

# Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR : Sciences et Technologies

Département de physique

**Mémoire de Master**

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux

---

## Simulation numérique d'un four vertical conçu pour la fabrication du clinker

---

Présenté par :

**Mamadou NDONG**

Sous la direction de :

**Pr Joseph Sambasene DIATTA**

Soutenu publiquement le 30/07/2024

**Composition du jury :**

	<b>Prénom(s)</b>	<b>Nom</b>	<b>Grades</b>	<b>Établissement</b>
<i>Président</i>	Lat Grand	NDIAYE	Professeur Titulaire	UASZ
<i>Rapporteur</i>	Serigne	THIAO	Maître Assistant	UASZ
<i>Examineurs</i>	Ansoumane	DIEDHIOU	Maître Assistant	UASZ
	Modou	TINE	Assistant	UASZ
<i>Directeur de Mémoire</i>	Joseph Sambasene	DIATTA	Maître de Conférences	UASZ

# Dédicaces

Je dédie ce travail

à ma grand-mère Adja Amy SY

à ma maman feu Marie DIALLO

à mon papa Samba NDONG

à mon oncle Elias DIALLO

à mon oncle feu Magatte DIALLO

et à tous ceux qui m'ont soutenu et épaulé

# Remerciements

Tout d'abord, je rend grâce à Allah, le Tout puissant de m'avoir donné la santé, le courage et la force de pouvoir réaliser ce travail de recherche.

Je remercie chaleureusement mon encadreur Monsieur Joseph Sambasene DIATTA d'avoir dirigé ce mémoire.

J'exprime toute ma gratitude envers Messieurs Lat Grand NDIAYE, Serigne THIAO, An-soumane DIEDHIOU, Modou TINE d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier les docteurs et doctorant(e)s du département de Physique qui m'ont encouragé et apporté leurs conseils.

Je remercie mes camarades de promotion Arouna TRAORE, Baboucar FICKOU, Malayni NDIAYE, Aliou THIAO, Mouhamed Adama DIALLO, Raoul SYLVA, Ousmane BA pour les moments passés ensemble. Un grand big up à mes amis colocataires à Diabir.

J'exprime toute ma reconnaissance envers ma grand-mère Adja Amy SY pour m'avoir éduqué et soutenu. Qu'Allah vous prête une longue vie avec beaucoup de santé.

Je remercie aussi mon papa Samba NDONG pour tout son soutien et ses sacrifices.

Je voudrais remercier mon oncle Elias DIALLO pour avoir financé mes études depuis l'élémentaire. Merci pour tout ce que vous avez fait à mon égard.

Mention spéciale à mes tantes Fatou DIALLO et Anna DIALLO. Grâce à vous j'ai pas senti la perte d'une maman.

Je tiens à remercier toute la famille DIALLO, mes oncles, mes tantes, mon frère Moustapha, mes soeurs, mes cousins et cousines.

Mes remerciements vont à la famille SAGNA pour m'avoir accueillie à Ziguinchor.

Enfin, j'espère que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin dans la réussite de ce travail, trouveront ici l'expression de ma reconnaissance.

# Résumé

Dans cette étude, un four vertical conçu pour la production du clinker, principal composant du ciment Portland, a été évalué numériquement grâce au logiciel COMSOL Multiphysics. Elle a permis de résoudre l'équation de la chaleur, couplée à celles du mouvement des fluides et du transport des espèces. En plus du soufflage d'air, le système comporte un autre fluide (gaz) qui est le propane et qui est considéré comme un Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL). Ce dernier a permis d'augmenter la cinétique de chauffage du procédé de combustion en élevant la température. La réaction chimique lors de la combustion du gaz a été prise en compte et modélisée. Les distributions spatiales et temporelles de la température, de la vitesse ainsi que de la pression ont été calculées numériquement dans l'enceinte du four vertical. Les résultats obtenus numériquement sont très encourageants et en parfait accord avec ceux de la littérature.

## **Mots clés :**

Clinker, COMSOL Multiphysics, Four vertical, Simulation numérique, Température

# Abstract

In this study, a vertical kiln designed for the production of clinker, the main component of Portland cement, was numerically evaluated using COMSOL Multiphysics software. It made it possible to solve the heat equation, coupled with those of the movement of fluids and species transport. In addition to air blowing, the system includes another fluid (gas) which is propane and which is considered a Liquefied Petroleum Gas (LPG). The latter made it possible to increase the heating kinetics of the combustion process by raising the temperature. The chemical reaction during gas combustion was taken into account and modelled. The spatial and temporal distribution of temperature, velocity and pressure were calculated numerically in the vertical kiln enclosure. The results obtained numerically are very encouraging and in perfect agreement compared to those in the literature.

**Keywords :**

Clinker, COMSOL Multiphysics, Numerical simulation, Static shaft kiln, Temperature

# Table des matières

<b>Dédicaces</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Table des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>x</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Généralités</b>	<b>2</b>
Introduction . . . . .	2
1.1 Le clinker . . . . .	2
1.2 Les différents types de fours . . . . .	3
1.2.1 Les fours verticaux . . . . .	3
1.2.2 Les fours rotatifs . . . . .	4
1.3 La combustion . . . . .	5
1.3.1 Combustion laminaire . . . . .	6
1.3.2 Combustion turbulente . . . . .	6
1.4 Le charbon . . . . .	6
1.5 Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) . . . . .	7
Conclusion . . . . .	8
<b>2 Matériels et méthodes</b>	<b>9</b>
Introduction . . . . .	9
2.1 Introduction à COMSOL Multiphysics . . . . .	9
2.1.1 Présentation du logiciel . . . . .	9

2.1.2	Les étapes de la simulation . . . . .	10
2.2	Modélisation mathématique . . . . .	11
2.2.1	Géométrie du four . . . . .	11
2.2.2	Couplage des équations aux dérivées partielles modélisant la distribution de la chaleur dans le four en régime temporel . . . . .	13
2.2.2.1	Transfert de chaleur . . . . .	13
2.2.2.2	Ecoulement . . . . .	14
2.2.3	Modélisation de la combustion du propane en régime stationnaire . . . . .	16
2.2.3.1	Transport des espèces . . . . .	16
2.2.3.2	Taux de réaction turbulente . . . . .	17
2.2.3.3	Enthalpie . . . . .	17
2.2.3.4	Capacité thermique . . . . .	18
2.2.4	Propriétés physiques des matériaux . . . . .	18
2.2.5	Choix du Maillage . . . . .	19
	Conclusion . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>21</b>
	Introduction . . . . .	21
3.1	Paramétrage du solveur temporel . . . . .	21
3.2	Validation du modèle numérique . . . . .	21
3.3	Variations temporelles et spatiales de la température, de la vitesse et de la pression dans le four . . . . .	23
3.3.1	Distribution de la température . . . . .	23
3.3.2	Distribution de la vitesse . . . . .	26
3.3.3	Distribution de la pression . . . . .	26
3.4	Effet du débit d'air dans l'évolution de la température, de la vitesse et de la pression dans le four . . . . .	27
3.4.1	Modèle sans GPL . . . . .	28
3.4.2	Modèle avec GPL . . . . .	30
	Conclusion . . . . .	32
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>33</b>

# Table des figures

1.1	Photo du four montrant les nodules de clinker . . . . .	3
1.2	Four vertical ou four droit à chaux chemisé intérieurement avec un matériau réfractaire [5] . . . . .	4
1.3	Four rotatif ou four tournant avec un diamètre interne de 4,096 m et une longueur de 16 m [6] . . . . .	5
1.4	Schéma de réalisation d'une combustion ou Triangle du feu [8] . . . . .	5
1.5	Formation et évolution du charbon (houillification) [10] . . . . .	7
2.1	Interface graphique du logiciel COMSOL Multiphysics . . . . .	10
2.2	Représentation géométrique des outils et équipements du four . . . . .	12
2.3	Photo du four avec des nodules de clinker obtenus à la fin du cycle de cuisson	12
2.4	Maillage du four avec des éléments triangulaires . . . . .	19
3.1	Comparaison de la température axiale pour le charbon avec celle du modèle de Adam et al [2] . . . . .	22
3.2	Géométrie de la chambre de combustion du modèle de Adam et al [2] . . .	23
3.3	Distribution de la température dans le four pour la combustion sans le GPL à $t = 24h$ . . . . .	24
3.4	Distribution de la température le long de l'axe central du four en fonction du temps pour la combustion sans le GPL . . . . .	25
3.5	Distribution de la température dans le four pour la combustion avec le GPL	25
3.6	Distribution de la vitesse du fluide dans le four : (a) sans GPL (b) avec GPL	26
3.7	Distribution de la pression dans le four : (a) sans GPL, (b) avec GPL . . .	27
3.8	Effet du débit d'air dans l'évolution de la Température dans le four selon le modèle sans GPL . . . . .	28
3.9	Effet du débit d'air dans l'évolution de la Vitesse dans le four selon le modèle sans GPL . . . . .	29
3.10	Effet du débit d'air dans l'évolution de la Pression dans le four selon le modèle sans GPL . . . . .	29
3.11	Effet du débit d'air dans l'évolution de la Température dans le four selon le modèle avec GPL . . . . .	30

3.12 Effet du débit d'air dans l'évolution de la Vitesse dans le four selon le modèle avec GPL . . . . .	31
3.13 Effet du débit d'air dans l'évolution de la Pression dans le four selon le modèle avec GPL . . . . .	31

# Liste des tableaux

2.1	Enthalpie de formation et capacité calorifique des espèces . . . . .	18
2.2	Propriétés physiques des matériaux . . . . .	19

# Nomenclature

## *Symboles*

$C_p$	Capacité calorifique à pression constante	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
$d$	Diamètre du gicleur	$m$
$D_i^f$	Coefficient de diffusion	$m^2.s^{-1}$
$D_i^T$	Coefficient de diffusion thermique	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
$F$	Résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide	$m.s^{-2}$
$\Delta H_r$	Chaleur de réaction	$J.kg^{-1}$
$I$	Humidité	$\%$
$j_i$	Flux de matière	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
$k$	Energie cinétique turbulente	$m^2.s^{-2}$
$k_B$	Constante de Boltzmann	$m^2.kg.s^{-1}k^{-1}$
$M_i$	Masse molaire de l'espèce i	$kg.m^{-3}$
$M_n$	Masse molaire du mélange	$kg.m^{-3}$
$N$	Nombre de particules	-
$p$	Pression	Pa
$Q$	Source de chaleur	W
$Re$	Nombre de Reynolds	-
$R_i$	Taux de production de l'espèce i	$kg.m^{-3}.s^{-1}$
$T$	Température	K
$T_{amb}$	Température ambiante	K
$t$	Temps	s
$u$	Vitesse de l'écoulement du fluide	$m.s^{-1}$
$V_0$	Débit d'entrée des fluides	$m^3.s$
$V$	Volume du gaz	$m^3$
$w_i$	Fraction massique de l'espèce i	$\%$
$x_i$	Fraction molaire de l'espèce i	$\%$

***Lettres grecques***

$\varepsilon$	Taux de dissipation turbulente	$\text{m}^2.\text{s}^{-3}$
$\kappa$	Conductivité thermique	$\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\mu$	Viscosité dynamique	$\text{Pa}.\text{s}$
$\mu_T$	Viscosité dynamique turbulente	$\text{Pa}.\text{s}$
$\nu$	Coefficients stœchiométriques	-
$\nu_c$	Viscosité cinématique	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$\tau_T$	Echelle de temps de mélange de la turbulence	s

***Indices***

i	espèce
j	réaction
r	réactif
p	produit

# Introduction générale

Certains entrepreneurs des communautés rurales d'Afrique australe dotées de minerais valorisent et commercialisent leur produit local. Le carbonate mélangé à l'argile et à la poussière de charbon, chauffé à 1450 °C, produit du clinker qui, mélangé de manière appropriée avec du gypse, génère le ciment Portland. Ce matériau de construction est le plus utilisé dans le monde. Les résultats de la littérature montrent également que la production du ciment, malgré une forte croissance, est très énergivore [1] et génère des émissions de carbone très élevées.

