

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie
Mécanique**

Option : Energétique.

Thème :

**Conception et réalisation d'une brique isolante
thermiquement et rigide mécaniquement**

Réalisé par

- ZEGGANE Walid

- BELAIDI Zohra

Encadré par

- Mr : S. MAKHLOUF

Promotion : 2024-2025

CARTE D'INFORMATION

EQUIPE D'ENCADREMENT

Encadrant	professeur, S. MAKHLOUF	Spécialité
		Recherche Scientifique Energétique Physique des serres Thermique du bâtiment Transferts de chaleur et de masse en milieux poreux Gel et dégel des sols Matériaux à changement de Phase

EQUIPE DE PROJET

Nom et prénom	Etablissement	Spécialité
ZEGGANE Walid	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Froid, Chaud et Climatisation
BELAIDI Zohra	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou	Energétique

Remerciements

Nous commençons par exprimer notre gratitude envers Allah, Le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à témoigner notre profonde reconnaissance à Monsieur S. MAKHLOUF, notre encadrant, pour son accompagnement précieux tout au long de ce mémoire. Ses remarques pertinentes, ses conseils éclairés et ses critiques constructives ont été d'une aide inestimable pour l'avancement de nos recherches.

Nous souhaitons également remercier l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique pour le savoir et l'expertise qu'ils nous ont généreusement transmis.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire :

À nos chers parents, pour leur amour indéfectible, leur patience infinie et leur présence silencieuse mais essentielle à chaque étape de notre vie.

À nos frères et sœurs, pour leur complicité, leur soutien discret et leurs mots d'encouragement toujours bienvenus.

À nos camarades et amis, avec qui nous avons partagé les joies, les difficultés, les nuits blanches, les réussites et les remises en question. Merci pour ces instants d'échange et d'encouragement, et pour cette aventure humaine que nous n'oublierons jamais. Merci pour votre esprit d'équipe, votre générosité et les souvenirs durables que nous avons tissés ensemble.

Et à nous-mêmes, pour avoir affronté chaque défi côte à côte. Merci pour la rigueur, la constance et ce travail d'équipe mené dans un esprit de respect, de complicité et de confiance.

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le contexte de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments à travers l'optimisation des matériaux de construction, en particulier les briques creuses en terre cuite. L'objectif principal est de réduire les pertes de chaleur tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes, en s'appuyant sur une meilleure compréhension des mécanismes de transfert thermique et sur une approche de conception innovante.

Dans un premier temps, une présentation générale des briques de construction est proposée, incluant leur composition, leurs procédés de fabrication et leurs caractéristiques mécaniques et thermiques. Le deuxième chapitre est consacré aux notions fondamentales du transfert thermique, en détaillant la conduction, la convection naturelle (notamment dans les cavités), le rayonnement thermique ainsi que les nombres sans dimension associés. Ce chapitre intègre également un état de l'art portant sur les études antérieures relatives aux performances thermiques des briques creuses et à leurs principales limites.

Le chapitre « Matériels et Méthodes » décrit la démarche expérimentale adoptée, incluant la conception et la réalisation de moules, ainsi que l'élaboration de prototypes de briques standards et de briques à géométrie optimisée, dans des conditions comparables. La modélisation mathématique repose sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, en utilisant l'approximation de Boussinesq pour la convection naturelle. La simulation numérique est réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent, basé sur la méthode des volumes finis.

L'interprétation des résultats met en évidence l'influence significative de la géométrie des cavités sur la répartition de la température, les flux thermiques et la résistance thermique globale. Les résultats montrent que la brique proposée

présente une amélioration notable des performances thermiques par rapport à la brique conventionnelle. Enfin, le dernier chapitre aborde la création d'entreprise, en proposant une vision de valorisation industrielle et économique du produit développé, soulignant son potentiel d'intégration dans le secteur du bâtiment.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de briques innovantes à haute performance thermique, contribuant à la réduction de la consommation énergétique et à la promotion de constructions plus durables.

Abstract:

This thesis focuses on improving the thermal performance of hollow clay bricks in order to reduce heat losses in buildings while maintaining adequate mechanical properties. The study is motivated by the growing demand for energy-efficient construction materials and sustainable building solutions.

First, a general overview of construction bricks is presented, including their composition, manufacturing processes, and thermo-mechanical characteristics. The second chapter introduces the fundamental concepts of heat transfer, covering conduction, natural convection in cavities, thermal radiation, and dimensionless numbers. It also includes a state-of-the-art review of previous studies on hollow bricks and their thermal limitations.

The “Materials and Methods” chapter describes the experimental approach adopted in this work, including the design and fabrication of molds and the production of two prototypes: a conventional hollow brick and a new optimized brick geometry, manufactured under similar conditions for comparison purposes. Mathematical modeling is based on the conservation equations of mass, momentum, and energy, with natural convection modeled using the Boussinesq approximation. Numerical simulations are carried out using ANSYS Fluent, based on the finite volume method.

The results analysis highlights the strong influence of cavity geometry on temperature distribution, heat fluxes, and overall thermal resistance. The proposed brick design shows improved thermal performance compared to the conventional brick. Finally, the last chapter discusses the creation of an enterprise, presenting a potential pathway for industrial and economic valorization of the developed product.

This work contributes to the development of innovative hollow bricks with enhanced thermal insulation, promoting energy efficiency and sustainability in the building sector.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	3
<i>Dédicace</i>	4
<i>Résumé</i> :.....	5
<i>Abstract</i> :.....	7
Liste des figures :.....	14
Liste des tableaux :	16
Nomenclature :	17
Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication de la brique creuse	6
I.1 Introduction :.....	7
I.2 Evolution de la brique au cours du temps :.....	7
I.3 Le rôle de la brique dans la construction :	8
I.4 Composition de la brique de construction :	9
I.4.1 L'Argile.....	9
I.4.2 Le sable.....	10
I.4.3 L'Eau	10
I.5 Fabrication industrielle de la brique creuse :	11
I.5.1 Présentation de l'entreprise (lieu du stage) :	11
I.5.2 Le processus de fabrication de la brique creuse :	11
I.5.3 L'extraction de l'argile :	12
I.5.4 La préparation :	13
I.5.5 Le façonnage :	14
I.5.6 Le Séchage : Maîtrise de l'Humidité et Prévention des Fissures	15
I.5.7 La Cuisson : Transformation finale de la brique :	17
I.5.8 L'emballage :	18
Chapitre II : Notions sur les transferts thermiques	19
II.1 Introduction :	20

II.2 État de l'art : Études sur les briques et leurs performances thermiques.....	20
II.3 Les modes de transfert thermique :	22
II.3.1 Définition des modes de transfert de chaleur :.....	23
II.4 Le rayonnement solaire :.....	32
II.4.1 La constante solaire :	33
II.4.2 La position du soleil par rapport à la terre :	33
II.4.3 Les composantes de rayonnement solaire :	38
II.5 Conclusion :	39
Chapitre III : Matériels et Méthodes	40
III.1 Introduction :.....	41
III.2 Matériaux utilisés :.....	41
III.2.1 Argile utilisée	41
III.2.2 Matériaux du moule	41
III.3 Réalisation des moules d'extrusion	42
III.3.1 Choix de la méthode de façonnage	42
III.3.2 Conception du moule d'extrusion :	42
III.4 Conclusion :	46
Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique	47
IV.1 Introduction :.....	48
IV.2 La modélisation numérique :.....	48
IV.2.1 La description du modèle physique :	48
IV.2.2 Les équations gouvernantes :	50
IV.3 Les conditions aux limites :	52
IV.4 Introduction à la simulation :	60
IV.4.1 DesignModeler :	60
IV.5 ANSYS Fluent :	64
IV.5.1 Introduction à ANSYS Fluent	64
IV.5.2 Méthode numérique et discrétisation	64

