aux caractéristiques des fours de cuisson d'anodes dans lesquelles ces anodes seront cuites. On parle de dimensions des cloisons, des caractéristiques thermiques des matériaux tels que les briques réfractaires et le coke de remplissage. Des différentes compréhensions, explications, en somme, des interprétations qui découlent de cette analyse de la performance des fours horizontaux de cuisson d'anodes, plusieurs conclusions ont été formulées pour l'amélioration du procédé.

Ce nouveau modèle de procédé a été basé sur la méthode d'approximation de la solution de l'équation de chaleur dans les solides par des différences finis en 2D. Le sous-modèle de conduction développé a été couplé au sous-modèle des gaz. Un écoulement de gaz de 2D a été considéré dans la cloison, ce qui correspond à une représentation réaliste de cet écoulement. De plus, grâce à cette représentation de l'écoulement, la solution des équations en 2D des solides est réalisée en utilisant une distribution de température de 2D à la surface de briques comparé à une seule température de surface utilisée dans d'autres modèles de procédé basés sur un écoulement

de 1D. Donc, cette approche a permis l'utilisation des conditions aux limites plus rigoureuses pour le modèle de solides.

L'étude de l'effet des contraintes énergétiques de cuisson des anodes avec les variations de débit de carburant injecté au procédé et les quantités de matières volatiles a été enrichissante. Certes, la réaliser par modélisation est économiquement rentable. Cette étude a démontré que l'augmentation des composants qui augmentent le dégagement de chaleur par combustion augmente les températures des gaz et des solides comme prévu.

Aussi, l'étude de l'effet de la géométrie des cloisons sur la cuisson des anodes a révélé que le diamètre hydraulique de la cloison influence la distribution de la température dans les cloisons. Ainsi, opérer en un four qui possède des dimensions différentes ; comme la largeur des cloisons plus large que celle répertoriée en des conditions standard conduit à un échange thermique légèrement réduit dans la zone de refroidissement, mais à une légère augmentation de transfert de chaleur dans les zones de chauffage et préchauffage.

Au terme de notre étude de la performance des fours de cuisson d'anodes à l'aide du modèle dynamique de procédé développé, nous pouvons dire que les connaissances ont été approfondies sur les fours de cuisson d'anodes, principalement, sur le procédé de cuisson des anodes réalisé en industrie.

Dans les solides, on constate aussi que les pertes de chaleurs et la non-homogénéité du milieu influencent la distribution de températures. Cette non-homogénéité du milieu est due aux couches successives de brique, de coke et du bloc d'anodes qui constitue le milieu solide.

Ce travail présente également une originalité en raison du développement d'un modèle de procédé qu'on pourrait appeler « modèle de four de cuisson des anodes offrant la possibilité de

visualiser une distribution de la température dans les solides en 3D ». Grâce au modèle de procédé développé, des tests d'évaluation du comportement du four ont dès lors pu être effectués aisément. En effet, les résultats fournis par l'étude paramétrique sont en accord avec ceux tirés de la littérature.

5-2. Recommandations

L'étude qui a été réalisée fut inspirée par des résultats de travaux de recherches. De même, les conclusions et les aspects de la cuisson des anodes explorées dévoilent des ouvertures qui pourraient donner naissance à d'autres travaux. Aussi, certains aspects de l'amélioration du modèle n'ont pas pu être étudiés à cause du manque de données sur le contrôle de procédé du four réel. Des travaux d'amélioration du modèle pourraient être réalisés ultérieurement. Une suite pourrait être donnée à ce travail par le développement d'un modèle plus élaboré qui comprendrait les particularités suivantes :

- Un sous-programme qui incorporera le calcul automatique du phénomène d'infiltration par les ouvreaux. En effet, l'infiltration de l'air provient de la diffusion de l'air atmosphérique vers un milieu en dépression.
- Un sous-programme qui incorporera le calcul automatique du dégagement de volatiles par détermination de la cinétique de dégagement des volatiles des anodes actuellement utilisées.
- Un sous-programme pour l'ajustement du débit de carburant injecté durant la cuisson pourrait également être incorporé. Il est vrai que les informations sur le principe de contrôle du procédé réel ne sont pas disponibles, cependant le contrôle doit se faire en tenant compte du niveau énergétique.