Cette étude évalue numériquement les hétérogénéités de température dans un four statique, conçu et construit pour la production à petite échelle du clinker Portland. La conception innovante, qui consiste à charger l'arbre du four en couches, inclut l'amélioration de l'allumage par l'ajout de Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) et le soufflage d'air. COMSOL Multiphysics, un logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis, est utilisé pour réaliser cette étude numérique. C'est la raison pour laquelle un modèle 2D a été développé. L'équation de la chaleur, couplée à celle du mouvement des fluides (air et gaz GPL) et du transport des espèces, a permis d'évaluer la distribution de la température mais également de la vitesse des fluides et de la pression dans l'ensemble du système. En effet, des thermocouples placés à l'intérieur du four permettent de connaître l'évolution de la température. Les résultats de la simulation sont très encourageants et proches de ceux de la littérature [2].

L'objectif principal de ce travail est de concevoir un modèle numérique capable de simuler et de prédire le fonctionnement du four vertical. Les résultats numériques obtenus seront validés en les comparant avec ceux de la littérature.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Dans le chapitre 1, une étude bibliographique sur le clinker, les modèles de fours existants dans l'industrie de la cimenterie, sur la combustion, sur le charbon et le gaz GPL a été réalisé.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation du logiciel COMSOL Multiphysics et à la modélisation mathématique.

Dans le chapitre 3, les résultats seront décrits et analysés.

Enfin, la dernière partie est réservée à la conclusion et aux perspectives.

# Chapitre 1

## Généralités

### Introduction

Le clinker est un matériau hydraulique obtenu à la sortie des fours à la suite de la calcination des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction [3]. Le clinker est ensuite broyé puis mélangé avec d'éventuels constituants (gypse, fillers, laitiers, pouzzolanes ...) pour donner le ciment Portland. Dans l'industrie de la cimenterie, il existe plusieurs types de fours parmi lesquelles, on peut citer les fours verticaux ou fours droits et les fours rotatifs ou fours tournants.

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur le clinker sera effectuée avec un accent particulier sur sa composition physico-chimique. Une description des modèles de fours utilisés dans l'industrie de la cimenterie sera aussi faite. Il sera également question de rappeler quelques notions sur le procédé de combustion avant de terminer avec le charbon et le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié), combustibles utilisés dans ce travail.

### 1.1 Le clinker

Le clinker se présente sous la forme de petits nodules (figure 1.1) très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes [3] :

- silicate tricalcique également dénommé « alite »,  $C_3S$ , dont la formule est  $3CaO, SiO_2$
- silicate bicalcique ou « bélite »,  $C_2S$ , de formule  $2CaO, SiO_2$
- aluminat tricalcique  $C_3A$ , de formule  $3CaO, Al_2O_3$
- alumino-ferrite tétracalcique  $C_4AF$ , de formule  $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases sont de :

- 50 à 70 % pour le  $C_3S$
- 5 à 25 % pour le  $C_2S$

- 2 à 12 % pour le  $C_3A$
- 0 à 15 % pour le  $C_4AF$

Le ciment Portland contient au moins 95% de clinker. La figure 1.1 montre des nodules de clinker dans le four vertical.



FIGURE 1.1 – Photo du four montrant les nodules de clinker

## 1.2 Les différents types de fours

Deux types de fours sont employés dans l'industrie pour la cuisson du calcaire et de l'argile :

- Les fours verticaux
- Les fours rotatifs

### 1.2.1 Les fours verticaux

Les fours verticaux ou fours droits se présentent généralement sous la forme d'un cylindre en acier avec un diamètre moyen de 2 m et une hauteur moyenne de 8 m chemisés intérieurement avec un matériau réfractaire, résistant à l'abrasion et à la corrosion (Figure 1.2). La partie inférieure est munie d'une grille de défournement. Les perfectionnements

de ces dernières années ont contribué à faire du four droit le plus économique du point de vue énergétique [4].

Dans ce mémoire, nous avons choisi de travailler sur le four vertical.



FIGURE 1.2 – Four vertical ou four droit à chaux chemisé intérieurement avec un matériau réfractaire [5]

### 1.2.2 Les fours rotatifs

Les fours rotatifs sont des fours à revêtement interne réfractaire légèrement incliné par rapport à l'horizontal. Ces fours tournants sont généralement constitués d'une coquille cylindrique en rotation et légèrement inclinée par rapport à la sortie. D'une manière générale, cette coquille peut être constituée de deux revêtements ; un premier en acier et un second en briques réfractaires. La longueur de cette coquille peut selon l'application aller jusqu'à 100 m ou plus pour des diamètres internes de plusieurs mètres comme le cas des fours des cimenteries ou de l'industrie métallique. A l'intérieur du four, les parois réfractaires peuvent se présenter sous deux formes avec ou sans releveurs.

Du point de vue design intérieur, la plupart des fours sont à chauffage direct et disposent de matériaux réfractaires pour plusieurs raisons, dont les principales sont d'isoler et de protéger l'enveloppe extérieure des gradients de températures élevées et aussi d'économiser de l'énergie [6].



FIGURE 1.3 – Four rotatif ou four tournant avec un diamètre interne de 4,096 m et une longueur de 16 m [6]

### 1.3 La combustion

La combustion est un moyen utilisé pour la conversion de l'énergie chimique en une autre forme d'énergie (thermique, mécanique, électrique). Elle se déroule dans une enceinte qui peut conserver de la chaleur générée au travers de la production d'une flamme. Elle est caractérisée par une réaction irréversible fortement exothermique entre un combustible et un comburant selon le schéma ci-dessous [7] :

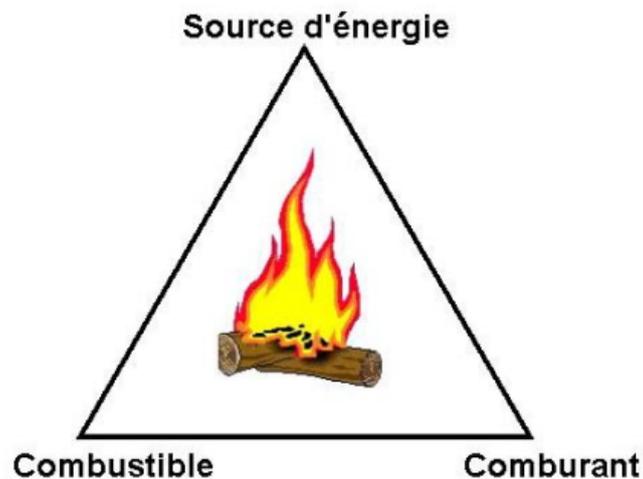


FIGURE 1.4 – Schéma de réalisation d'une combustion ou Triangle du feu [8]

Ce schéma se traduit par une réaction chimique dite réaction de combustion :



Cette réaction induit un fort dégagement de chaleur conduisant à des gradients thermiques très élevés. Différents mécanismes interviennent en combustion. Les schémas cinétiques de la réaction chimique doivent être décrits pour déterminer le taux de consommation du combustible, la formation de produits de combustion et des espèces polluantes et prédire l’allumage, la stabilisation et l’extinction des flammes. Les transferts de masses, par diffusion moléculaire ou transport convectif, des différentes espèces chimiques sont aussi des éléments importants des procédés de combustion. Le dégagement d’énergie dû à la réaction chimique induit des transferts thermiques intenses par conduction, convection et /ou rayonnement [9].

Dans cette étude, le charbon et le GPL sont utilisés comme combustibles. Leurs propriétés physico-chimiques seront détaillées à la section suivante.

Il existe différents types de combustion, parmi lesquelles, on peut citer :

- la combustion laminaire
- la combustion turbulente

### 1.3.1 Combustion laminaire

Une combustion est considérée comme laminaire dans un milieu où les échanges par diffusion turbulente sont pratiquement inexistantes. Si les flammes laminaires semblent n’intervenir que dans quelques applications plutôt (bougies et flamme de briquet), la compréhension de la structure de ces flammes est cependant fondamentale pour la description et la modélisation de nombreuses situations industrielles.

### 1.3.2 Combustion turbulente

Dans un foyer, l’écoulement est dit turbulent si la vitesse des gaz, mesurée en un point, fluctue continuellement de façon apparemment aléatoire, même en régime parfaitement établi ; cela est vrai aussi pour la température et toute autre caractéristique du milieu. Cette turbulence est due à une forte vitesse de l’écoulement entrant et se développe dans le canal amont à cause des gradients de vitesse aux parois et à partir d’obstacles tels que les injecteurs.

Dans ce manuscrit, notre attention sera focalisée sur la combustion turbulente.

## 1.4 Le charbon

Le charbon est une roche sédimentaire d’origine organique, qui provient de la dégradation d’une grande variété de précurseurs : végétaux supérieurs (troncs, feuilles, tiges), fougères,

algues, champignons, spores etc. L'enfouissement progressif des matières organiques entraîne leur maturation, essentiellement par augmentation de la température, paramètre auquel s'ajoute la pression pour les charbons enfouis et/ou tectonisés. Cette évolution appelée houillification conduit à l'anhracite et s'accompagne de modifications physico-chimiques considérables (figure 1.5). L'âge géologique des charbons se situe entre 150 et 300 millions d'années. Globalement, la matière organique s'enrichit en carbone en perdant d'abord de l'eau et du gaz carbonique, puis des hydrocarbures d'abord liquides, puis gazeux. Le charbon est principalement constitué de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'un peu de soufre et d'azote. C'est un matériau hétérogène à toutes les échelles d'observation. A l'échelle micrométrique, les constituants du charbon, dont la morphologie est reconnaissable par observation au microscope photonique, sont appelés macéraux. La part de chaque macéral dans la constitution du charbon dépend de la nature des précurseurs organiques et des conditions géologiques [10].

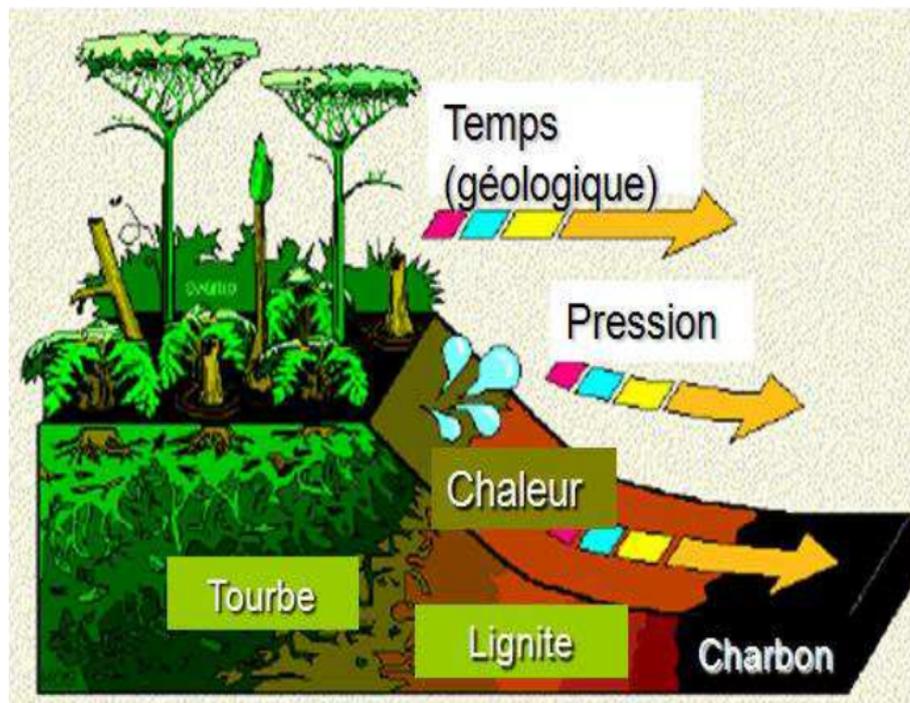


FIGURE 1.5 – Formation et évolution du charbon (houillification) [10]

## 1.5 Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)

Le Gaz de Pétrole Liquéfié ou GPL peut qualifier deux gaz à l'état liquide : le propane ( $C_3H_8$ ) et le butane ( $C_4H_{10}$ ). Ce sont tous les deux des hydrocarbures « saturés » qui sont composés de liaisons simples d'atomes de carbone et d'hydrogène. Leur distribution a débuté dans des bouteilles dès les années 1930 et s'est étendue avec le développement du stockage en citernes (ou « vrac ») dans les années 1960. Ils présentent l'intérêt de se liquéfier sous une pression moins forte que les autres gaz (notamment le méthane) : entre

1,5 et 7 bar, soit une pression équivalente à celle de l'eau du robinet ou à celle de l'air dans un pneu [11].