IV.5.3 La simulation numérique :	65
IV.6 Conclusion :	67
.....	68
Chapitre V : Résultats et discussion	68
V.1 Introduction	69
V.2 Représentation de différentes géométries :	69
V.2.1 La brique creuse standard :	69
V.2.2 La brique rectangulaire :	70
V.2.3 Nouvelle brique :	71
V.3 Résultats de la simulation :	71
V.3.1 Résultats de maillage :	71
V.3.2 Résultats de calculs numériques :	74
V.3.3 Comparaison entre les briques :	81
V.4 Conclusion :	83
Chapitre VI : Création d'une startup.....	84
VI.1 Présentation du projet :	85
VI.1.1 Présentation de l'équipe de projet :	85
VI.1.2 L'idée du projet (solution proposée) :	85
VI.1.3 Justification Stratégique :	86
VI.1.4 Valeurs proposés :	86
VI.1.5 Objectifs du projet :	87
VI.1.6 Calendrier de réalisation	88
VI.2 L'aspect innovant du projet :	89
VI.2.1 Nature de l'Innovation :	89
VI.2.2 Domaine d'Innovation	89
VI.2.3 Intensité d'innovation :	90
VI.3 L'analyse stratégique du marché :	90
VI.3.1 Segmentation du marché :	90

VI.3.2 Perspective de Conclusion de Contrats d'Achat (Révisée) :	92
VI.3.3 Intensité de la Concurrence	92
VI.3.4 Stratégie Marketing.....	93
VI.4 Plan de Production et Organisation (Briqueterie Innovante)	94
VI.4.1 Le Processus de Production	94
VI.5 . L'Approvisionnement (Briqueterie Innovante) :	96
VI.5.1 Détermination de la Politique d'Achat :	96
VI.5.2 Détermination des Fournisseurs les plus Importants	97
VI.5.3 Détermination de la Politique de Paiement et des Délais de Réception	97
VI.5.4 Gestion de la chaîne d'approvisionnement et optimisation des livraisons.....	97
VI.6 La Main-d'œuvre :	98
VI.6.1 Les qualifications des personnes :	98
VI.6.2 Le Nombre de postes Créés et leurs spécialités :	98
VI.7 Les Principaux Partenaires (Briqueterie Innovante) :	98
VI.7.1 Fournisseurs.....	98
VI.7.2 Collectivités et Institutions Publiques	99
VI.7.3 Centres de Recherche et Laboratoires	99
VI.7.4 Banques et Institutions Financières	99
V.4.4.5. Partenaires Commerciaux et Clients	99
VI.8 Prestataires de Services Logistiques	100
VI.9 Le plan financier du projet et Business Model Canvas (BMC).....	100
VI.9.1 Les coûts et charges :	100
VI.9.2 Charges d'exploitation :	101
VI.9.3 Coûts commerciaux et administratifs	101
VI.10 Le financement du projet.....	102
VI.11 . Le remboursement des crédits et emprunts :	102
VI.12 Justification économique du Business Model Canvas	102
VI.13 Prévision financière et analyse de rentabilité	103

VI.13.1 Hypothèses de production.....	103
VI.13.2 Hypothèse de prix de vente	103
VI.13.3 Chiffre d'affaire prévisionnel	103
VI.6. Résultat d'exploitation estimé.....	103
VI.7. Analyse de rentabilité	103
VI.14 Conclusion financière.....	104
Conclusion générale :	107
Bibliographies:.....	1

Liste des figures :

Figure I-1:Consommation d'énergie finale en Algérie(Farid Touloumi 2016)	2
Figure I-2 :Label européen(Razika 2013).....	2
FigureI-3:Répartition des déperditions thermiques dans une maison mal isolée(K. Imessad 2017).....	3
Figure I-4:Les différents types de briques	4
Figure I-1: Chaîne de fabrication de la brique creuse	11
Figure I-5:Block de brique façonnée	14
Figure II-1: Les modes de transfert thermique.....	22
Figure II-2: Les cellules de Rayleigh-Bénard (Vergnet. 2016).....	25
Figure II-3:La convection de Rayleigh Bénard avec un gradient de température horizontal	26
Figure II-4: La convection de Rayleigh-Bénard avec un gradient de température vertical	26
Figure II-5:a) Échange radiatif d'une surface ; b) Échange radiatif entre une surface avec son environnement	31
Figure II-6: Variation mensuelle de la constance solaire.....	33
Figure II-7:Définition des coordonnées terrestres d'un lieu.	34
Figure II-8: Trajectoire de la terre au tour du soleil et la déclinaison du soleil.	35
Figure II-9: La position du soleil selon les coordonnées horizontales.....	36
Figure II-10: Equation du temps en fonction de l'année	38
Figure III-1: Conception du moule sur SOLIDWORKS	42
Figure III-3: Usinages des supports cavités	43
Figure III-2:Découpage de la tôle	43
Figure III-4:Le moule finale	43
Figure III-5: Support cavités	43
Figure III-6 : Moule en acier.....	44
Figure III-7:Le moule déformé	45
Figure IV-1:Description du modèle physique.....	48
Figure IV-2: Condition aux limites	52
Figure IV-3: Le diagramme d'irradiation horizontale moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.	53
Figure IV-4: La hauteur du soleil moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.	54
Figure IV-5:Les propriétés du rayonnement solaire de différents matériaux(P.INCROPERA, et al. 2011)	55
Figure IV-6: Le diagramme de la vitesse du vent moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.....	56
Figure IV-8: Le diagramme de la température moyenne 2005-2023 en 21 Juin à midi	56

Figure IV-9:Les résistances thermiques des différentes parois (CNERIB 1997).....	58
Figure IV-10 : Les températures ambiantes des locaux l'intérieurs (CNERIB 1997)	58
Figure IV-11 : Représentation graphique de la méthode de Newton-Raphson.....	59
Figure IV-12 : Fenêtre de DesignModeler	61
Figure IV-13: Le maillage de tétraédrique	61
Figure IV-14: Insertion n de taille d'élément	62
Figure IV-15 : Maillage raffiné pour les cavités et les interfaces	63
Figure IV-16: La génération finale maillée	63
Figure IV-17 : Discrétisation d'un point unidimensionnelle par la méthode des volumes finis	65
Figure IV-18: Volume de contrôle en 2D	65
Tableau IV-19: Les propriétés de l'air à 30°C(J.P.Holman 2010).....	66
Figure IV-20 : Les propriétés de l'argile.	66
Figure V-1:Représentation de la brique standard.....	69
Figure V-2: Représentation de la brique rectangulaire	70
Figure V-3: Les dimensions de la nouvelle brique.....	71
Figure V-4 : Le maillage de la brique standard.....	72
Figure V-5 : Le maillage finale de la brique rectangulaire.	73
Figure V-6 : Le maillage finale de la nouvelle brique.	73
Figure V-7 : Evolution de la température dans la brique standard	74
Figure V-8: Répartition des isothermes dans la brique standard.....	74
Figure V-10 : Les ligne de courant de la brique standard	Error! Bookmark not defined.
Figure V-9: Affichage des vecteurs de vitesse dans les cavités de la brique standard	75
Figure V-11 : Le champ de température de la brique rectangulaire.	76
Figure V-12 : champ de vitesse de la brique rectangulaire.....	76
Figure V-13 : Les vecteurs vitesse de la brique rectangulaire.....	77
Figure V-14 : Les isothermes de la brique rectangulaire.	78
Figure V-15: Les lignes de courant de la brique rectangulaire.	78
Figure V-16 : Le champ de température de la nouvelle brique.	78
Figure V-17 : Le champ de vitesse de la nouvelle brique.	79
Figure V-18 : Les vecteurs vitesses de la nouvelles brique.	79
Figure V-19 : Les isothermes de la nouvelle brique.....	80
Figure V-20 : Les lignes de courant de la nouvelle brique.	80

Liste des tableaux :

Tableau I-1 :Norme de choix de l'argile(Shedd 1910)	10
Tableau I-2 : l'extraction de l'argile	12
Tableau I-3 : Le boxes de stockage de la matière première	12
Tableau I-4 : les différents types de broyeurs	14
Tableau IV-1: Résultats de la programmation	59
Tableau IV-2 : Conditions aux limites	60
Tableau V-1: Dimension de la brique standard.....	69
Tableau V-2 : Les dimensions de la brique rectangulaire.....	70
Tableau V-3 : Les dimensions de la nouvelle brique.....	71
Tableau V-4: Etude de la sensibilité de maillage dans la brique standard.....	72
Tableau V-5 : Etude de la sensibilité de maillage dans la brique rectangulaire	73
Tableau V-6: Etude de la sensibilité de maillage dans la nouvelle brique.....	74
Tableau V-7 : Le gradient de température et les résistances thermiques des briques de construction.	82
Tableau VI-1 :Processus de production.	95
Tableau VI-2 : Charge d'investissement	101
Tableau VI-3 : Charges d'exploitation	101
Tableau VI-4 : Cout commerciaux et administratifs	102
Tableau VI-5:Production	103
Tableau VI-6 : Résultat d'exploitation estimé	103
Tableau VI-7 : Bisness Model Canvas (BMC)	105