REFERENCES

1. Institut sur l'histoire de l'aluminium. *Aluminium chimique*. 2016 [Access to the 2016 13 janvier 2016]; Available from: <http://www.histalu.org/iha-theme-article.php?rub=4&srub=5&art=29&id=0>.
2. R. Lesclous *Comprendre l'aluminium primaire- réalités méconues*. Les annales des mines, Gérer et Comprendre, No.78, (Décembre 2004). p. 71-92.
3. F. Keller, and P.O. Sulger, *Anode baking: Baking of anodes for the aluminium industry*, R & D Carbon, Sierre, Suisse, éditions (2008 et 2009).
4. H. Kvande, *3 - production of primary aluminium*, Woodhead Publishing, (2011).
5. H. Xiao, R. Hovland, S. Rolseth, and J. Thonstad, "Studies on the corrosion and the behavior of inert anodes in aluminum electrolysis," *Metallurgical and Materials Transactions B*. 27(2) (1996), p. 185-193.
6. Z. Kuang, J. Thonstad, and M. Sørli, "Effects of additives on the electrolytic consumption of carbon anodes in aluminium electrolysis," *Carbon*. 33(10) (1995), p. 1479-1484.
7. J. Thonstad, and E. Olsen, "Cell operation and metal purity challenges for the use of inert anodes," *JOM*. 53(5) (2001), p. 36-38.
8. H. Lu, K. Fang, Y. Hong, B. Gao, and Z. Qiu, "A new electrolytic aluminum production process," *Aluminium*. 75(12) (1999), p. 1113-1118.
9. K.L. Hulse, *Anode manufacture : Raw materials, formulation and processing parameters* R & D Carbon Ltd. Sierre, Suisse (2000).
10. J. Hurlen, and T. Naterstad, "Recent developments in carbon baking technology," *Jom-Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 43(11) (1991), p. 20-25.
11. M. Baiteche. "Développement d'un modèle transitoire en 3d du four horizontal de cuisson d'anodes en carbone," Thèse, Université du Québec à Chicoutimi, (2015).
12. H. Martirena, and J. Marletto, "Thermal phenomena in anode baking furnaces," *Journal of Metals*. 31(12) (1979), p. 138-138.
13. I. Holden, F. Heinke, F. Aune, and L.F. Lossius, "New process control system applied on a closed baking furnace," *Light Metals*, (2006), p.603-608.
14. I. Grinberg, F. Hachez-Leroy, and J. Plateau, *L'aluminium : Un si léger métal*, Paris: Gallimard, (2003), 127 p
15. Aluminerie Alouette. *Cycle de l'aluminium: Notre production*. (Access to 27 Septembre 2014); Available from: <http://www.alouette.com/notre-production/cycle-de-laluminium>
16. Société des sciences médicales et naturelles de Bruxelles, *Journal de medecine de chirurgie et de pharmacologie*, D.-M. MM. Dieudonné, et al., Editors. 1853. p. 631.
17. P. Morel, I. Grinberg, and A. Allier, *Histoire technique de la production d'aluminium : Les apports français au développement international d'une industrie*, Grenoble (France) , Grenoble: Presses universitaires de Grenoble, (1991), 351 p
18. H. Sainte-Claire Deville, *De l'aluminium: Ses propriétés, sa fabrication et ses applications*, Paris: Mallet-Bachelier (1859).
19. M. Adolphe, *L'aluminium, fabrication, emplois, alliages*, Paris (1891).
20. Toussaint Paul, *Historique, de l'origine à 1921, des sociétés mères de la compagnie Alais, Froges et Camargue*. Archives Pechiney (1921).