La principale différence entre le butane et le propane est leur température d'ébullition. Celle du propane se situe à  $-44^{\circ}\text{C}$  et celle du butane à  $0^{\circ}\text{C}$ . C'est la température en dessous de laquelle le gaz devient liquide et la bouteille devient inutilisable [12].

L'usage des GPL est aujourd'hui largement répandu en raison de leur facilité de stockage et de transport. Les GPL sont aujourd'hui largement exploités par les industriels mais aussi par les particuliers dans leurs activités itinérantes [11].

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, la composition physico-chimique du clinker a d'abord été présentée, ensuite les modèles de fours existant dans l'industrie de la cimenterie ont été montrés. En plus, le procédé de combustion a été exposé, puis une explication a été faite sur la formation et l'évolution du charbon. Une analyse a également été réalisée sur le GPL, en se concentrant sur sa composition, sa distribution, son intérêt et son utilisation.

Dans le chapitre qui suit, les matériels et les méthodes utilisés dans cette étude seront décrits de façon détaillés.

# Chapitre 2

## Matériels et méthodes

### Introduction

La simulation numérique consiste à chercher une solution approchée des équations modélisant des phénomènes physiques, chimiques et autres. Avec la capacité grandissante des moyens informatiques, elle s'avère être une alternative à l'expérimentation. Pour résoudre ces équations, différentes méthodes de simulation numérique sont utilisées, parmi lesquelles on peut citer : la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis. La méthode des éléments finis étant la méthode numérique de référence pour le calcul des solutions de problèmes aux limites elliptiques, mais aussi paraboliques ou hyperboliques [13], est choisie dans cette étude.

Dans ce chapitre, un modèle numérique est élaboré en utilisant la méthode des éléments finis pour évaluer numériquement la distribution spatiale et temporelle de la température, de la vitesse et de la pression dans le four. Pour s'assurer de sa fiabilité, des sondes sont placés à l'intérieur du four et permettent de connaître l'évolution de la température.

La section 2.1 est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL Multiphysics, de même que les différentes étapes de la simulation numérique. Dans la section 2.2, les méthodes utilisées durant ce travail seront exposées.

## 2.1 Introduction à COMSOL Multiphysics

### 2.1.1 Présentation du logiciel

La simulation numérique effectuée dans ce travail est réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics version 6.0, basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de résoudre différents problèmes physiques ainsi que le choix des conditions aux limites à travers ses modules contenant les équations prédéfinies pour la modélisation du transfert de chaleur, de la matière (mécanique des fluides, système diphasiques, diffusion, ...), les équations aux dérivées partielles quelconques. L'avantage majeur de COMSOL Multi-

physics est la possibilité de réaliser le couplage entre plusieurs phénomènes physiques de nature différente [14]. La modélisation numérique peut être résolue aussi bien en régime stationnaire qu'en régime temporel. COMSOL est reconnaissable par son interface graphique (figure 2.1).

Dans ce logiciel, la partie de gauche ou **Constructeur de modèles** permet de définir le problème à étudier. Elle regroupe les variables et les paramètres du problème.

La partie du centre ou **Réglages** permet d'entrer les données relatives aux modèles sélectionnés dans la partie gauche [15]. C'est aussi dans cette partie que sont choisies les équations modélisant le phénomène physique, les valeurs initiales et les conditions aux limites. La partie de droite ou **Graphiques** permet de visualiser la géométrie, le maillage du système ainsi que la résolution numérique.

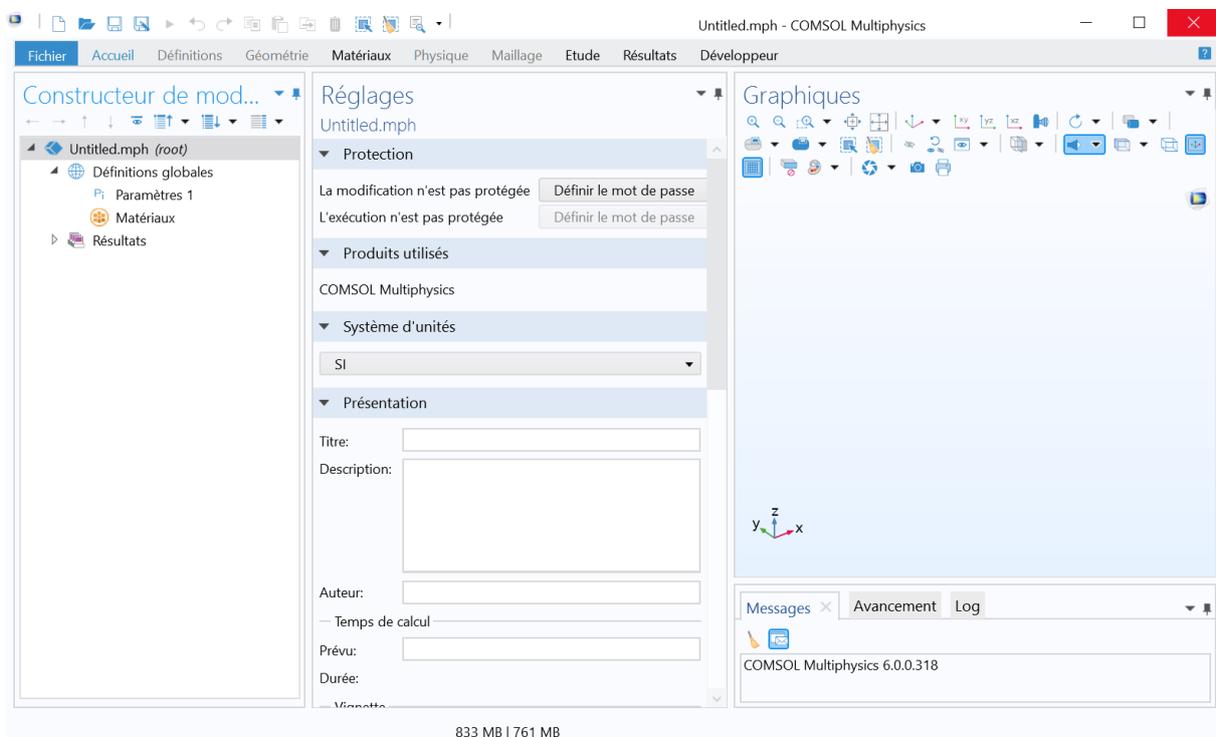


FIGURE 2.1 – Interface graphique du logiciel COMSOL Multiphysics

### 2.1.2 Les étapes de la simulation

La création d'un modèle numérique sous COMSOL Multiphysics se fait en quelques étapes :

- L'étape préalable consiste en la création de la géométrie et le choix de l'étude (stationnaire, temporelle).
- La deuxième étape concerne le choix des modules de travail, l'introduction des constantes et des relations usuelles, la définition des propriétés physiques des matériaux et le choix des conditions initiales et aux limites.

- L'étape de résolution consiste en un choix du schéma de résolution, par exemple les dimensions et la forme des mailles dont les calculs seront effectués.
- L'étape de post-traitement consiste en l'extraction des résultats de modélisation sous forme d'images ou de graphiques et leurs validations. Il permet d'exploiter les résultats (visualisation des champs de vitesse, de température, de pression, . . .) [14].

## 2.2 Modélisation mathématique

Dans ce manuscrit, un four vertical destiné à la fabrication du clinker est étudié. Un modèle numérique 2D est réalisé à l'aide de COMSOL Multiphysics. La modélisation mathématique consiste en la présentation des équations de la chaleur dans les fluides et dans les solides, le mouvement du gaz par un modèle de turbulence ainsi que la combustion du gaz permettant d'accélérer l'élévation de la température dans le four.

La simulation numérique effectuée, comprend deux configurations :

- Premièrement, la combustion du charbon en présence d'air en régime temporel a été simulé.
- Deuxièmement, un gaz GPL a été ajouté à la première configuration pour accélérer le procédé de combustion en régime stationnaire. Le GPL utilisé dans cette deuxième étude est le propane.

### 2.2.1 Géométrie du four

La figure 2.2 est un modèle descriptif de la géométrie du four statique avec ses dimensions. L'enveloppe extérieure est en acier avec une paroi intérieure en réfractaire d'une épaisseur de 4 et 40 mm respectivement. Dans la partie inférieure, 08 entrées d'air sont placées à distances égales le long de la circonférence. Le gicleur servant à contrôler les débits d'air et de GPL mesure 15,8 mm de diamètre. Au niveau de la partie centrale, la matière première (cru) est superposée aux couches de charbon sous forme de sphères de 10 mm de diamètre. Sous chaque sphère se trouvent deux cubes de charbon combustible de 10 mm de côté. La première couche de charbon est une double couche. La figure 2.3 est une image du four avec des nodules de clinker obtenue à la fin du cycle de cuisson.

Dans le but de valider le modèle numérique, plusieurs sondes thermiques sont placées à des endroits différents du four. Celles-ci sont placées le long de l'axe central. L'une des sondes est placée sur la première couche donc la couche inférieure, la deuxième sonde est placée sur la troisième et la dernière sur la cinquième couche qui correspond à la moitié de la hauteur du four. Ces positions sont illustrées sur la figure 2.2.

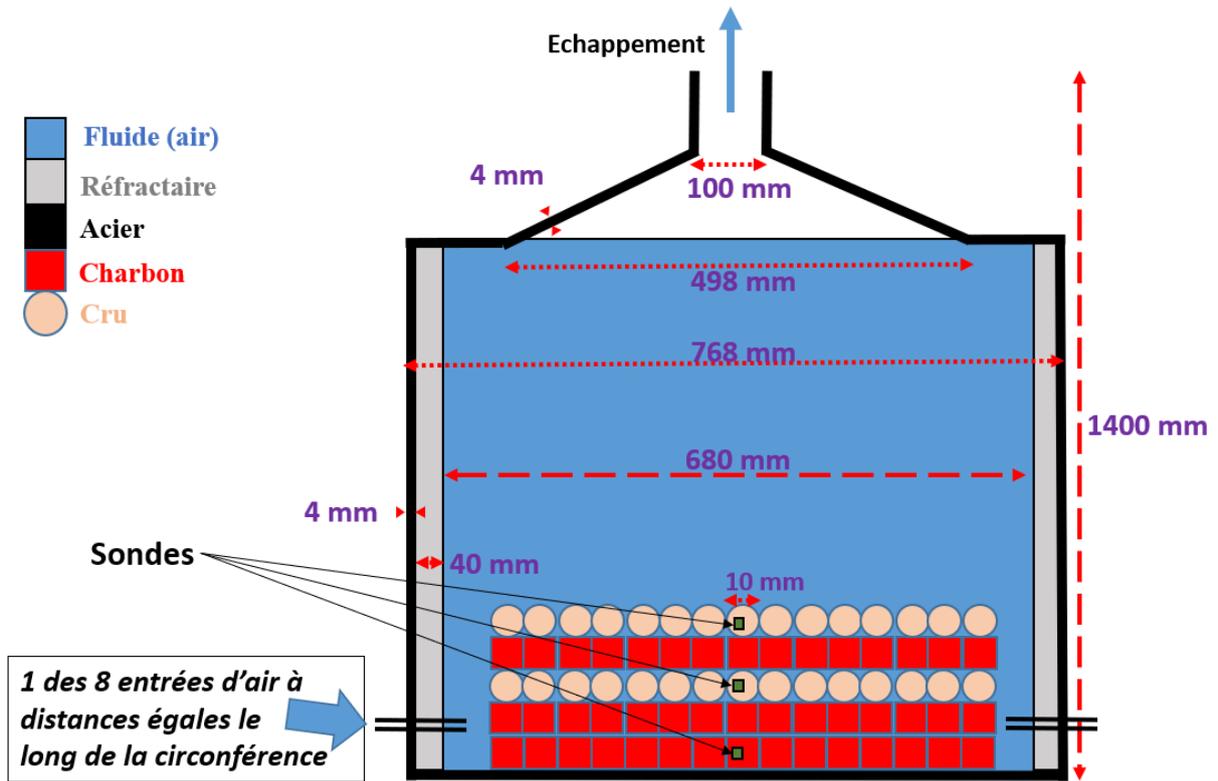


FIGURE 2.2 – Représentation géométrique des outils et équipements du four



FIGURE 2.3 – Photo du four avec des nodules de clinker obtenus à la fin du cycle de cuisson

## 2.2.2 Couplage des équations aux dérivées partielles modélisant la distribution de la chaleur dans le four en régime temporel

Pour simuler le comportement de la température, de l'écoulement des fluides et du transport des espèces, différents modules ont été utilisés :

### 2.2.2.1 Transfert de chaleur

Le module de transfert de chaleur dans les solides et dans les fluides exprime le transfert de chaleur à travers le four dans sa globalité. Elle est modélisée par l'équation de l'énergie :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (2.1)$$

### Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales et aux limites considérées pour résoudre numériquement le transfert de chaleur sont les suivantes :

- \* Le transfert de chaleur à l'intérieur du four se fait par conduction thermique :

$$-n \cdot q = \rho \int_{T_{amb}}^T C_p dT u \cdot n \quad (2.2)$$

avec  $n$  la normale aux surfaces extérieures

- \* Les surfaces extérieures sont isolées thermiquement :

$$-n \cdot q = 0 \quad (2.3)$$

- \* Chaque charbon agit comme une source de chaleur avec un débit calorifique défini à l'aide d'une puissance thermique de 6,67 kW :

$$Q = Q_0, \quad Q_0 = \frac{P_0}{V} \quad (2.4)$$

- \* La température initiale est de 25 °C dans tout le système.