Nomenclature :

A	Surface d'échange [m^2]
Aa	Altitude solaire [$^\circ$]
Cp	Capacité thermique massique [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
ET	Équation du temps [min]
F	Force volumique [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$]
G	Flux solaire incident [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Ga	Rayonnement réfléchi (albédo) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
G_abs	Irradiation absorbée [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Gb	Rayonnement solaire direct [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Gd	Rayonnement solaire diffus [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Gg	Rayonnement solaire global [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Gh	Irradiation horizontale [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
Gv	Irradiation verticale [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
G	Accélération gravitationnelle [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
H	Hauteur angulaire du soleil [$^\circ$]
h_conv	Coefficient d'échange convectif [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
h_r	Coefficient d'échange radiatif [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
H_f	Humidité de façonnage [%]
H_r	Humidité résiduelle [%]
J	Jour
K	La conductance thermique [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]
L	Longueur caractéristique [m]
L_H	Dimension de la brique à l'état humide [m]
L_S	Dimension de la brique à l'état sec [m]
Lo	Longitude [$^\circ$]
M_H	Masse de la brique à la sortie du façonnage [kg]
M_S	Masse de la brique après séchage complet [kg]
M_S1	Masse à la sortie du séchoir industriel [kg]
M_S2	Masse sèche théorique (laboratoire) [kg]
Nu	Nombre de Nusselt

P	Pression [Pa]
Pr	Nombre de Prandtl
q	Puissance volumique dissipée [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]
q_cond	Flux thermique par conduction [W]
$\dot{q}_{\text{cond}}$	Densité de flux thermique par conduction [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
q_rad	Flux radiatif [W]
R	Nombre de Reynolds
R _b	Résistance de la brique [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R _{équi}	Résistance équivalente [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
TL	Temps légal [h]
T _p	Température de la paroi [K]
T _{p2}	Température de surface isotherme [K]
T _S	Température de la surface d'échange [K]
T _{SM}	Temps solaire moyen [h]
T _{SV}	Temps solaire vrai [h]
T _U	Temps universel [h]
T _∞	Température de l'air ambiant [K]
U _o	Vitesse caractéristique du fluide [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
U	Coefficient d'échange global [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]

Lettres grec :

α	Azimut solaire [°]
α_a	Absorptivité (taux d'absorption du rayonnement) [%]
β	Coefficient de dilatation thermique volumique [K ⁻¹]
δ	Déclinaison solaire [°]
ε	Émissivité de la surface [–]
λ	Conductivité thermique [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	Viscosité cinématique du fluide [m ² ·s ⁻¹]
ρ	Masse volumique [kg·m ⁻³]
σ	Constante de Stefan–Boltzmann [W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
φ	Latitude [°]
ω	Angle horaire [°]
ΔH	Différence de température entre la paroi et le fluide [K ou °C]
ΔT	Différence de température [K ou °C]
ΔL_S	Retrait sec [%]
$\Delta(K \cdot T)$	Variation de l'énergie par conduction [W]
$\mu\Phi$	Dissipation irréversible due au frottement visqueux [W]

Introduction générale

Introduction générale :

La qualité des ambiances intérieures est un sujet d'une grande importance en raison de son impact sur le confort thermique et les économies d'énergie dans le bâtiment. Toutefois, les pratiques architecturales du vingtième et du début du vingt-et-unième siècle ont eu recours aveuglement à la climatisation et à la consommation d'énergie pour la satisfaire sans que l'isolation thermique ne soit intégrée dans la conception architecturale. Cela a engendré des impacts très lourds sur l'environnement et sur la consommation énergétique mondiale.

En raison d'une forte urbanisation et de la croissance du parc immobilier, dans de nombreux pays, la consommation d'énergie atteint près de 25 à 40 % de la consommation globale (Lukas G. Swan and V. Ismet Ugursal 2009). C'est pour cette raison que l'amélioration de l'efficacité énergétique dans ce secteur est aujourd'hui un objectif primordial dans la stratégie énergétique mondiale.

« L'efficacité énergétique est rapidement devenue l'un des grands enjeux de notre époque et les bâtiments en sont une des composantes majeures. Le secteur du bâtiment consomme plus d'énergie que tout autre secteur et contribue donc dans une large mesure au changement climatique », souligne Björn Stigson, président du WBCSD (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD). « Sans mesures immédiates, des milliers de nouveaux bâtiments seront construits sans aucune considération pour l'efficacité énergétique et des millions de bâtiments existants consommant plus d'énergie que nécessaire seront toujours présents en 2050. Agir maintenant implique de réduire leur consommation énergétique et de faire de réels progrès en faveur de la lutte contre le changement climatique ». « Le marché ne pourra pas à lui seul introduire les changements nécessaires. La plupart des propriétaires et occupants de bâtiments ne sont pas assez informés sur la consommation d'énergie et ne s'en soucient pas suffisamment. Cette inertie est renforcée par les affirmations selon lesquelles les coûts sont trop élevés et les économies trop faibles. C'est pourquoi nous appelons à fournir un effort important, coordonné et mondial. Si nous pouvons faire cela, nous réduirons les émissions de gaz à effet de serre et stimulerons parallèlement la croissance économique », explique-t-il(KHARCHI 2013)

Près de 41 % de la consommation totale d'énergie en Algérie est allouée au secteur résidentiel dont 80 % est affecté au chauffage et au refroidissement (voir la figure2) (Farid Touloumi 2016). Cette dépense critique est aggravée par l'augmentation constante de la

Introduction générale

population, qui stimule l'expansion de l'urbanisme algérien, exigeant ainsi des solutions constructives plus efficaces pour les nouveaux bâtiments. Toutefois, malgré cette forte consommation, la performance énergétique moyenne de l'habitat en Algérie n'est que de 151 kWh/an, ce qui la classe seulement dans la colonne D du label énergétique européen (voir la figure1). Bien que ce classement soit "moyen" en théorie, il confirme que l'habitat algérien actuel reste toujours fortement énergivore(Razika 2013).

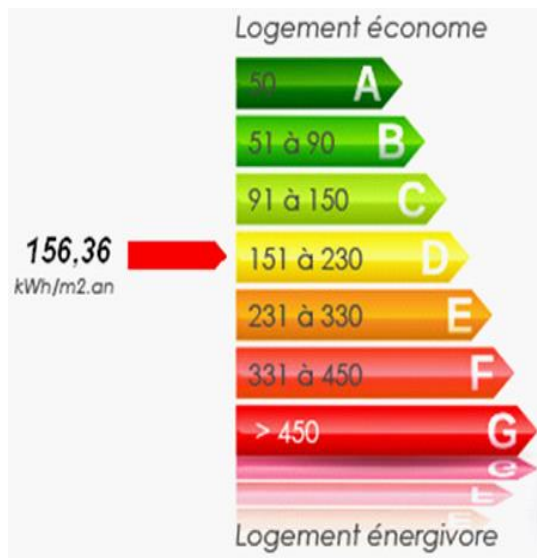


Figure I-2 :Label européen(Razika 2013)