21. Association de l'Aluminium du Canada. *Son histoire - l'aluminium - association de l'aluminium du Canada*. 2016 [Access to the 2016 20/07/2016]; Available from: <https://aluminium.ca/fr/aluminium/histoire>.
22. L. Dion, L. Kiss, P. Chartrand, and P. Coursol, *Development of a dynamic mass balance for predicting metal purity at aluminerie alouette*, in *8th international conference on mechanical engineering*. Budapest (2012).
23. G. Gibbs, and F. Labrèche, *Cancer risks in aluminum reduction plant workers a review*, Vol. 56 Suppl 5S. (2014), S40-S59.
24. Association EAA Nordheim, *European aluminium*, in *Aluminium Expert Group Meeting*. Minutes from IPPC BREF Notes: Brussels (1998).
25. D. Kocaeffe, A. Charette, and L. Castonguay, Green coke pyrolysis: Investigation of simultaneous changes in gas and solid phases,” *Fuel*. 74(6) (1995), p. 791-799.
26. D. Kocaeffe, A. Charette, J. Ferland, and P. Couderc, “Kinetic study of pyrolysis in pitch impregnated electrodes,” *Can. J. Chem. Eng.* 68 (1990), p. 988-996.
27. D. Kocaeffe, Y. Xie, Y. Kocaeffe, L. Wei, S. Zou, and A. Wu, “Thermogravimetric study on devolatilization kinetics of chinalco anodes during baking,” *Journal of Materials Science Research*, 2(2), 22-24 (2013).
28. B. Samanos, and C. Dreyer, *Impact of coke calcination level and anode baking temperature on anode properties*, *Light metals* (2001), p.101-108.
29. F. Tremblay, and A. Charette, “Kinetics of the release of volatile substances during the pyrolysis of industrial carbon electrodes,” *Canadian Journal of Chemical Engineering*. 66(1) (1988), p. 86-96.
30. M. Jarry, “Élaboration des anodes précuites en carbone aggloméré pour l'industrie de l'aluminium”, Impr. Salomon, (1977),,
31. E.H. Hardin, and B.C. L., , “Correlations of laboratory and commercially calcined petroleum coke properties”, *Light Metals* (1991), p. 565-574.
32. E. Heintz. *Crystallite growth and ordering of cokes in the pre-graphitization temperature range*. in *Proc. 5th London International Carbon and Graphite Conference, Society of Chemical Industry*, vol ii, (1978), p. 575-587.
33. E.E. Hardin, P.J. Ellis, C.L. Beilharz, and L. McCoy, A comprehensive review of the effects of calcination at various temperatures on coke structure and properties part ii , *Light Metals* (2016), p. 571-581.
34. R.M. Garbarino, and R.T. Tonti, Desulfurization and its effect on calcined coke properties, *Light Metals* (1993), p. 517-520..
35. W.K. Fischer, and R. Perruchoud, “Influence of coke calcining parameters on petroleum coke quality,” *Light Metals* (1985), p. 811-826.
36. E. Barrillon, “Evolution thermique de la texture poreuse des cokes de pétrole,” *Carbon*. 5(2) (1967), p. 167-171..
37. E. Barrillon, “N° 24.—modifications de la texture de cokes de pétrole lors d'une désulfuration thermique,” *Journal de Chimie Physique*. 65 (1968), p. 428-432.
38. A. Bopp, G. Groff, and B. Howard, “Influence of maximum temperature and heat soak times on the properties of calcined coke,” *Light Metals 1984*, (1984), p. 869-882.
39. S. Brandtzaeg, and H. Oye, “High temperature calcination of anthracite, petrol coke and pitch coke,” *Light Metals* (1985), p. 839-852.
40. A. Slagtern, K. Grjotheim, T. Foosnaes, and T. Naterstad, “Thermal expansion of carbon materials calcined at various temperatures: Structure, pore volume and content of impurities,” *Light Metals 1987*, (1987), p. 449-457.