### Calcul du nombre de Reynolds

Le calcul du nombre de Reynolds se fait selon les paramètres du système :

$$R_e = \frac{u \times d}{\nu_c} \quad (2.5)$$

On a :

$u = 425$  m/s, la vitesse d'entrée du fluide (air)

$d = 15,8$  mm, le diamètre du gicleur

$\nu_c = 15,6 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, la viscosité cinématique de l'air à 25 °C

L'application numérique donne un nombre de Reynolds de :

$$R_e = \frac{425 \times 15,8 \cdot 10^{-3}}{15,6 \cdot 10^{-6}}$$

$R_e \simeq 430449 \gg 2300 \Rightarrow$  le régime est donc turbulent.

#### 2.2.2.2 Ecoulement

Le régime d'écoulement étant turbulent avec un nombre de Reynolds très supérieur à 2000 (430449), le module d'écoulement turbulent est choisi pour décrire l'écoulement des fluides à l'intérieur du four. Il est défini par les équations de continuité et de quantité de mouvement (2.6, 2.7). Pour tenir compte de la turbulence lors de la résolution du champ d'écoulement, le modèle de turbulence  $\mathbf{k}\text{-}\varepsilon$  est appliqué.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[ -pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I - \frac{2}{3}\rho kI \right] + F \quad (2.7)$$

$$\text{avec } \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Où  $p$ (Pa) est la pression,  $I$ (%) l'humidité,  $\mu$ (Pa.s) la viscosité dynamique,  $\mu_T$ (Pa.s) la viscosité dynamique turbulente,  $k$ (m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>) l'énergie cinétique turbulente,  $\varepsilon$ (m<sup>2</sup>.s<sup>-3</sup>) le taux de dissipation turbulente,  $F$ (m.s<sup>-2</sup>) la résultante des forces massiques s'exerçant dans le fluide.

### Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales et aux limites considérées pour résoudre numériquement l'écoulement sont les suivantes :

- \* A l'entrée, un débit de  $5 \text{ m}^3/\text{min}$  pour les fluides est appliqué :

$$u.t = 0, \quad V_0 = - \int_{\partial\Omega} dT u.n dS \quad (2.8)$$

avec  $V_0$  le débit d'entrée des fluides

- \* La sortie est modélisée par :

$$n^T [-pI + K] n = p_0, \quad \nabla k.n = 0, \nabla \varepsilon.n = 0 \quad (2.9)$$

- \* La vitesse initiale est égale à  $0 \text{ m.s}^{-1}$ . De même, la pression initiale est de  $1 \text{ atm}$  (la pression atmosphérique).

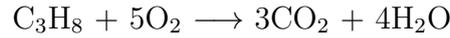
### Choix du modèle de turbulence utilisé à savoir le modèle $\mathbf{k}\text{-}\varepsilon$

Le modèle  $\mathbf{k}\text{-}\varepsilon$  est un modèle semi empirique basé sur les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente  $k$  et de sa dissipation  $\varepsilon$ . L'équation modélisée de l'énergie turbulente est dérivée de l'équation exacte. Celle de la dissipation est obtenue sur la base d'un raisonnement physique [9]. Dans ce modèle, l'écoulement est complètement turbulent.

### 2.2.3 Modélisation de la combustion du propane en régime stationnaire

L'intégration de la combustion du propane est coûteuse en ressources numériques. C'est pour cette raison que nous avons choisi de travailler simplement en stationnaire dans cette étude préliminaire.

La réaction entre le propane et le dioxygène se fait comme suit :



Le diazote, bien que présent dans l'air ne participe pas à la réaction.

#### 2.2.3.1 Transport des espèces

Le module de transport des espèces concentrées décrit le transport des espèces en déterminant les coefficients de transport. Il est défini par les équations de conservation du transport des espèces suivantes :

$$R_i = \nabla \cdot j_i + \rho(u \cdot \nabla)\omega_i \quad (2.10)$$

$$j_i = - \left( \rho D_i^f \nabla \omega_i + \rho \omega_i D_i^f \frac{\nabla M_n}{M_n} + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right) \quad (2.11)$$

$$M_n = \left( \sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

$$\rho = \frac{P}{RT} M_n \quad (2.13)$$

Où  $\omega_i$ (%) est la fraction massique des espèces,  $i$  l'espèce,  $M_n$  ( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) la masse molaire du mélange,  $M_i$ ( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) la masse molaire de chaque espèce.

#### Conditions initiales et aux limites :

Les conditions initiales et aux limites considérées pour résoudre numériquement le transport des espèces sont les suivantes :

- \* Au niveau des entrées inférieures, du dioxygène avec une fraction massique  $w_i = 23\%$  est introduit et dans les entrées supérieures, du propane avec une fraction molaire  $x_0 = 100\%$  est aussi introduit :

$$w_i = w_{0,i}, \quad w_{0,i} = \frac{x_{0,i} M_i}{M_n} \quad (2.14)$$

avec  $w$ (%) la fraction massique,  $x$ (%) la fraction molaire

\* La sortie est modélisée par :

$$-n.\rho D_i^f \nabla w_i = 0 \quad (2.15)$$

\* Les fractions massiques initiales sont de 23% pour l'oxygène et 0% pour le GPL.

### 2.2.3.2 Taux de réaction turbulente

Lors de l'utilisation d'un modèle de turbulence dans une interface d'écoulement réactif, le taux de production de l'espèce  $i$  résultant de la réaction  $j$  est modélisé comme le minimum du taux de réaction de fermeture de la valeur moyenne et du taux du modèle de dissipation tourbillonnaire [16] :

$$R_{ij} = \nu_{ij} \cdot \min [r_{MVC,j}, r_{ED,j}] \quad (2.16)$$

Dans l'équation (2.16),  $r_{ED,j}$  est la vitesse de réaction définie par le modèle de dissipation tourbillonnaire. Son expression est donnée par :

$$r_{ED,j} = \frac{\alpha_j}{\tau_T} \rho \cdot \min \left[ \min \left( \frac{\omega_r}{\nu_{rj} M_r} \right), \beta \sum_p \left( \frac{\omega_p}{\nu_{pj}} M_p \right) \right] \quad (2.17)$$

où  $\tau_T(s)$  est l'échelle de temps de mélange de la turbulence,  $\nu$  désigne les coefficients stœchiométriques.

Les propriétés des réactifs de la réaction sont indiquées à l'aide d'un indice  $r$ , tandis que les propriétés des produits sont indiquées à l'aide d'un indice  $p$ .

En se basant sur le modèle de Klayborworn et al [17], le taux de réaction moléculaire des réactions est défini comme étant infiniment rapide. Pour ce faire, le modèle prescrit des constantes de vitesse irréalistes pour les réactions. Cela implique que le taux de production est donné uniquement par le mélange turbulent dans l'équation (2.17).

### 2.2.3.3 Enthalpie

La chaleur de réaction, ou la variation d'enthalpie, qui suit chaque réaction est définie à partir de la chaleur de formation des produits et des réactifs :

$$\Delta H_r = \sum_{\text{produits}} \Delta H_f - \sum_{\text{réactifs}} \Delta H_f \quad (2.18)$$

La chaleur de formation de chaque espèce est indiquée dans le Tableau 2.1. La chaleur de formation des produits étant inférieure à celle des réactifs, la réaction est donc exothermique et dégage de la chaleur. Le dégagement de chaleur est inclus dans le modèle

par l'ajout d'une source de chaleur au module Transfert de chaleur. La source de chaleur  $q(\text{W.m}^{-3})$  appliquée est définie comme suit :

$$q = r_{ED,1}\Delta H_{r1} + r_{ED,2}\Delta H_{r2} \quad (2.19)$$

### 2.2.3.4 Capacité thermique

La température dans le four augmente considérablement en raison du dégagement de chaleur qui suit les réactions, ce qui est l'une des caractéristiques de la combustion. Pour une prédiction précise de la température, il est important de tenir compte de la dépendance de la température des capacités thermiques des espèces. Dans le modèle, les fonctions d'interpolation pour la capacité thermique à pression constante,  $C_{p,i}(\text{cal}/(\text{mol.K}))$ , pour chaque espèce sont définies en utilisant les valeurs à trois températures différentes indiquées dans le Tableau 2.1. La capacité calorifique du mélange,  $C_{p,mix}(\text{J}/(\text{kg.K}))$ , est calculée comme une moyenne pondérée par la fraction massique des capacités thermiques individuelles :

$$C_{p,mix} = \sum_i \frac{w_i C_{p,i}}{M_i} \quad (2.20)$$

TABLEAU 2.1 – Enthalpie de formation et capacité calorifique des espèces

Espèces	$\nabla H_f$ (kcal/mol) T = 298 K	$C_p$ (cal/mol.K) T= 300 K	$C_p$ (cal/mol.K) T= 1000 K	$C_p$ (cal/mol.K) T= 2000 K	Réf.
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-24,804	17,66	41,702	48,801 à T= 1500 K	[18]
O <sub>2</sub>	0	7,010	8,350	9,032	[19]
CO <sub>2</sub>	-94,061	51,140	8,910	12,993	[19]
H <sub>2</sub> O	-57,80	7,999	9,875	12,224	[19]

### 2.2.4 Propriétés physiques des matériaux

Les propriétés physiques des différents matériaux utilisés dans le four sont données dans le Tableau (2.2) à l'exception de celle du fluide (air) qui provient directement de la bibliothèque du logiciel et qui est une fonction de la température.

TABLEAU 2.2 – Propriétés physiques des matériaux

Matériaux	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Capacité calorifique [J/(kg.K)]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
Acier	45	511	8000
Réfractaire	0,6	955	2520
Charbon	0,2	1380	1400
Cru	3	717	1400

### 2.2.5 Choix du Maillage

Dans nos simulations, un maillage grossier est utilisé afin de faciliter la convergence des calculs. Ce dernier a généré 57426 éléments de domaine et 6125 éléments de frontière avec plus de nœuds répartis au niveau de la partie basse du four comme le montre la Figure (2.4). De plus, la séquence de maillage est définie de manière à ce que le logiciel puisse assurer le contrôle automatique du système.