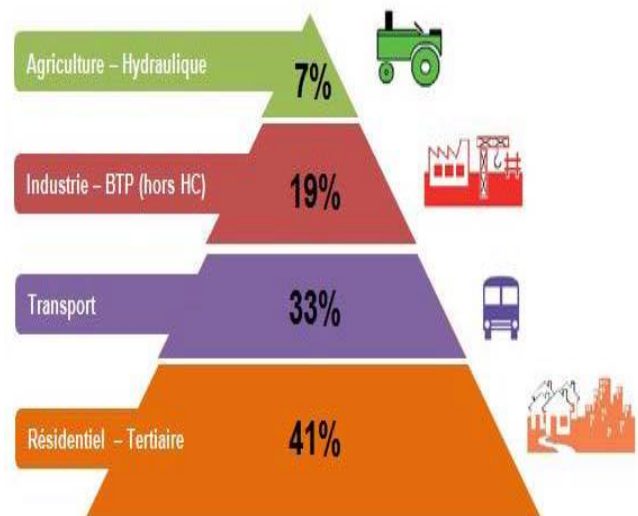


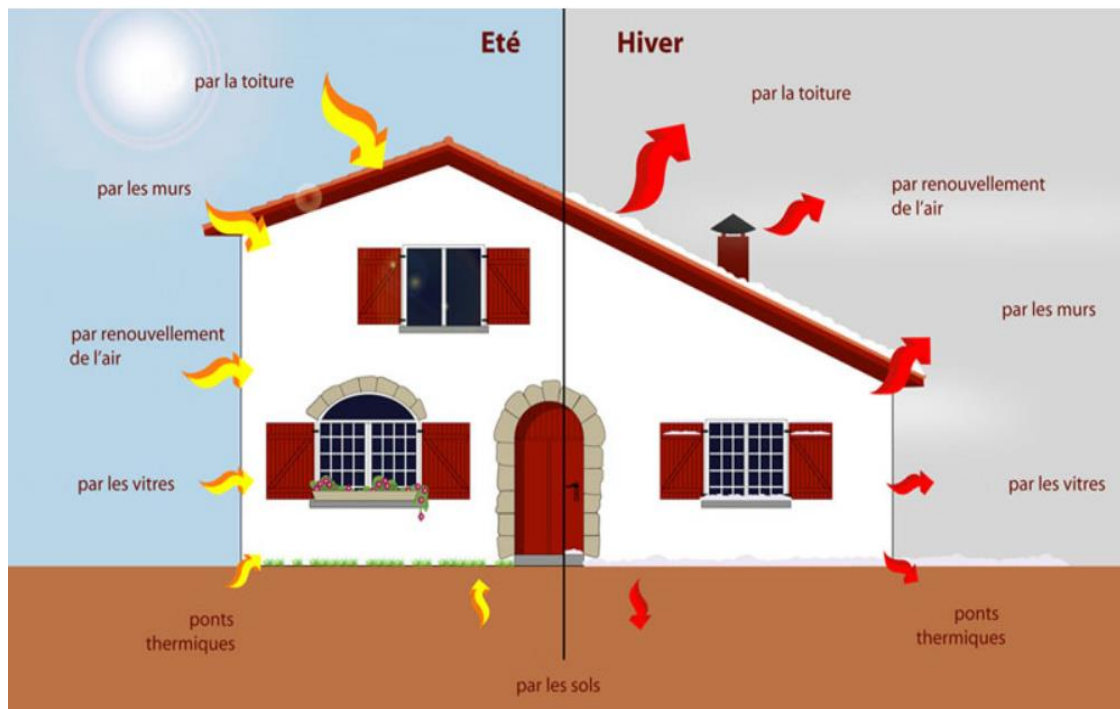
Figure I-1:Consommation d'énergie finale en Algérie(Farid Touloumi 2016)

Face à cette consommation énergétique élevée, il devient impératif d'identifier et de mettre en œuvre des procédés efficaces pour réduire la dépense du secteur résidentiel. Le comportement thermique d'un bâtiment est influencé par une multitude de paramètres, incluant sa forme, son orientation, mais surtout la qualité de ses éléments constructifs et de ses aménagements intérieurs.

Traditionnellement, la recherche de confort mène à une surconsommation d'énergie. Il est donc crucial d'inverser cette tendance : la première étape stratégique consiste à améliorer intrinsèquement la performance du bâtiment pour minimiser la demande énergétique nécessaire au chauffage et au refroidissement. Cette minimisation passe obligatoirement par la réduction des déperditions thermiques, c'est-à-dire les pertes de chaleur incontrôlées qui s'échappent de l'édifice vers l'extérieur.

Comme l'illustre la figure2, la majorité de ces déperditions se fait à travers l'enveloppe : par les murs extérieurs, la toiture, le plancher bas, les vitrages et le renouvellement de l'air.

Introduction générale



FigureI-3: Répartition des déperditions thermiques dans une maison mal isolée (K. Imessad 2017)

En conséquence, l'étude de la composition constructive des murs s'impose comme un point de départ essentiel. Ces murs sont des structures complexes constituées de plusieurs couches (structure porteuse, isolation, parement extérieur et finition intérieure).

Le problème principal ne réside pas uniquement dans le matériau majoritaire du mur, mais dans les ponts thermiques. Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire de l'enveloppe où la résistance thermique est significativement réduite, permettant à la chaleur de s'échapper rapidement. Ces faiblesses se trouvent souvent aux jonctions entre les éléments (par exemple, entre un plancher et un mur, ou autour d'un poteau).

Un exemple frappant de matériau qui, malgré sa légèreté, contribue à une mauvaise performance est la brique creuse. Bien que largement utilisée dans l'urbanisme algérien pour sa simplicité de mise en œuvre et son coût, la brique creuse, utilisée seule et sans isolation complémentaire, offre une faible résistance thermique, agissant comme un conduit de chaleur et participant directement aux déperditions importantes observées dans l'habitat actuel. Sa forme même est un facteur aggravant de la déperdition par conduction. En effet, les parois minces et solides qui définissent les alvéoles constituent un chemin de conduction préférentiel pour la chaleur. De plus, bien que l'air soit un isolant, les lames d'air internes sont souvent trop

Introduction générale

larges, permettant des phénomènes de convection (l'air chaud circule et transfère la chaleur) et de rayonnement qui transportent efficacement l'énergie d'une face à l'autre. Par conséquent, cette composition participe directement aux déperditions importantes observées dans l'habitat actuel.



Figure I-4: Les différents types de briques

Face à cette réalité incontournable où l'élément constructif dominant (la brique creuse) est structurellement inefficace sur le plan thermique et est un facteur aggravant de la consommation énergétique en Algérie, une question centrale s'impose :

Comment la modification de la forme constructive de la brique creuse, pourrait-elle constituer une solution efficace et durable pour réduire les déperditions thermiques et améliorer significativement la performance énergétique des bâtiments en Algérie ?

Afin d'apporter une réponse préliminaire et d'orienter nos investigations, nous formulons les hypothèses suivantes, qui feront l'objet d'une vérification par la modélisation et la simulation numérique :

- Hypothèse Principale : La modification de la géométrie interne de la brique creuse permettra de réduire significativement les déperditions thermiques par conduction, convection et rayonnement, conférant ainsi à la brique un coefficient de transmission thermique (U) inférieur à celui de la brique creuse standard.
- Hypothèse Secondaire 1 : L'utilisation de cette brique de forme optimisée dans la composition constructive du mur se traduira par une amélioration substantielle de la résistance thermique du mur complet, réduisant ainsi les besoins énergétiques du bâtiment par rapport à la brique existante.

Introduction générale

- Hypothèse Secondaire 2 : La nouvelle conception conservera une résistance mécanique suffisante pour les applications standards et sera techniquement et économiquement faisable à produire localement en Algérie.

Conclusion et plan à adopter :

La vérification de ces hypothèses et la quantification précise des gains thermiques nécessiteront le recours à une approche méthodologique rigoureuse basée sur la simulation numérique, notamment par l'utilisation de logiciels spécifiques de modélisation thermique « ANSYS ».

Cette démarche constitue l'objet principal des chapitres suivants :

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication de la brique creuse ; ce chapitre sera consacré à la présentation de l'entreprise d'accueil du stage pratique que nous avons effectué ainsi qu'à la description détaillée du processus industriel de fabrication de la brique creuse, tel qu'observé en milieu professionnel.

Chapitre II : Notions sur les transferts thermiques ; ce chapitre est consacré au rappels de quelques notions fondamentales de transferts thermiques, et des nombres adimensionnels que nous aurons à utiliser.

Chapitre III : Matériels et Méthodes ici

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique ; ce chapitre traite du modèle mathématique contenant les équations qui régissent le phénomène de la convection naturelle, et introduit les logiciels CFD utilisés.

Chapitre V : Interprétation des résultats de la simulation numérique

Chapitre VI : Création d'une entreprise

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication de la brique creuse

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

I.1 Introduction :

La brique constitue l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés dans le domaine du bâtiment. Grâce à sa disponibilité, sa durabilité et ses performances mécaniques et thermiques, elle a traversé les différentes civilisations et a évolué au fil du temps pour répondre aux exigences techniques et environnementales des constructions modernes. Son utilisation reste aujourd'hui largement répandue, aussi bien dans les bâtiments résidentiels que dans les ouvrages industriels.