41. R. Gehlbach, and L. Grindstaff. *Effect of calcination temperature on real density of high sulfur coke*. in *JOM-Journal of Metals*, 28(12) (1976). p. A31.
42. C. Dreyer, B. Samanos, and F. Vogt, "Coke calcination levels and aluminum anode quality", *Light Metals* (1996), p. 535-542.
43. W. Leisenberg. Improving the anode baking process by estimation of the anode temperature" *Light Metals* (2001). p.637-641.
44. A. Al Marzouqi, T.K. Sahu, and S.A. Rabba, "Baking furnace optimisation", *Light Metals* (2008), p. 913-917.
45. D S. Severo, V. Gusberti, P.O. Sulger, F. Keller, and M.W. Meier. *Recent developments in anode baking furnace design*. *Light metals* (2011), p. 853-858.
46. D. Dequier, *Maurienne : Le vallée de l'aluminium* (Les Marches: Les Marches: La Fontaine des Savoisiennes Siloé (1992)
47. Eurométaux, *10_processes to produce carbon and graphite electrodes, cathodes and shapes*. 2016 [Access to the 2016 31 Juillet 2016]; Available from: http://www.eurometaux.eu/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=7156&PortalId=0&TabId=57
48. S. Group. *Closed type ring pit furnace*. 2017 [Access to 12 novembre 2017]; Available from: http://www.sacmi.com/System/00/00/95/9566/634124540174217500_1enUS.png.
49. S. group. *opened type ring pit furnace*. 2017 [Access to the 2017 12 novembre 2017]; Available from: http://www.sacmi.com/System/00/00/95/9566/634124540174217500_1enUS.png.
50. F. Gregoire, L. Gosselin, and H. Alamdari *Combustion in anode baking furnaces: Comparison of two modeling approaches to predict variability*, Proceedings of Combustion Institute - Canadian Section - 2013 Spring Technical Meeting, Québec City, Québec, Canada, 13-16 mai (2013), p.338-343..
51. A. Charette, Y. Kocafe, D. Kocafe, "Le carbone dans l'industrie d'aluminium," Les presses de l'aluminium Prall, (2012)
52. O. Jakobsen, O. Lid, P.A. Schneider, and O. Stenso, "New ring furnace concept: Design and operation," *Light Metals* (1987), p. 497-503.
53. D. S. Severo, and V. Gusberti, "User-friendly software for simulation of anode baking furnaces", *AustralAsian Conference* (2011).
54. F. Keller, and S. Oderbolz, "Process controlled operation of baking furnaces," *Light Metals* (1985), p. 1107-1123.
55. M. Fernandez, J. Marletto, and H. Martirena, "Combined mathematical simulation and experimental studies on a closed baking furnace," *Journal of Metals*. 35(12) (1982), p. A79-A79
56. A. Furman, and H. Martirena, "A mathematical model simulating an anode baking furnace," *Light Metals* (1980), p. 515-522.
57. E.D.F. Monica, J. Marletto, and H. Martirena, "Combined mathematical simulation and experience studies on a closed baking furnace," *Light Metals* (1983), p. 805-819.
58. F. Keller, and J.H.F. Disselhorst, "Modern anode furnace bake development," *Light Metals* (1981), p. 611-621.
59. R. . Bui, A. Charette, and T. Bourgeois, "Simulating the process of carbon anode baking used in the aluminum industry," *Metallurgical Transactions B*. 15(3) (1984), p. 487-492.
60. T. Bourgeois, R. Bui, A. Charette, B.A. Salder, and A.D. Tomsett, "Computer simulation of a vertical ring furnace," *Light Metals* (1990), p. 547-552