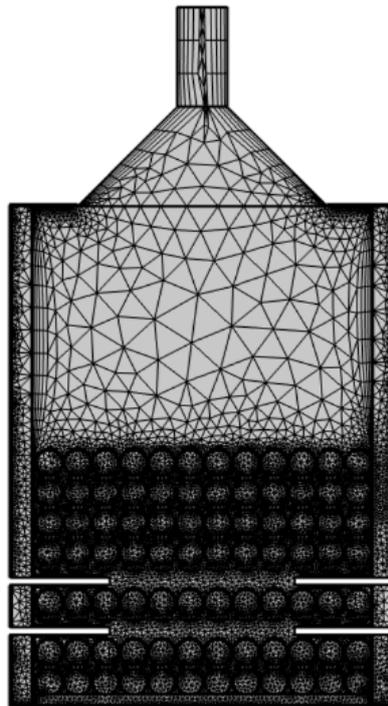


FIGURE 2.4 – Maillage du four avec des éléments triangulaires

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, un modèle numérique 2D a été construit sous COMSOL Multiphysics dans le but de modéliser le fonctionnement du four vertical. Ce modèle fournit les distributions spatiales et temporelles des paramètres physiques tels que la température, la vitesse des fluides et la pression dans le four. Le modèle comprend deux configurations à savoir la combustion turbulente du charbon en présence d'air en régime temporel et le second avec l'ajout du gaz GPL à cette dernière pour l'accélération du procédé de combustion en régime stationnaire. Les résultats obtenus sont analysés et interprétés au chapitre suivant.

# Chapitre 3

## Résultats et discussion

### Introduction

La construction du modèle numérique étant faite, il est important de le tester et de le valider. Pour cela, dans ce chapitre, les résultats numériques obtenus sont analysés et interprétés.

Dans la section 3.1, le paramétrage du solveur est présenté. La section 3.2 expose la validation du modèle numérique. Dans la section 3.3, les variations de la température, de la vitesse et de la pression dans le four sont présentées. La section 3.4 montre l'effet du débit d'air dans l'évolution de ces paramètres physiques.

### 3.1 Paramétrage du solveur temporel

Dans l'industrie de la cimenterie, les fours fonctionnent 24h/24. C'est pour cela qu'une simulation pendant 24h a été effectuée avec un pas de temps de 1h en régime temporel. Ce pas de temps est choisi de façon progressive pour éviter le problème de convergence en début de simulation.

Le modèle numérique a été exécuté sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel core i9 de 11ème génération et d'une mémoire RAM de 32 Go. Le temps de calcul a duré 5 min 46 s en régime temporel et 34 min 34 s en régime stationnaire.

### 3.2 Validation du modèle numérique

La validation du modèle numérique est faite en comparant les températures numériques avec ceux de la littérature. Dans notre modèle, la température maximale atteinte pour la combustion du charbon est de l'ordre de 2000 °C. Cela est confirmé dans la littérature par les résultats obtenus par Adam et al [2], comme le montre la figure 3.1.

En effet, Adam et al ont étudié numériquement la combustion de différents combustibles dans une chambre cylindrique. Ils ont réalisé des simulations sur un modèle 2D asymétrique avec une turbulence de type  $k-\varepsilon$  RNG (Re-Normalisation Group). Les dimensions de la chambre de combustion sont :  $r_f = 0,004$  m,  $r_i = 0,006$  m,  $r_o = 0,01$  m,  $R = 0,05$  m,  $L = 0,5$  m (voir figure 3.2).

Dans notre modèle, la température axiale augmente progressivement jusqu'à atteindre 2347 K (2074 °C) puis décroît jusqu'à 953 K (680 °C) à la sortie. Alors que dans le modèle de [2], la température atteint rapidement sa valeur maximale 2241 K (1968 °C) et diminue jusqu'à 632 K (359 °C) à la sortie. Ce qui nous permet de conclure que les résultats numériques obtenus dans cette étude, bien que préliminaires, sont cohérents et encourageants.

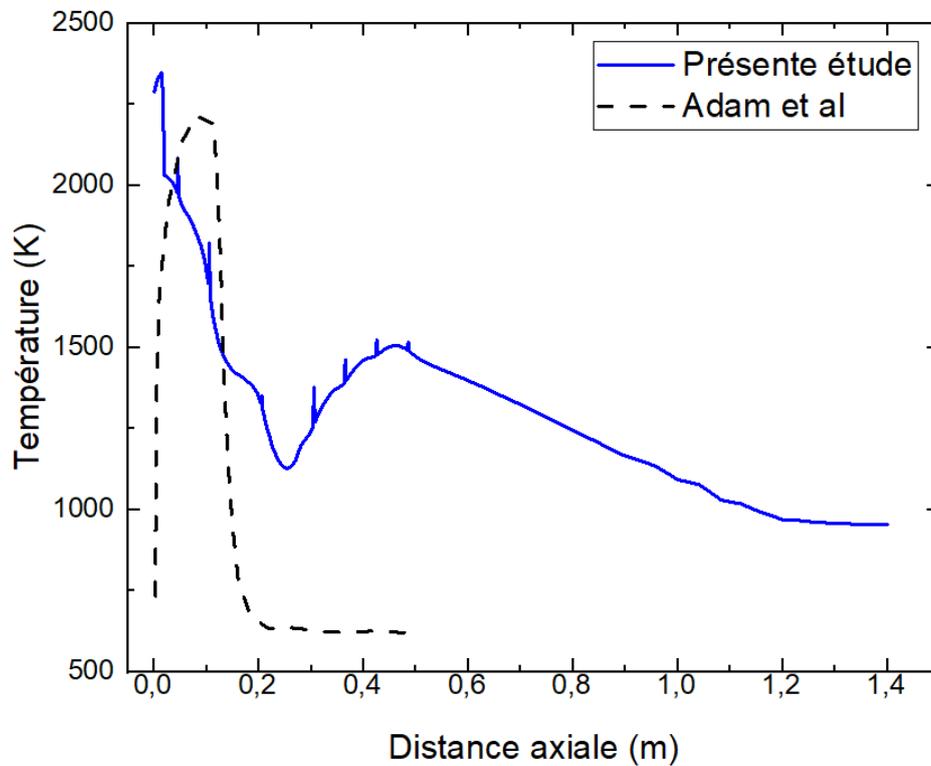


FIGURE 3.1 – Comparaison de la température axiale pour le charbon avec celle du modèle de Adam et al [2]

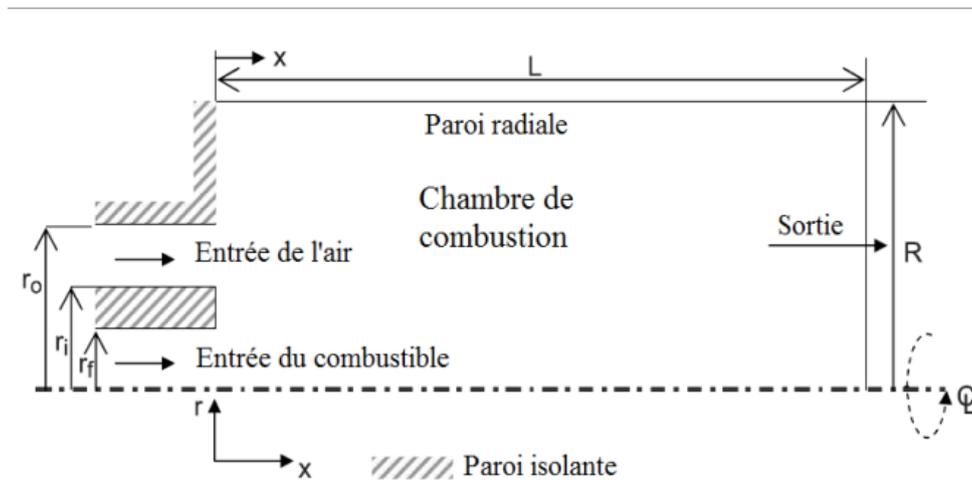


FIGURE 3.2 – Géométrie de la chambre de combustion du modèle de Adam et al [2]

### 3.3 Variations temporelles et spatiales de la température, de la vitesse et de la pression dans le four

#### 3.3.1 Distribution de la température

Les résultats numériques pour la combustion sans le GPL, illustrés à la figure (3.3), montrent un fort gradient de température reparti de manière constante en bas du four et atteint une valeur maximale de 2080 °C. Néanmoins, un changement significatif est observé près du centre et vers la sortie du four. Cela s'explique en grande partie par la présence de la matière première qui tend à atténuer les gradients de températures.

De plus, la première couche de charbon étant doublée, peut aussi engendrer cette valeur élevée de la température à ce niveau, autrement dit la partie inférieure du four.

Pour mieux évaluer les performances du four, trois sondes ont été placées le long de l'axe central. Le tracé de la figure (3.4) représente les données relevées par celles-ci. La sonde 1 correspondant à la première couche de clinker, montre que la température de clinkérisation (1450 °C) est atteinte au bout de 18h de cuisson. Cependant, les sondes 2 et 3 correspondant à la troisième et à la cinquième couche, montrent un profil de température identique avec un champ de température avoisinant 1100 °C au bout de 24h. Ces résultats montrent que l'ajout du GPL est nécessaire afin de diminuer le temps de cuisson et d'accélérer le processus de clinkérisation. De façon pratique, cette inhomogénéité de la température dans le four a des conséquences directes sur le produit final qui est le ciment. Cela engendre des clinkers avec des propriétés finales non désirées puisque cela impacte la qualité du ciment.

Pour la combustion avec le GPL, une augmentation de la température a été constatée, comme le montre la figure (3.5). La température augmente progressivement jusqu'à atteindre 2400 °C. On observe également une température non homogène au niveau du centre et en allant vers la sortie. Ceci est dû à la valeur élevée du pouvoir calorifique du combustible gazeux (propane).

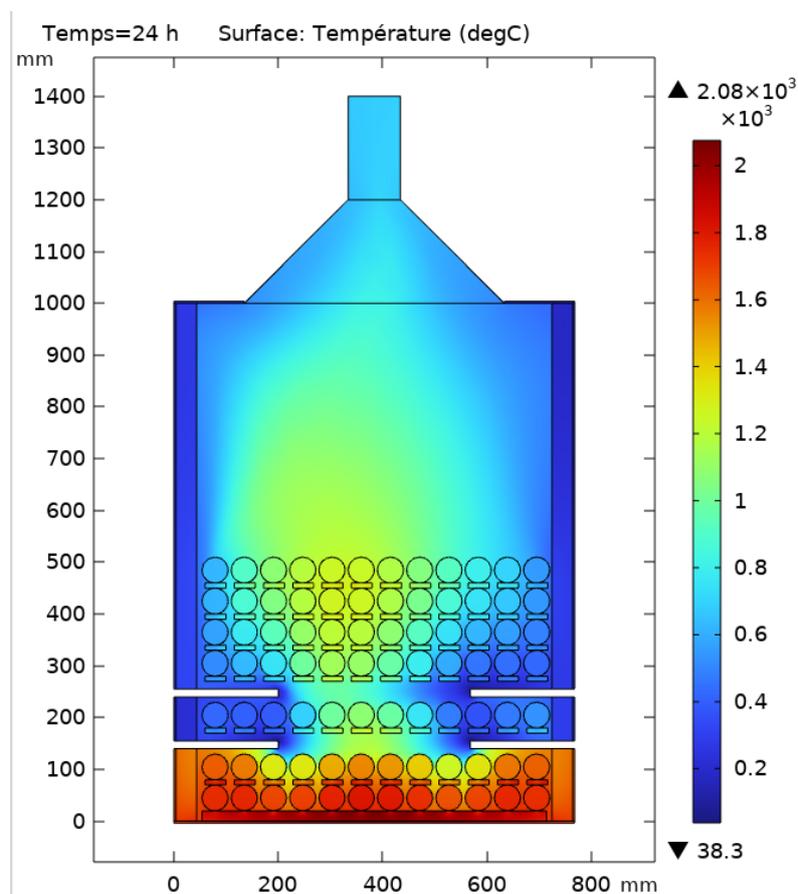


FIGURE 3.3 – Distribution de la température dans le four pour la combustion sans le GPL à  $t = 24h$