Dans un contexte marqué par l'augmentation effrénée de la consommation énergétique du secteur du bâtiment et la recherche d'un meilleur confort thermique, la brique joue un rôle essentiel en tant qu'élément de l'enveloppe du bâtiment. Elle contribue à la résistance mécanique des structures, à la protection contre les agressions climatiques et à la régulation thermique des espaces intérieurs.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les aspects généraux relatifs à la brique de construction. Il débute par un aperçu historique retraçant l'évolution de l'utilisation de la brique au cours du temps, puis met en évidence son rôle et son importance dans le bâtiment. Les principales caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques de la brique sont ensuite abordées afin de mieux comprendre son comportement en service. Enfin, les différentes étapes de fabrication de la brique sont décrites, en s'appuyant sur les observations et les connaissances acquises lors du stage pratique effectué au sein d'une briqueterie.

I.2 Evolution de la brique au cours du temps :

La brique est l'un des premiers matériaux de construction utilisés par l'homme. Son évolution est étroitement liée au développement des civilisations et aux progrès techniques dans le domaine de la construction. Les premières briques, apparues il y a plusieurs millénaires, étaient fabriquées à partir d'argile moulée et séchée au soleil. Ces briques dites *cruës* ont été largement utilisées en Mésopotamie et en Égypte ancienne, notamment dans les régions où la pierre naturelle était rare. (Minke 2012)

L'apparition de la cuisson de l'argile dans des fours rudimentaires, vers le III^{ème} millénaire avant J.-C., a marqué une avancée majeure dans l'histoire de la brique. La brique cuite présentait une meilleure résistance mécanique et une durabilité accrue face aux conditions

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

climatiques, ce qui a permis son utilisation dans des constructions plus complexes durant l'Antiquité, en particulier dans les civilisations grecque et romaine.(Minke 2012)

Au Moyen Âge, la brique a connu une large diffusion en Europe et dans le monde arabo-musulman. Elle est devenue un matériau de construction privilégié dans plusieurs régions, notamment en Europe du Nord, où elle a donné naissance à des styles architecturaux spécifiques, tels que le gothique de brique. Les techniques de fabrication restaient toutefois majoritairement artisanales. (Childe 1950)

La Révolution industrielle a profondément transformé la production de la brique. L'introduction de procédés mécaniques, de l'extrusion et de fours industriels a permis une production à grande échelle, une meilleure homogénéité des dimensions et une amélioration des performances du matériau. Cette période a également marqué le début de la standardisation des briques utilisées dans le bâtiment.(Minke 2012)

L'évolution de la brique est caractérisée par l'intégration des exigences de performances thermique, mécanique et environnementale. Les briques modernes, souvent perforées ou alvéolées, sont conçues pour réduire la consommation énergétique des bâtiments tout en assurant une résistance mécanique suffisante. La brique demeure ainsi un matériau essentiel dans la construction durable.((CEN) 2015)

I.3 Le rôle de la brique dans la construction :

La brique occupe une place fondamentale dans le domaine de la construction en tant que matériau de base utilisé depuis l'Antiquité. Grâce à ses propriétés mécaniques, thermiques et de durabilité, elle contribue à la stabilité des ouvrages ainsi qu'au confort et à la sécurité des occupants.(Ugochukwu et Chukwuma 2025)

Sur le plan structurel, la brique est principalement sollicitée en compression et participe à la reprise des charges verticales dans les constructions en maçonnerie. D'un point de vue fonctionnel, la brique joue un rôle important dans la protection des bâtiments contre les agressions extérieures telles que les variations climatiques, l'humidité et le feu. Sa résistance au feu et sa durabilité en font un matériau particulièrement adapté aux constructions pérennes.((CEN) 2015)

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

Sur le plan thermique, la brique contribue à la régulation des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Sa masse thermique permet de stocker et de restituer la chaleur (de par son inertie thermique), tandis que les briques perforées ou alvéolées améliorent l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment.(Immessad 2017)

Enfin, la brique présente un intérêt économique et environnemental notable. Fabriquée à partir de matières premières naturelles et souvent locales donc disponibles en abondance, elle nécessite peu d'entretien et offre une longue durée de vie, ce qui réduit les coûts globaux du bâtiment et son impact environnemental.(Minke 2012)

Ainsi, la brique joue un rôle essentiel dans la construction en assurant simultanément des fonctions structurelles, thermiques, protectrices et économiques, ce qui explique sa large utilisation dans le contexte actuel du bâtiment durable.

I.4 Composition de la brique de construction :

La brique de construction est principalement fabriquée à partir de matières premières naturelles, dont la composition influe directement sur ses propriétés mécaniques, thermiques et physiques. La formulation de la composition de la brique est généralement optimisée afin d'assurer un bon compromis entre résistance mécanique, durabilité et performances thermiques.

I.4.1 L'Argile

L'argile constitue le composant principal de la brique. Elle est responsable de la plasticité du mélange à l'état humide, ce qui permet le façonnage par moulage ou extrusion. Après cuisson, l'argile assure la cohésion et la résistance mécanique de la brique. Sa composition minéralogique influence fortement le comportement au séchage et à la cuisson. L'argile doit posséder des caractéristiques précises en termes de composition chimique et de granulométrie pour garantir à la fois une bonne plasticité au façonnage et une résistance adéquate après cuisson. Le Tableau 1 ci-dessous récapitule les principales normes et critères utilisés pour la sélection et l'évaluation de la qualité de l'argile destinée à la fabrication des briques de terre cuite.(Shedd 1910)

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

La particule	La composition chimique	Les normes d'utilisation
Silice	SiO ₂	35 à 85 %
Alumine	Al ₂ O ₃	9 à 25 %
L'oxyde de calcium (chaux)	CaO	0 à 25%
L'oxyde de magnésium	MgO	0 à 25 %
Oxyde alcalin	K ₂ O+N ₂ O	1 à 5 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3 à 9 %
Oxyde de Titane	TiO ₂	0.3 à 2 %
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 à 3 %
Oxyde de carbone	CO ₂	0 à 13 %
Eau	H ₂ O	5 à 11 %

Tableau I-1 :Norme de choix de l'argile(Shedd 1910)

I.4.2 Le sable

Le sable est ajouté à l'argile afin de réduire la plasticité excessive et de limiter les phénomènes de retrait et de fissuration lors du séchage et de la cuisson. Il améliore également la stabilité dimensionnelle de la brique. Le sable est généralement constitué de silice (SiO₂). (Shedd 1910)

I.4.3 L'Eau

L'eau est un élément indispensable pour assurer la mise en forme de la brique. Elle permet l'obtention d'une pâte homogène et plastique. Son dosage doit être soigneusement

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

contrôlé, car un excès d'eau peut provoquer des déformations ou des fissures lors du séchage. ((CMHC). 1999)

I.5 Fabrication industrielle de la brique creuse :

I.5.1 Présentation de l'entreprise (lieu du stage) :

La Société Briqueterie IZERKHEF « SBI » où s'est déroulé notre stage est une unité de production majeure spécialisée dans une large gamme de produits en terre cuite. Elle fabrique notamment des briques (8 et 12 trous), des hourdis, ainsi que des céramiques comme les dalles de sol et le carrelage. SBI est stratégiquement implantée dans la zone industrielle AISSAT IDIR à Tizi-Ouzou. Créée le 19 juin 2013 sous le statut SARL BTI, la société est issue d'une initiative de jeunes promoteurs soutenus initialement par les dispositifs ANDI et ANSEJ, bénéficiant de l'attribution de son terrain en juin 2014 dans le cadre de l'ex-dispositif CALPIREF pour l'implantation de son projet.