61. M. A. Thibault, R.T. Bui, A. Charette, and E. Dervedde, *Simulating the dynamics of the anode baking ring furnace* *Light Metals* (1985), 1141-1151.
62. N. Oumarou, Y. Kocaeffe, D. Kocaeffe, B. Morais, and J. Lafrance, *A dynamic process model for predicting the performance of horizontal anode baking furnaces*, *Light Metals* (2015), p. 1081-1086.
63. Y. Kocaeffe, N. Oumarou, M. Baiteche, D. Kocaeffe, B. Morais, and M. Gagnon. *Use of mathematical modelling to study the behavior of a horizontal anode baking furnace*, *Light Metals* (2013), p. 1139-1144.
64. Y. Kocaeffe, M. Baiteche, N. Oumarou, D. Kocaeffe, and B. Morais. *Different mathematical modelling approaches to predict the horizontal anode baking furnace performance. AustralAsian conference*, Dubai (2013).
65. Y S. Kocaeffe, E. Dervedde, D. Kocaeffe, R. Ouellet, Q. Jiao, and W.F. Crowell. " *A 3d mathematical model for the horizontal anode baking furnace*", *Light Metals* (1996), p. 529-534.
66. D.S. Severo, V. Gusberti, and E.C.V. Pinto. *Advanced 3D modelling for anode baking furnaces*, *Light Metals*. (2005), p. 697-702.
67. Y. Kocaeffe. M. Baiteche, D. Kocaeffe, B. Morais, M. Gagnon, *Un modèle mathématique en 3d pour l'analyse de conception d'un four horizontal de cuisson d'anodes*. 81e du Congrès de l'Acfas: Préparation et propriétés de matériaux inorganiques et de carbone - communication oral: Québec, (Mai 2013).
68. M. Baiteche, D. Kocaeffe, Y. Kocaeffe, D. Marceau, B. Morais, and J. Lafrance, *Description and applications of a 3D mathematical model for horizontal anode baking furnaces*, *Light Metals* (2015), p. 1115-1120.
69. F. Keller, and W. Venus, "Modern anode bake furnace developments," *Journal of Metals*. 32(12) (1980), p. 83-83
70. R T. Bui, A. Charette, T. Bourgeois, E. Dervedde, "Performance analysis of the ring furnace used for baking industrial carbon electrodes," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 65(1) (1987), p. 96-101.
71. R T. Bui, S. Peter, A. Charette, A.D. Tomsett, and V. Potocnik, "Modelling of heat transfert and gas flow in the vertical flue anode baking furnace," *Light Metals* (1995), p. 663-679.
72. R T. Bui, E. Dervedde, A. Charette, and T. Bourgeois, *Mathematical simulation of a horizontal flue ring furnace*, *Light Metals* (1984), p.1033-1040.
73. A. Charette, R.T. Bui, and T. Bourgeois, "Modeling the heat transfer in a ring furnace," *IEEE Transactions on Industry Applications*. IA-20(4) (1984), p. 902-907.
74. J. Bigot, M. Gendre, Rotger, and Jean-Christophe, "Fuel consumption: A key parameter in anode baking furnaces," *Light Metals* (2007) p. 965-968.
75. D. Beach, R. Coetzee, M. Lyle, D. Fantin, H. Gay, and P. Mahieu, "Proven control philosophy and operation for anode baking process," *Light Metals* (2007), p. 953-957.
76. F. Keller, O.S. Peter, M.W. Meier, D.S. Severo, and V. Gusberti, "Specific energy consumption in anode bake furnaces," *Lights metals* (2010), p. 408-413.
77. E. Dervedde, T. Bourgeois , R.T. Bui, and A. Charette, "The leakage of air in horizontal flue ring furnaces," *Light Metals* (1987), p. 591-595.
78. M.-A. Thibault, *Modèle dynamique du four de cuisson d'anodes* , *Mémoire*, Université du Québec à Chicoutimi Chicoutimi (1984).

79. D. Maiwald, D. Di Lisa, and H.P. Mnikoleiski, "Full control of pitch burn during baking: Its impact on anode quality, operational safety, maintenance and operational costs" *Light Metals* (2011), p. 875-880.
80. M. Jacobsen, and M.C. Melaaen, "Numerical simulation of the baking of porous anode carbon in a vertical flue ring furnace," *Numerical Heat Transfer: Part A -- Applications*. 34(6) (1998), p. 571-598.
81. M. Jacobsen, and M.C. Melaaen, "Heat and mass transfert in porous materials during baking," *Light Metals* (1995), p.681-690.
82. D. Maiwald, and W. Leisenberg, *Flue condition index - a new challenge to increase flue lifetime, operational safety and fuel efficiency in open pit anode baking furnaces Light Metals* (2006). p. 553-560.
83. R. T. Bui, and R. Ouellet, "Optimal control of an aluminum casting furnace: Part ii. Fuel optimization," *Metallurgical Transactions B*. 21(3) (1990), p. 495-500.
84. M W. Meier, and R. Carbon. "Cracking behaviour of anodes," R & D Carbon , Sierre, Swiss (1996).
85. H. Spang, "A dynamic model of a cement kiln," *Automatica*. 8(3) (1972), p. 309-323.
86. R. G.E. Franks, and D.N. Miller, "Computed temperature-time excursions at succeeding locations in an industrial reactor," *Simulation*. 32(4) (1979), p. 123-132.
87. F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfert, John Wiley and Sons, New York, 4ième Éditions* (1996).
88. P. Palavar, T.K. Sahu, A.A. Marzouqi, S.A. Rabba, G.N. Priyantha, and T. Aiyaz, *Baking furnace rebuild strategy at dubal to improve productivity* (John Wiley & Sons, Inc., 2015).
89. F. Keller, P.O. Sulger, and W.K. Fischer, "Anode baking: The underestimated human aspect," *Light Metals* (2013), p.403-407.