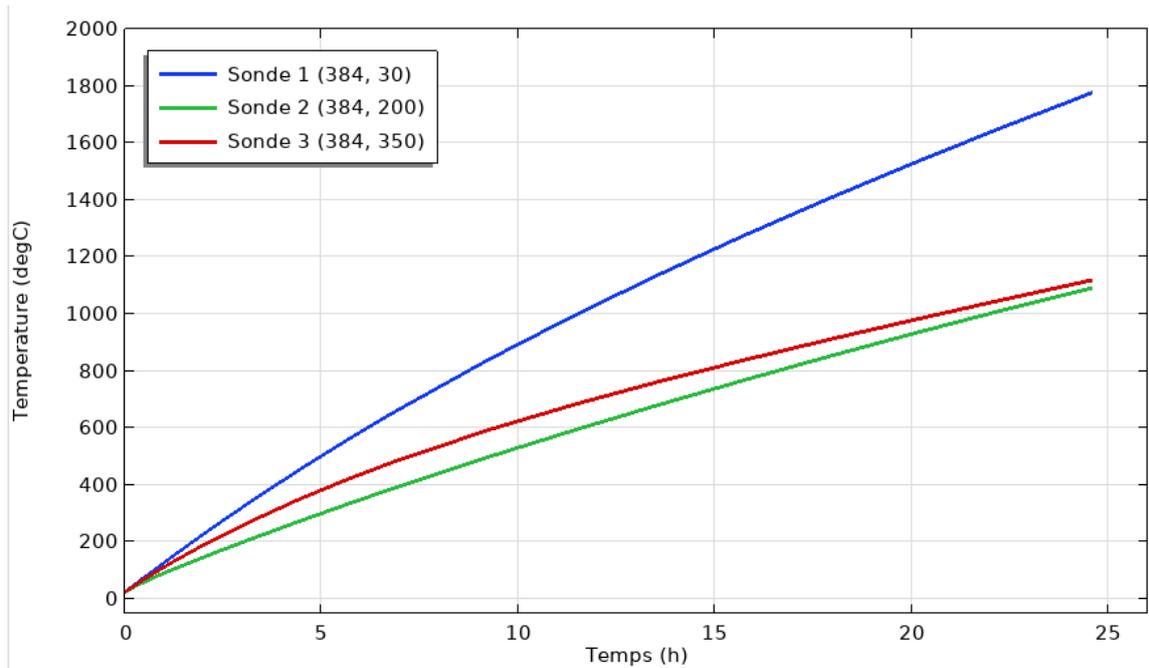


FIGURE 3.4 – Distribution de la température le long de l'axe central du four en fonction du temps pour la combustion sans le GPL

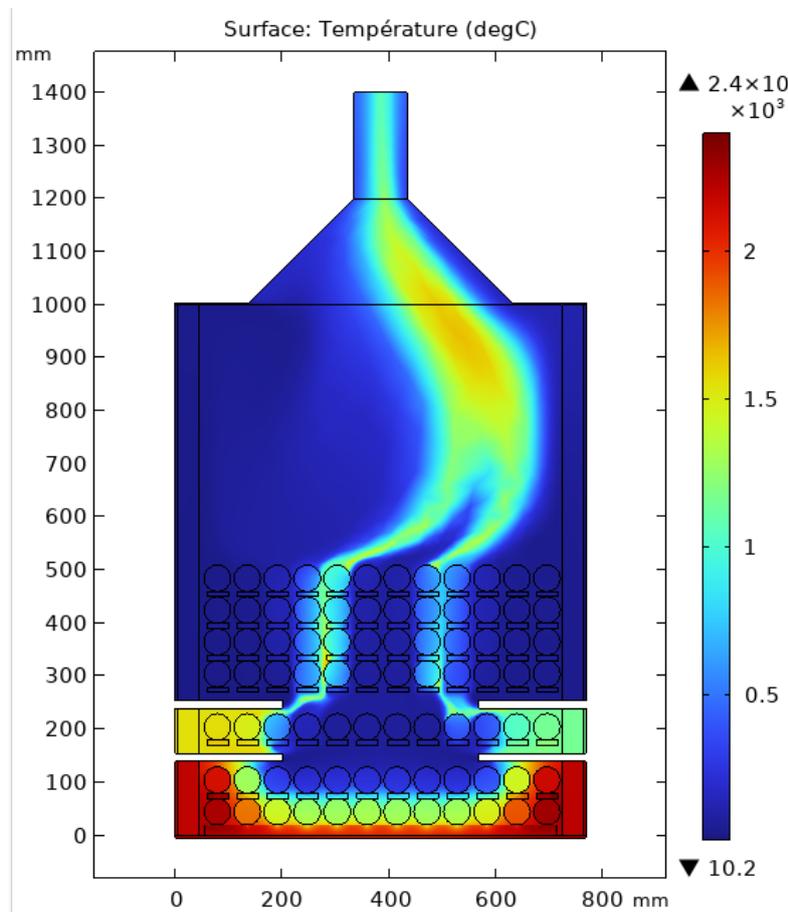


FIGURE 3.5 – Distribution de la température dans le four pour la combustion avec le GPL

### 3.3.2 Distribution de la vitesse

Les figures (3.6a) et (3.6b) montrent la distribution de la vitesse des fluides pour les deux configurations.

Pour le modèle sans GPL, la vitesse du fluide est presque homogène. Néanmoins, elle est relativement forte dans la zone proche de la paroi gauche avec un max de 0,45 m/s. Ceci est dû à l'espacement entre les parois et les couches de clinker. La partie située à gauche étant plus large que celle de droite, le fluide a donc tendance à s'y échapper.

Pour le modèle avec GPL, on constate que la vitesse est plus élevée dans la zone de sortie avec une intensité maximale de 17,5 m/s qu'au centre du four. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que le GPL est un fluide supplémentaire en entrée et donc l'orifice de sortie met plus de temps à faire sortir le fluide mélangé. Ceci devrait augmenter la vitesse à la sortie.

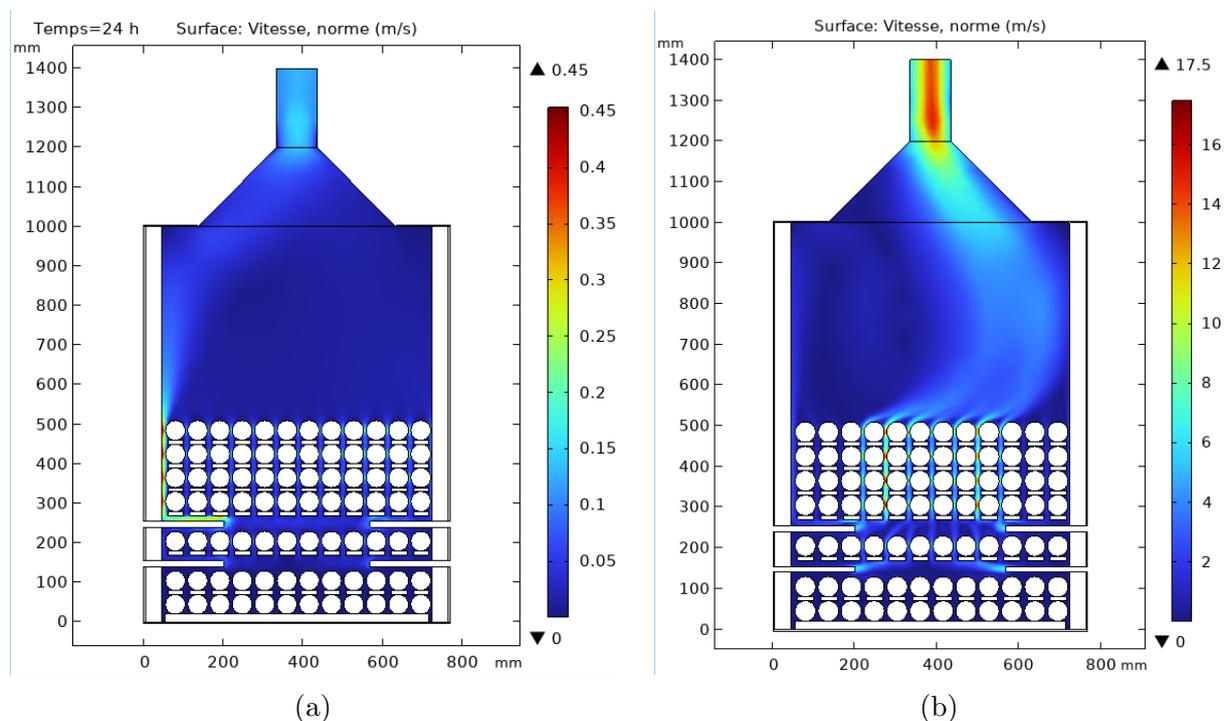


FIGURE 3.6 – Distribution de la vitesse du fluide dans le four : (a) sans GPL (b) avec GPL

### 3.3.3 Distribution de la pression

Les figures (3.7a) et (3.7b) représentent la distribution de la pression dans le four pour les deux modèles. Dans le modèle sans GPL, la pression est relativement faible et atteint une valeur maximale de 0,4 Pa. Toutefois, elle est plus importante dans le modèle avec GPL, avec un maximum d'environ 100 Pa. Cette différence de pression semble s'expliquer par l'agitation des molécules due à la réaction entre le GPL et l'air et peut être démontrée à

travers la loi des gaz parfaits (équation 3.1).

$$P = \frac{N}{V}k_B T \quad (3.1)$$

où  $N$  est le nombre de particules,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $V$  le volume du gaz

Dans l'équation (3.1), on peut clairement observer que la pression varie proportionnellement en fonction du nombre de particules. Donc l'augmentation du nombre de molécules entraîne inévitablement l'élévation de la pression.

Sachant aussi que la température est plus élevée dans la deuxième configuration, alors la pression étant aussi proportionnelle à celle-ci, peut expliquer son augmentation.

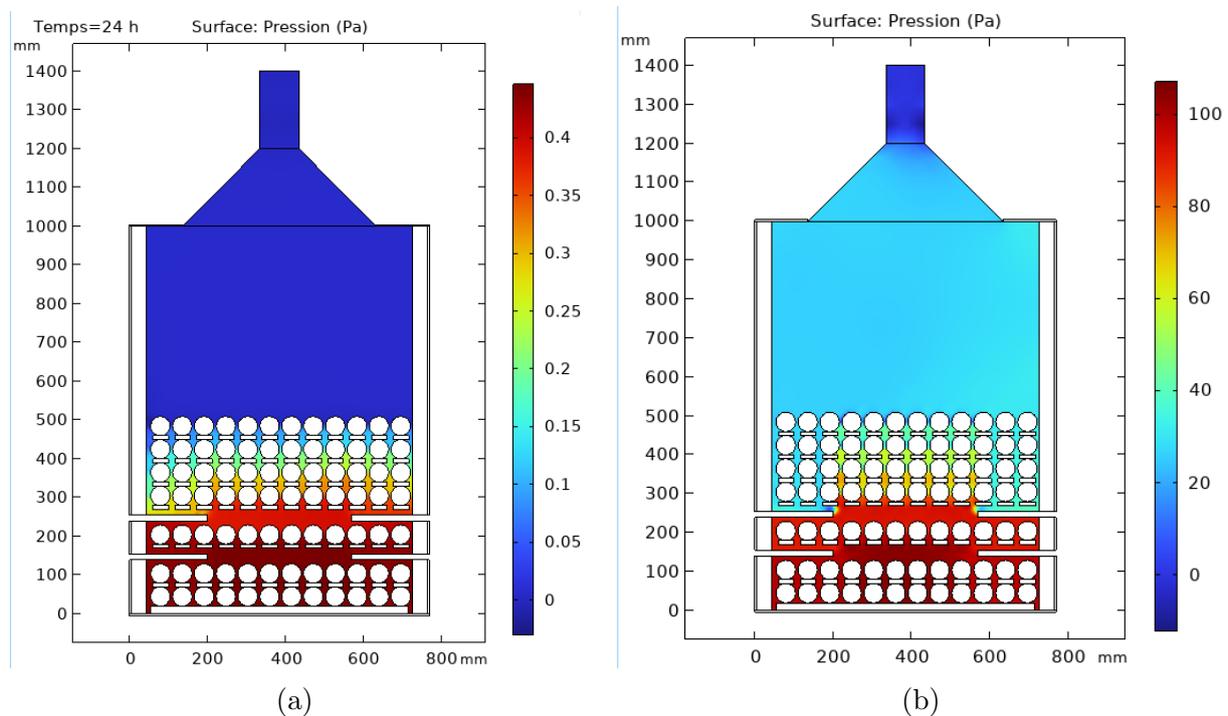


FIGURE 3.7 – Distribution de la pression dans le four : (a) sans GPL, (b) avec GPL

### 3.4 Effet du débit d'air dans l'évolution de la température, de la vitesse et de la pression dans le four

On fait varier le débit d'air à l'entrée puis on observe les variations des différents paramètres physiques dans le système selon les deux modèles (sans GPL et avec GPL). Dans un premier temps, on fixe le débit d'air à  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ . Et dans un second temps, on fixe le débit à  $7 \text{ m}^3/\text{min}$ .