I.5.2 Le processus de fabrication de la brique creuse :

La brique, l'un des plus anciens et des plus durables matériaux de construction, est le pilier de l'architecture moderne et traditionnelle. Sa production repose sur la transformation de

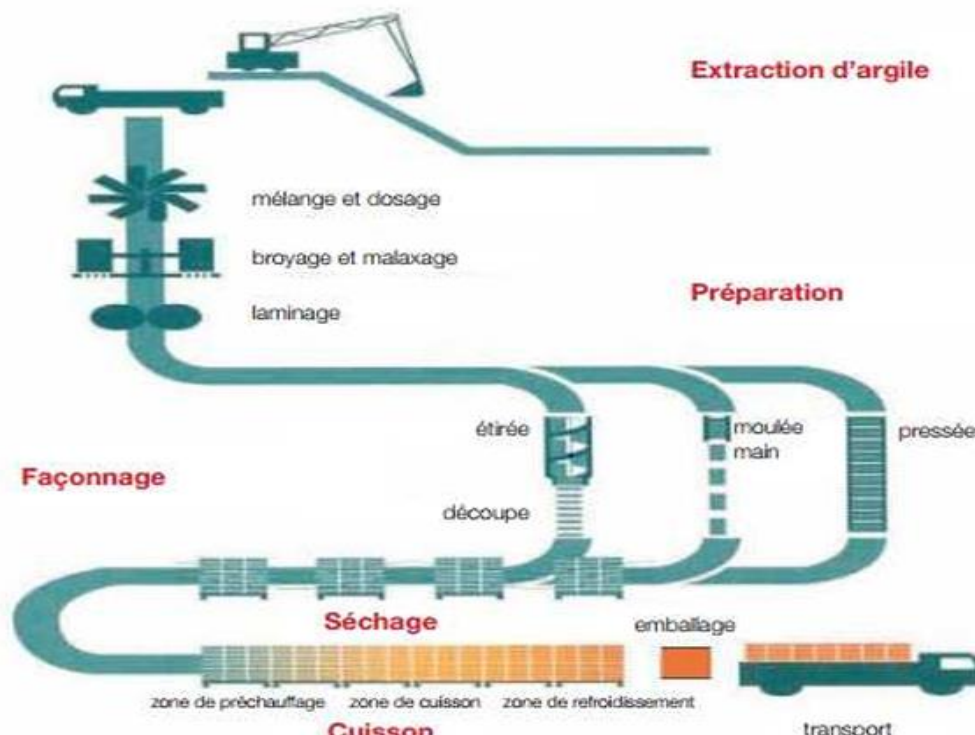


Figure I-1: Chaîne de fabrication de la brique creuse

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

la terre, un matériau local et abondant, à travers un processus industriel structuré qui garantit sa résistance et sa durabilité.

I.5.3 L'extraction de l'argile :

Les briques sont produites à partir d'un mélange de matières premières essentielles, principalement de l'argile et du tuf, complété par d'autres minéraux similaires. L'argile brute nécessaire à sa production est extraite par la Briqueterie IZERKHEF directement de ses carrières locales situées à proximité de l'usine, notamment dans les régions d'Aghrib et de Mekla, assurant ainsi une maîtrise totale de l'approvisionnement.



Tableau I-2 : l'extraction de l'argile

Dès l'extraction, l'argile subit ses premières transformations sur le site du gisement. Le processus débute par le décapage de la couche superficielle (la découverte) afin d'éliminer les impuretés et les matériaux non désirés. Une fois cette étape réalisée, l'argile brute est extraite, débarrassée des roches résiduelles, puis chargée dans des camions. Elle est ensuite transportée jusqu'à la briqueterie où elle est stockée.



Tableau I-3 : Le boxes de stockage de la matière première

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

Ce stockage, d'une durée d'environ six mois, est essentiel : il permet le pourrissage (ou maturation) de l'argile, un processus naturel qui augmente son homogénéité et sa plasticité, la rendant plus souple et plus facile à façonner.

I.5.4 La préparation :

La préparation de la matière première constitue la phase essentielle de la fabrication, dont l'objectif primordial est d'obtenir une masse argileuse homogène et suffisamment plastique pour garantir la qualité et la stabilité dimensionnelle du produit fini.

Cette étape s'articule autour de deux opérations principales :

1. Le Broyage et le Malaxage : Ces opérations permettent d'assurer l'homogénéité des composants en affinant leur granulométrie et en optimisant leur teneur en eau.
2. Le Dosage précis et le Mélange : C'est ici qu'intervient l'élaboration spécifique de la pâte. Elle est composée d'un mélange de deux types d'argile, auxquels est incorporé un dégraissant, selon les proportions suivantes :

- Argile Jaune : 67%
- Argile Grise : 20%
- Dégraissant : 13%

L'incorporation de 13% de dégraissant (composé à parts égales de 50% de sable et 50% de tuf) est cruciale. Cet ajout technique permet de réduire le retrait de l'argile durant les phases ultérieures de séchage et de cuisson, assurant ainsi la stabilité dimensionnelle finale des briques.

Au sein de la SBI, cette préparation s'effectue à travers une série de quatre broyeurs enchaînés, assurant une réduction progressive de la granulométrie :

1. Brise-Mottes : Réduction du diamètre initial à 30 mm
2. Desagréateur : Affinage de la granulométrie à 25 mm
3. Broyeur Intermédiaire : Selon la saison, on utilise soit le Broyeur à Marteaux (en été) soit le Broyeur à Cylindre (en hiver), pour atteindre 20 mm.
4. Broyeur à Cylindre Dégrossisseur : La matière est finalement broyée à une granulométrie très fine de 2 mm.

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

Après cette étape de broyage intensif, la pâte passe dans le Mouilleur-Malaxeur où elle est pétrie et rendue homogène. Elle est ensuite stockée dans des boxes de maturation pendant une période pouvant atteindre six mois. Ce stockage prolongé est crucial pour optimiser la souplesse et la plasticité de l'argile avant le façonnage.



Le Brise Motte



Le Desagréateur



Broyeur à cylindres

Tableau I-4 : les différents types de broyeurs

1.5.5 Le façonnage :

Une fois cette préparation parachevée, la matière première est dirigée vers l'étape de façonnage, qui remplit deux rôles fondamentaux :

- Assurer la Cohésion et la Plasticité : Le façonnage vise à consolider la cohésion de la pâte, notamment par l'élimination de l'air occlus (désaération). La plasticité est encore améliorée grâce à un mouillage additionnel, souvent par injection de vapeur d'eau sous pression, et par une intensification de la compression de la pâte.
- Définir la Forme du Produit Final : L'argile est ensuite contrainte de prendre la forme désirée pour le marché : briques creuses (sous leurs différentes formes), tuiles, ou hourdis.



Figure I-2:Block de brique façonnée

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

Dès que le produit sort de la mouleuse (extrudeuse) à une pression de 18 à 20 bars, il est immédiatement dédié au découpage aux dimensions standards. Les pièces vertes ainsi obtenues sont ensuite empilées avec soin sur des chariots (ou charriots) pour être acheminées vers le processus de séchage.

I.5.6 Le Séchage : Maîtrise de l'Humidité et Prévention des Fissures

Le séchage est une étape critique qui suit le façonnage et précède la cuisson. Son objectif principal est de retirer l'excès d'eau des briques crues pour garantir leur intégrité structurelle.

I.5.6.1 Objectifs du Séchage

Le séchage est une étape critique visant à réduire drastiquement la teneur en eau des briques crues, dont l'humidité initiale est appelée humidité de façonnage (H_f). Les briques sortant de la mouleuse possèdent une teneur en eau élevée, se situant généralement entre 18% et 24%. La quantification précise de cette humidité est cruciale pour le contrôle du processus et la prédiction du retrait, et elle est calculée selon la relation suivante : ((CMHC). 1999)

$$H_f = \frac{M_H - M_S}{M_S} \times 100 \quad (I-1)$$

H_f : Humidité de façonnage (en pourcentage, %)

M_H : Masse de la brique à la sortie du façonnage (masse humide, en g ou kg)

M_S : Masse de la brique après séchage complet (masse sèche, en g ou kg)

Le processus de séchage utilise un mécanisme de séchoir rapide pour réduire cette teneur en eau jusqu'à atteindre l'humidité résiduelle souhaitée.

Le séchage est considéré comme terminé lorsque les briques atteignent une humidité résiduelle inférieure à 3%. Ce taux faible est essentiel pour éviter l'éclatement ou les défauts lors de la cuisson. Elle est calculée par la formule suivante : ((CMHC). 1999)

$$H_r = \frac{M_{S1} - M_{S2}}{M_{S2}} \times 100 \quad (I-2)$$

H_r : Humidité résiduelle (en pourcentage, %)

M_{S1} : Masse de la brique à la sortie du séchoir industriel (avant cuisson).