### 3.4.1 Modèle sans GPL

Les figures (3.8), (3.9) et (3.10) montrent que lorsqu'on fixe le débit à  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ , la température augmente tandis que la vitesse et la pression diminuent. Par contre, lorsqu'on fixe le débit à  $7 \text{ m}^3/\text{min}$ , la température diminue, alors que la vitesse et la pression augmentent.

Ceci est dû au fait que lorsque le débit d'air est réduit, moins d'air frais est en circulation pour dissiper la chaleur générée par la combustion. Cela peut entraîner une accumulation de chaleur dans le four, conduisant à une augmentation de la température. Une diminution du débit d'air peut également réduire la ventilation et cela peut entraîner une diminution de la vitesse et de la pression.

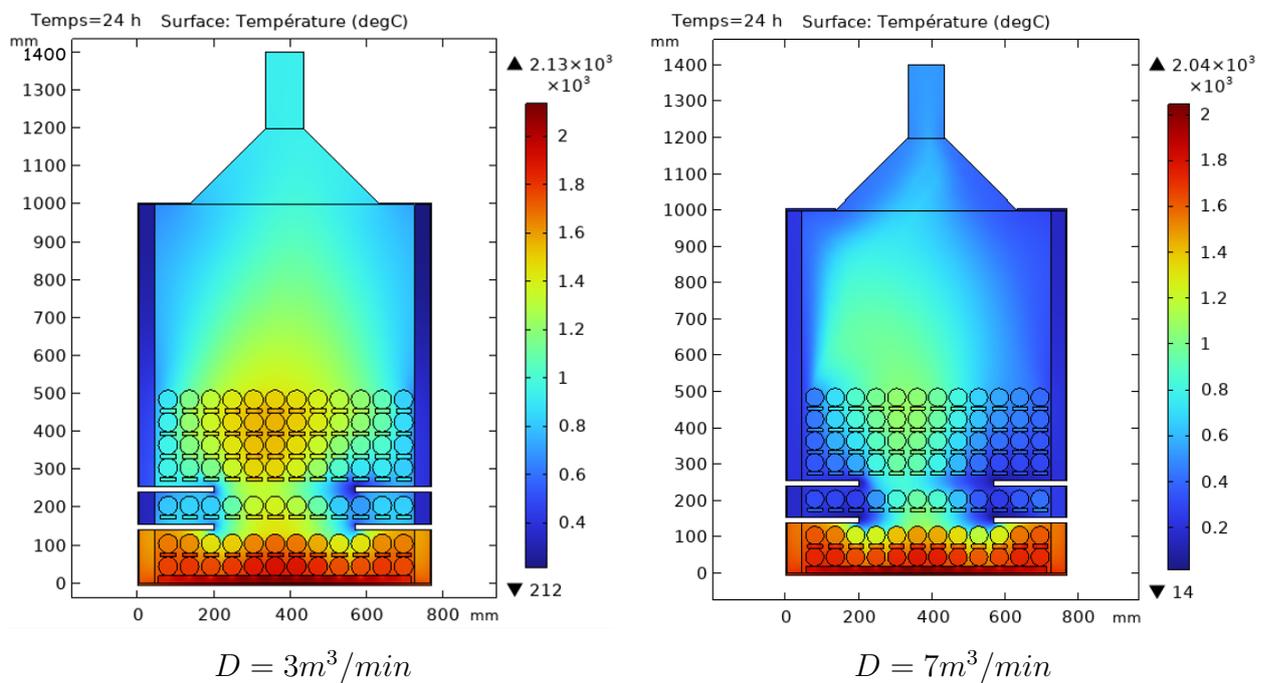


FIGURE 3.8 – Effet du débit d'air dans l'évolution de la Température dans le four selon le modèle sans GPL

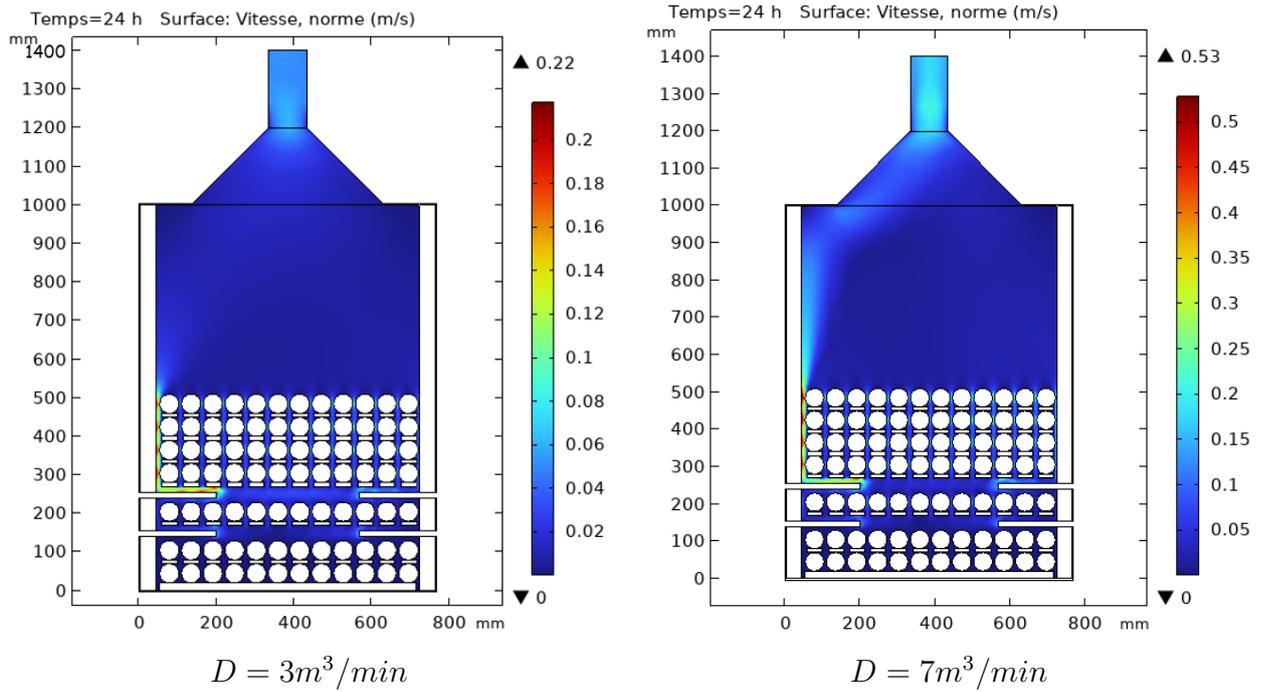


FIGURE 3.9 – Effet du débit d’air dans l’évolution de la Vitesse dans le four selon le modèle sans GPL

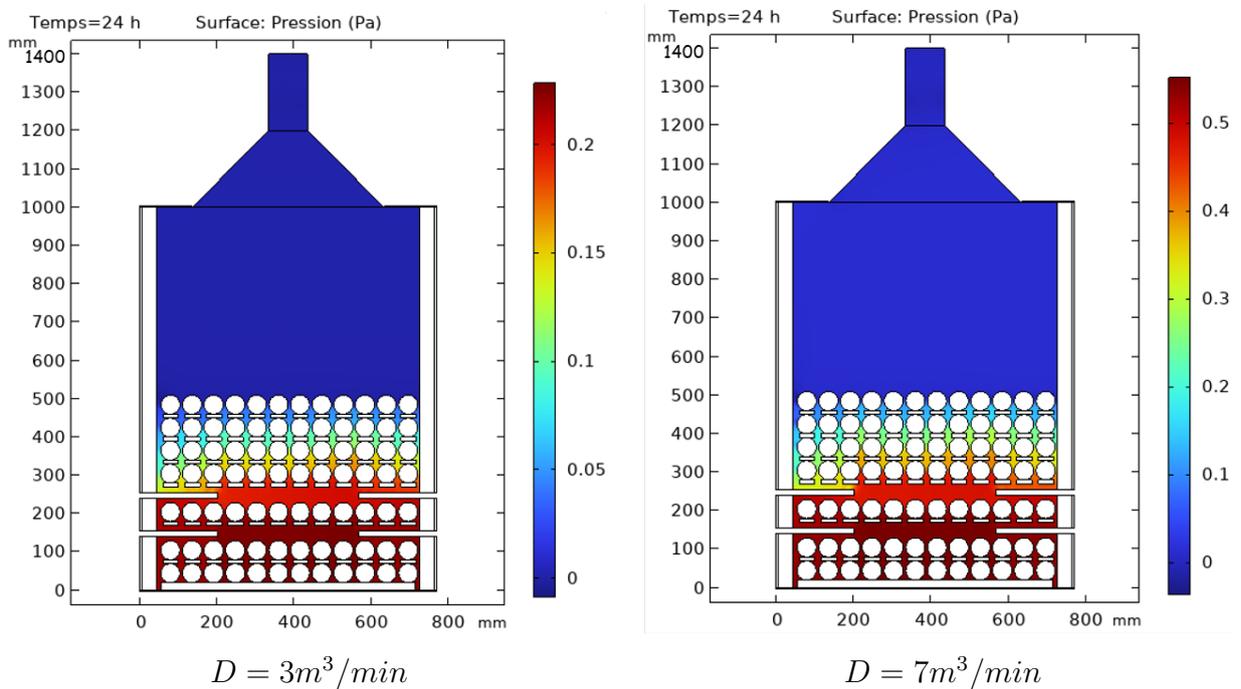


FIGURE 3.10 – Effet du débit d’air dans l’évolution de la Pression dans le four selon le modèle sans GPL

### 3.4.2 Modèle avec GPL

Les tracés (3.11), (3.12) et (3.13) montrent que lorsqu'on fixe le débit à  $3 \text{ m}^3/\text{min}$ , la température, la vitesse, de même que la pression diminuent. Cependant, lorsque le débit est fixé à  $7 \text{ m}^3/\text{min}$ , la température diminue alors que la pression augmente. La vitesse est quasiment constante.

En effet, une réduction du débit d'air peut entraîner une diminution d'oxygène nécessaire pour alimenter la réaction de combustion. Le manque d'oxygène signifie que la réaction de combustion entre le propane (GPL) et le dioxygène se produit à un rythme plus lent, ce qui se traduit par une production de chaleur moindre et entraîne donc un diminution de la température. De plus, un débit d'air élevé peut augmenter la ventilation, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse et de la pression.

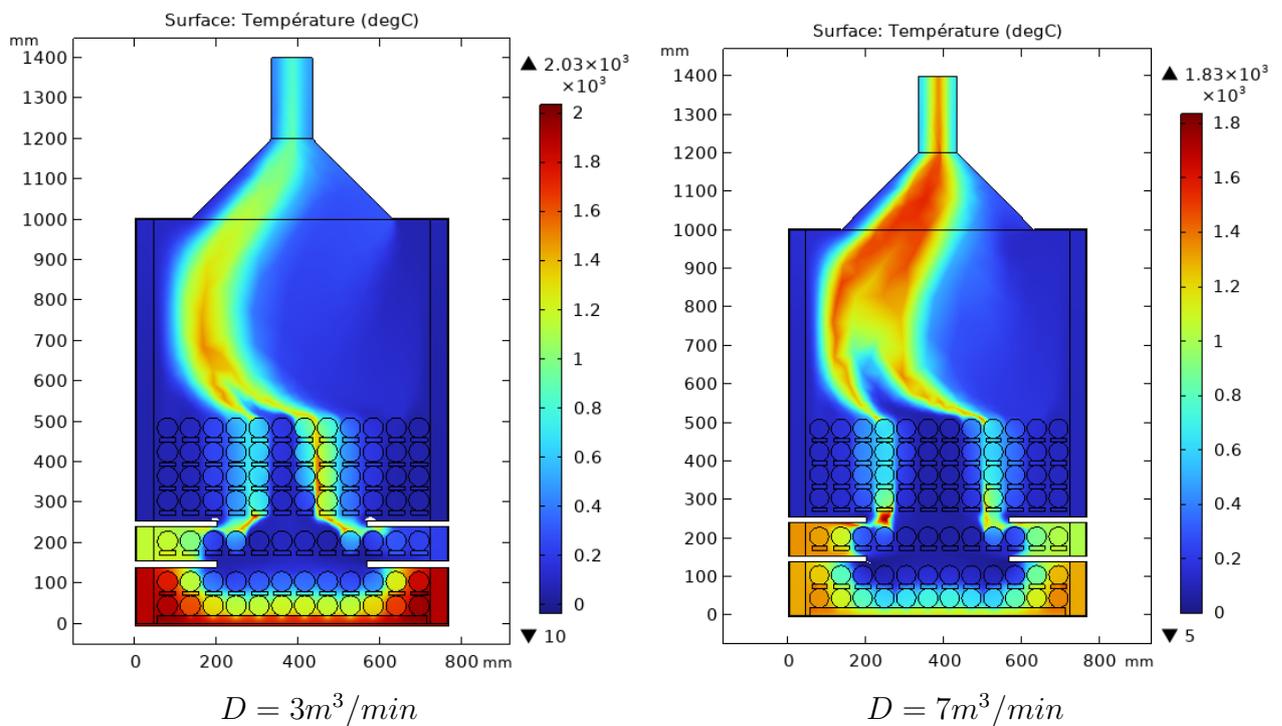


FIGURE 3.11 – Effet du débit d'air dans l'évolution de la Température dans le four selon le modèle avec GPL

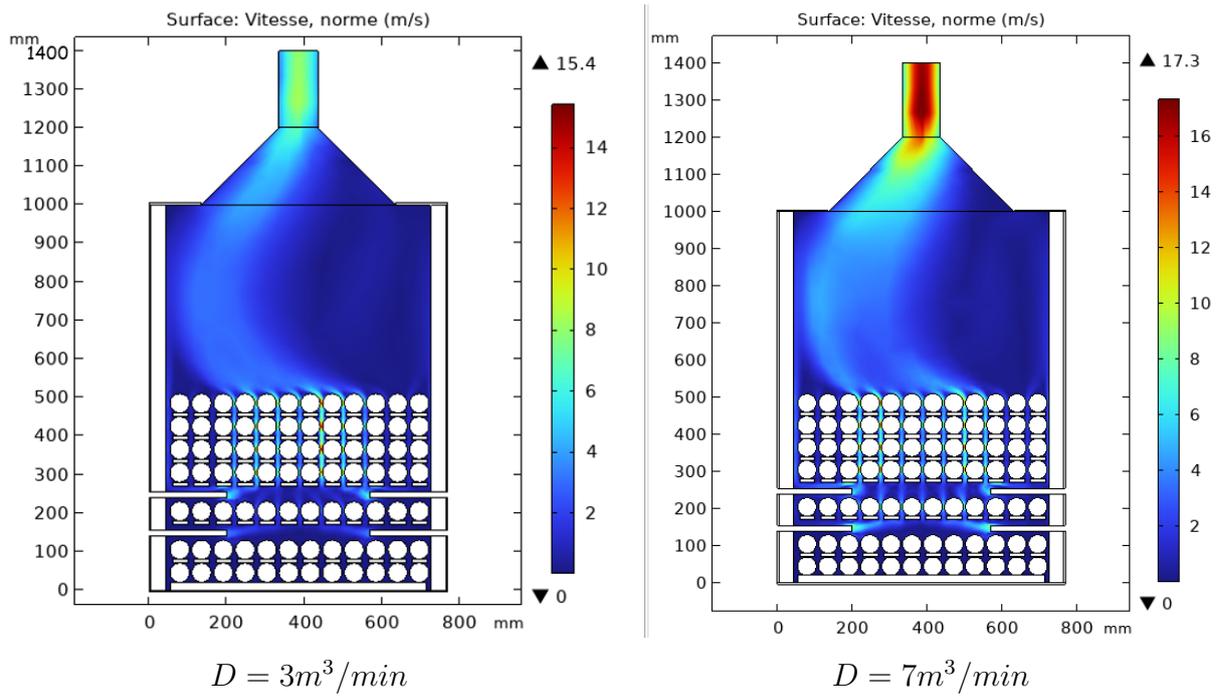


FIGURE 3.12 – Effet du débit d’air dans l’évolution de la Vitesse dans le four selon le modèle avec GPL

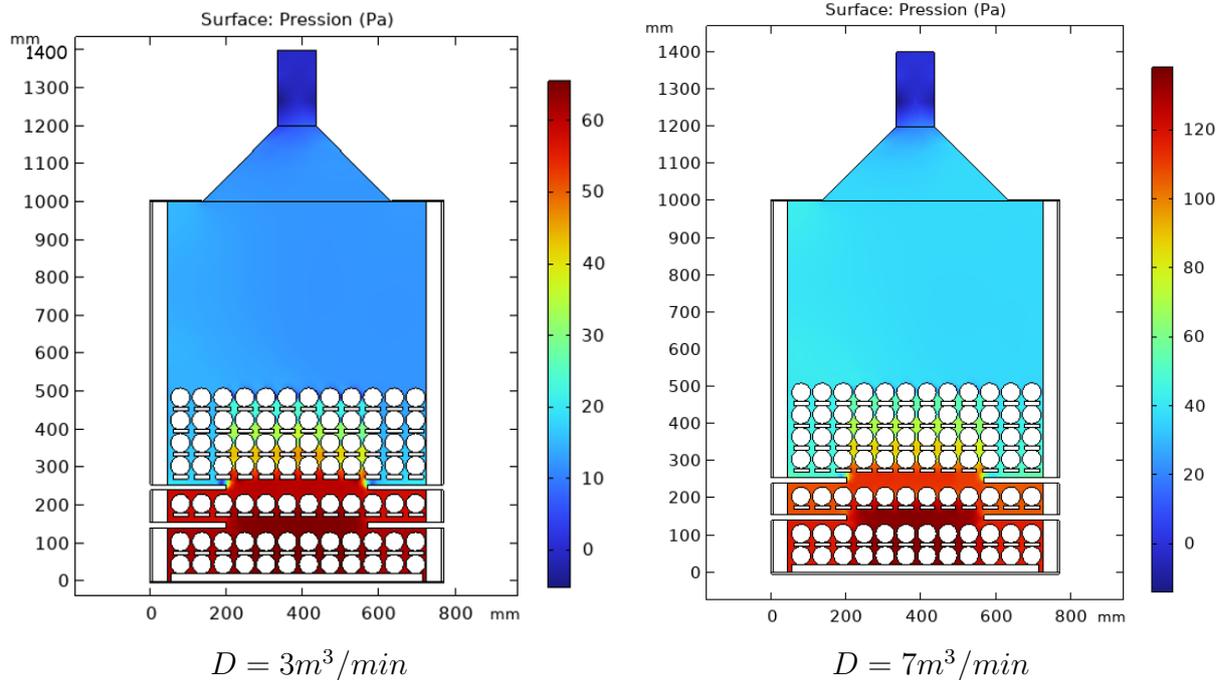


FIGURE 3.13 – Effet du débit d’air dans l’évolution de la Pression dans le four selon le modèle avec GPL

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, les résultats numériques obtenus ont été validés par une comparaison avec ceux de la littérature. Ensuite, les variations temporelles et spatiales de la température, de la vitesse et de la pression ont été présentées. Enfin, l'impact de la variation du débit d'air dans l'évolution de ces paramètres physiques a été montré. Ces résultats, très encourageants, ont permis d'évaluer numériquement et de façon efficace le fonctionnement du four dans sa globalité. Ce qui est souvent rare car la plupart des travaux de modélisation se font sur des fours vides, autrement dit sans la matière première.

# Conclusion générale et perspectives

Dans ce document, nous avons présenté la modélisation de la répartition de la chaleur dans un four vertical conçu pour la fabrication du clinker. Ce travail avait comme objectif de développer un modèle numérique fiable, capable de simuler et de prédire le comportement du four statique. Les résultats numériques obtenus sont très encourageants et en parfaite adéquation avec ceux de la littérature.

Cette étude a permis d'évaluer numériquement les hétérogénéités de température dans le four via COMSOL Multiphysics. Le module de transfert de chaleur dans les solides et dans les fluides, couplé au module d'écoulement turbulent et au module de transport des espèces concentrées, a permis d'évaluer les distributions spatiale et temporelle de la température, de la vitesse des fluides et de la pression dans l'ensemble du système. L'ajout de gaz GPL a permis d'élever la température du système avec une augmentation de 320 °C. Cette présente étude a aussi montré que le débit d'air a un impact considérable sur les paramètres physiques tels que la température, la vitesse et la pression.

Cependant, il serait intéressant de mixer le propane avec le butane, principaux constituants du GPL afin d'améliorer le fonctionnement du four et étudier si possible les émissions de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>. Il est également nécessaire d'inclure une étude temporelle à la deuxième configuration dans de futures travaux.

# Bibliographie

- [1] D. Wenjing, B. Wang, and L. Cheng, “Experimental research and numerical analysis on thermal dynamic characteristics of rotary kiln,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 97, pp. 1022–1032, Apr. 2019.
- [2] A. Adam and M. E. Mostafa, “Etude numérique de la combustion et des émissions de polluants de différents combustibles dans une chambre cylindrique,” *13<sup>ème</sup> Congrès de Mécanique (Meknès, MAROC)*, Avril 2017.
- [3] J. FESTA and G. DREUX, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Eyrolles, huitième ed., 1998.
- [4] T. BOUBEKEUR, “Matériaux de construction 01,” 2017.
- [5] S. SIARI, “Optimisation des paramètres physico-chimiques de la chaux Cas du four à chaux CEVITAL Constantine,” Master’s thesis, 2018.
- [6] L. G. NDIAYE, *Modélisation de la combustion en fours rotatifs d’incinération de déchets*. PhD thesis, 2009.
- [7] O. T. S. MAYI, *Modélisation des flammes et de la formation des polluants en micro et nano combustion*. PhD thesis, 2014.
- [8] SOBANE, “Fiche 1 (observation) : Le triangle du feu et les principes d’extinction,” Jan. 2004.
- [9] C. Y. ABDELHAK, “Modélisation de la combustion du méthane dans un four à flamme de diffusion turbulente,” Master’s thesis, Sept. 2014.
- [10] D. KOLANI, *Modélisation thermo-chimio-mécanique de la cokéfaction : contribution à la compréhension du mécanisme de poussée*. PhD thesis, Dec. 2013.
- [11] “Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) : définition, composition, chiffres clés sur le butane et le propane. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-de-petrole-liquefies-gpl>,” Apr. 2013.
- [12] “Butane ou propane : quelle différence et lequel choisir ? <https://selectra.info/energie/propane/difference-propane-butane>,” Nov. 2020.
- [13] G. Allaire, *Analyse numérique et optimisation : une introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique*. Editions de l’Ecole Polytechnique, 2005.

- [14] A. Zerizer, “Modélisation du transfert de chaleur à travers un panneau sandwich destiné à la construction : cas d’application par Comsol multiphysics,” Jan. 2014.
- [15] L. BASSENE, “Modélisation numérique du fonctionnement d’un four solaire : conception et validation,” Master’s thesis, Dec. 2019.
- [16] C. Multiphysics 6.0, “Syngas combustion in a round jet burner,” 2021.
- [17] S. Klayborworn and W. Pakdee, “Effects of porous insertion in a round-jet burner on flame characteristics of turbulent non-premixed syngas combustion,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 14, p. 100451, Apr. 2019.
- [18] I. Glassman and R. A. Yetter, *Combustion*. Amsterdam ; Boston : Academic Press, 4th ed., 2008.
- [19] A. Frassoldati, T. Faravelli, and E. Ranzi, “The ignition, combustion and flame structure of carbon monoxide/hydrogen mixtures. Note 1 : Detailed kinetic modeling of syngas combustion also in presence of nitrogen compounds,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 3471–3485, Oct. 2007.