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

M_{S2} : Masse de la brique après séchage complet en laboratoire dans une étuve à 105 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (masse théoriquement sèche).

L'évaporation de l'eau durant le séchage induit la formation de vides au sein de la masse argileuse. Ce processus entraîne le rapprochement et la liaison des particules d'argile, ce qui se manifeste macroscopiquement par une réduction des dimensions de la brique, phénomène désigné sous le nom de retrait sec. Il est donné comme suit : ((CMHC). 1999)

$$\Delta L_S = \frac{L_H - L_S}{L_H} \times 100 \quad (I-3)$$

ΔL_S : Retrait Sec (exprimé en pourcentage, %)

L_H : Longueur, largeur ou hauteur de la brique à l'état humide (après façonnage, avant séchage).

L_S : Longueur, largeur ou hauteur de la brique à l'état sec (après séchage, avant cuisson).

I.5.6.2 Organisation du Séchoir

Afin de prévenir les fissures dues aux chocs thermiques (gradients de température trop abrupts), le séchoir est structuré en quatre zones distinctes à volumes différents. Cette conception permet une distribution progressive et contrôlée de la chaleur, allant généralement de 38 °C à 80 °C.

Chaque zone est équipée de :

- Moteurs de distribution de chaleur pour assurer une répartition uniforme de la température.
- Déshumidificateurs qui garantissent l'évacuation efficace de l'humidité extraite.

I.5.6.3 Fin de Processus et Contrôle :

À la sortie du séchoir, malgré l'objectif d'une humidité résiduelle basse, le produit peut légèrement reprendre de l'humidité de l'environnement (reprise d'humidité), généralement entre 0,3% et 0,5%.

Les wagons de briques séchées sont ensuite soumis à un contrôle de qualité rigoureux avant l'étape finale d'empilage qui les prépare pour l'entrée dans le four de cuisson.

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

I.5.7 La Cuisson : Transformation finale de la brique :

La cuisson est la dernière étape thermique que subit l'argile façonnée et séchée, transformant le "cru" en la brique de terre cuite finale, dotée de sa résistance et de sa couleur définitive.

I.5.7.1 Le Four Tunnel (Fonctionnement continu) :

La Briqueterie SARL BTI utilise un four continu de type four tunnel. Ce type de four est caractérisé par un fonctionnement sans interruption, où le feu ne s'éteint jamais. Le chargement des briques est introduit et extrait du four suivant un cycle régulier, assurant un rendement industriel élevé.

Les briques séchées, empilées sur des wagons de terre réfractaire, traversent le tunnel rectiligne et passent successivement par les trois zones principales :

- Zone de Préchauffage (30°C à 360 °C) :

À l'entrée du four, la température s'élève progressivement (de l'ambiance jusqu'à environ 360 °C). L'échauffement est principalement assuré par la chaleur récupérée des fumées émanant de la zone de cuisson. Cette étape permet d'éliminer totalement l'humidité résiduelle des briques.

- Zone de Cuisson (850 °C à 1200 °C) :

La température augmente graduellement jusqu'à atteindre la température de cuisson maximale. Cette température est propre à chaque mélange d'argile (sa "courbe de cuisson" spécifique) et est généralement comprise entre 850 °C et 1200 °C. C'est ici que se produisent les transformations physico-chimiques (vitrification) conférant sa dureté à la brique.

- Zone de Pré-refroidissement :

Après le pic de température, la température est diminuée progressivement jusqu'au refroidissement complet. Cette progression est essentielle pour éviter les chocs thermiques qui pourraient fissurer le produit.

Chapitre I : Étude du procédé industriel de fabrication

I.5.7.2 L'Influence de l'Atmosphère sur la couleur :

L'atmosphère du four a un impact direct sur la coloration des briques, notamment en raison de la présence de fer (argile généralement ferrugineuse) :

- Cuisson en Oxydation (avec apport d'oxygène) : C'est la méthode la plus courante, qui produit la teinte rouge "normale".
- Atmosphère Réductrice (sans apport d'oxygène) : Elle produit des couleurs plus foncées.
- Réduction Partielle : Elle permet d'obtenir des teintes fortement nuancées.

I.5.8 L'emballage :

Après la cuisson, les briques sont conditionnées pour être transportées et stockées. Ce processus suit plusieurs étapes :

1. Palettisation et Formation des Paquets : Les briques sont assemblées et empilées en plusieurs couches sur des pieds (souvent des palettes ou des supports de transport) afin de former des paquets compacts et stables.
2. Emballage (Encapuchonnage) : Ces paquets sont ensuite introduits dans un système d'emballage. Ils sont encapuchonnés par des films de plastique, qui sont scellés et fixés à l'aide d'un séchoir (ou d'un système de thermo-rétraction).
3. Cerclage et Sécurisation : Pour garantir la sécurité et la rigidité du transport, les paquets sont finalement sécurisés par des encerceuses verticales et horizontales qui appliquent des feuillards (bandes rigides en acier ou en plastique) tout autour de la charge.

Les paquets de briques, désormais prêts à être manipulés, sont ensuite déplacés à l'aide de chariots élévateurs vers le parc de stockage. Ce parc est rigoureusement organisé en fonction du type de produit (briques 8 trous, 12 trous, hourdis, etc.) pour faciliter la gestion des stocks et l'expédition.

Chapitre II : Notions sur les transferts thermiques

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

II.1 Introduction :

La thermodynamique décrit les échanges d'énergie entre un système et son environnement sous forme de travail et de chaleur, sachant qu'elle se limite à l'analyse des états initial et final sans détailler les mécanismes et les vitesses de transfert. Le transfert de chaleur comble cette limite en étudiant les modes de propagation thermique et en déduisant les relations qui nous permettent de quantifier les flux de chaleur. (P.INCROPERA, et al. 2011).

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les relations fondamentales de transfert thermique afin d'analyser les échanges thermiques au niveau de la brique creuse.

II.2 État de l'art : Études sur les briques et leurs performances thermiques

Les briques creuses en terre cuite sont largement utilisées comme unités de maçonnerie pour leurs performances structurelles, acoustiques et thermiques. Dans les bâtiments modernes, les murs porteurs construits avec des briques creuses représentent une part importante de l'enveloppe thermique, mais leur efficacité énergétique reste souvent insuffisante sans optimisation du matériau ou de la géométrie des cavités. (Fioretti et Principi 2014)

Plusieurs travaux ont montré que le transfert thermique dans les briques creuses résulte de la conduction dans la matière solide, de la convection naturelle de l'air emprisonné dans les cavités et du rayonnement entre les parois internes.

Incropera et al. (2007) expliquent que, dans les cavités fermées, la convection naturelle est gouvernée par le nombre de Rayleigh, et que lorsque celui-ci dépasse une valeur critique, des cellules convectives apparaissent, augmentant les pertes thermiques.

Çengel & Ghajar(2015) montrent que le rayonnement thermique peut représenter une part significative du transfert global dans les cavités d'air, en particulier lorsque les surfaces internes ont une émissivité élevée.

Bejan (2013) met en évidence que la géométrie des cavités influence fortement l'intensité de la convection naturelle, et que des cavités étroites ou compartimentées permettent de réduire les échanges convectifs.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

L'optimisation de la forme et du nombre de cavités est l'un des axes majeurs de recherche pour améliorer la résistance thermique des briques.

Vera et al. (2014) ont réalisé une étude numérique par éléments finis montrant que l'augmentation du nombre de cavités et la réduction de leur largeur diminuent la convection interne, ce qui conduit à une réduction du coefficient de transmission thermique U jusqu'à 30 %.

Cuce et al. (2020) ont étudié des briques en béton léger avec différentes géométries internes. Leurs résultats indiquent que des cavités disposées en quinconce améliorent la résistance thermique tout en conservant une rigidité mécanique acceptable.

Del Coz Díaz et al. (2011) ont montré que la forme polygonale des cavités permet de perturber les mouvements convectifs, réduisant ainsi les pertes thermiques par convection naturelle.

Le rayonnement thermique interne constitue une part importante des pertes thermiques, en particulier dans les briques creuses classiques.

Principi & Fioretti (2014) ont étudié l'application de revêtements à faible émissivité sur les parois internes des cavités. Ils ont montré une réduction du transfert radiatif jusqu'à 60 %, entraînant une baisse significative de la conductivité thermique équivalente.

Baetens et al. (2010) confirment que la diminution de l'émissivité des surfaces internes est un moyen efficace d'améliorer la performance thermique sans modifier la géométrie de la brique.

Des valeurs expérimentales et normatives montrent que les briques creuses seules offrent une isolation limitée.

Selon la réglementation thermique algérienne (DTR C3-2), une brique creuse de 20 cm présente une résistance thermique moyenne de 0,35 à 0,45 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$, insuffisante pour répondre aux exigences énergétiques modernes sans solution complémentaire.

ASHRAE (2017) indique que les matériaux maçonneries doivent être combinés à une isolation ou optimisés géométriquement pour atteindre des performances thermiques satisfaisantes.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

Le présent travail s'inscrit dans une démarche visant à réduire les pertes de chaleur au sein des briques creuses en terre cuite, tout en améliorant leurs performances thermique et mécanique. Pour ce faire, une analyse approfondie des différents modes de transfert de chaleur : conduction, convection naturelle et rayonnement, est menée afin d'évaluer leur influence sur la résistance thermique globale de la brique.

II.3 Les modes de transfert thermique :

Le transfert thermique est un échange d'énergie qui est causé par une différence de températures entre deux corps. Chaque fois que le gradient de température existe dans un milieu ou entre des milieux, un transfert de chaleur se produit.

Comme le montre la figure II.1, on distingue trois types de processus de transfert de chaleur appelés modes. Lorsqu'un gradient de température existe dans un milieu stationnaire quel que soit son état de matière ; solide ou fluide, on utilise le terme conduction.

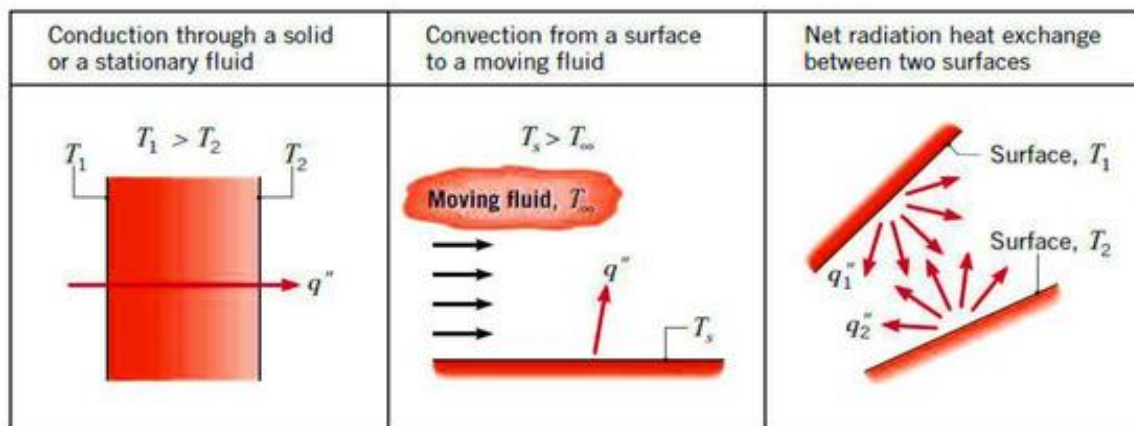


Figure II-1: Les modes de transfert thermique

Par ailleurs, le terme convection fait référence aux échanges thermiques entre une surface et un fluide qui est en mouvement (instationnaire).

Enfin, le dernier mode de transfert de chaleur est le rayonnement thermique. Toutes les surfaces, à températures différentes, émettent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques à condition de l'absence d'un milieu intermédiaire.(P.INCROPERA, et al. 2011)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

II.3.1 Définition des modes de transfert de chaleur :

II.3.1.1 La conduction :

Lorsqu'il existe un gradient de température dans un corps, l'expérience a montré qu'il y a un transfert d'énergie de la région chaude vers la région froide. On dit que l'énergie est transférée par conduction et que le taux de transfert par unité de surface est proportionnel au gradient normal de température.(P.INCROPERA, et al. 2011)

$$\dot{q}_{cond} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \left[W/m^2 \right] \quad (II-1)$$

Avec :

- $\dot{q}_{cond}$: la densité de flux [W/m^2].
- λ : la conductivité thermique [$W/m.K$].
- $\frac{\partial T}{\partial x}$: le gradient de température suivant la direction de flux thermique.

Le flux thermique est donnée par :

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} [W] \quad (II-2)$$

Avec :

- $\dot{Q}_{cond}$: le flux thermique[W].
- A : la surface [m^2].

II.3.1.2 La convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides (liquides ou gaz) qui est en mouvement.

La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre deux zones ayant différentes températures; ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui échangent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement entre elles.(ANA-MARIA BIANCHI 2004)

Le transfert de chaleur par convection est fortement influencé par les propriétés des fluides, telles que la viscosité dynamique, la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique, ainsi que le type d'écoulement (laminaire ou turbulent), jouant un rôle crucial. Par conséquent, les relations de transfert thermique par convection sont considérées comme complexes en raison de cette multitude de variables.

Le taux de transfert thermique par convection est proportionnel à la différence de température, qu'on peut exprimer facilement par la loi de refroidissement de Newton.(YUNUS et AFSHIN 2015)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

$$\dot{q}_{conv} = \frac{\dot{Q}_{conv}}{A} = h_{conv}(T_S - T_{\infty}) \quad (II-3)$$

Avec :

- $\dot{q}_{conv}$: la densité de flux de chaleur [W/m^2].
- h_{conv} : le coefficient d'échange convectif [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].
- T_S : la température de la surface d'échange [$^\circ C$].
- T_{∞} : la température de l'air ambiant assez loin de la surface [$^\circ C$].

D'autre part on a :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv}A(T_S - T_{\infty}) \quad (II-4)$$

Avec :

- $\dot{Q}_{conv}$: le flux de chaleur [W].
- A : la surface d'échange [m^2].

La convection se situe à l'interaction entre deux champs d'étude : le transfert thermique et la mécanique des fluides. On peut considérer deux types de convection, en fonction des causes qui produisent le mouvement de fluide : la convection forcée et la convection naturelle.(ANA-MARIA BIANCHI 2004)

II.3.1.2.1 La convection forcée :

La convection forcée se manifeste quand le mouvement du fluide est une conséquence des actions extérieures imposées (pompe, ventilateur, vent...etc.). Dans ce cas, le champ de température est transféré par un écoulement extérieur imposé on ignore le couplage réciproque entre le champ des vitesses et le champ de température.(ANA-MARIA BIANCHI 2004)

II.3.1.3 La convection naturelle :

La convection naturelle ou libre est produite par un mouvement de fluide, engendrée par une différence de la masse volumique entre les parties froides et chaudes du fluide.

La distribution de température engendre son propre mouvement en créant des forces d'Archimède rotationnelle.(ANA-MARIA BIANCHI 2004)

II.3.1.3.1.1 La convection naturelle dans la cavité :

Le déplacement de la chaleur du milieu solide vers le milieu fluide est d'abord fait par conduction dans la couche de particules fluides proches de la paroi (principe d'adhérence), les particules libres sont ensuite chauffées par contact et subissent un déplacement par poussée d'Archimède dû au gradient de masse volumique résultant du gradient de température. Le

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

déplacement de la chaleur à l'intérieur de la cavité se fait par convection dite de Rayleigh-Bénard.(SALHI. 2015, Said Bouabdallah 2016)

II.3.1.4 La convection de Rayleigh-Bénard :

Les particules de fluide en contact avec la paroi chauffée absorbent de l'énergie thermique, ce qui entraîne la formation d'une couche de fluide chaud. Sous l'effet de l'élévation de température, leur masse volumique diminue, les rendant plus légères que le fluide environnant. Elles sont alors mises en mouvement par la poussée d'Archimède et s'élèvent du milieu chaud vers le milieu plus froid. Ce déplacement favorise les échanges thermiques par contact entre particules chaudes et froides. En atteignant la paroi froide, le fluide se refroidit en cédant sa chaleur à la paroi, retrouve une masse volumique plus élevée et redescend par gravité vers la zone chauffée, établissant ainsi un mouvement convectif continu.(BELMILOUD. 2016, DJAMILA BENYOUCEF 2018)

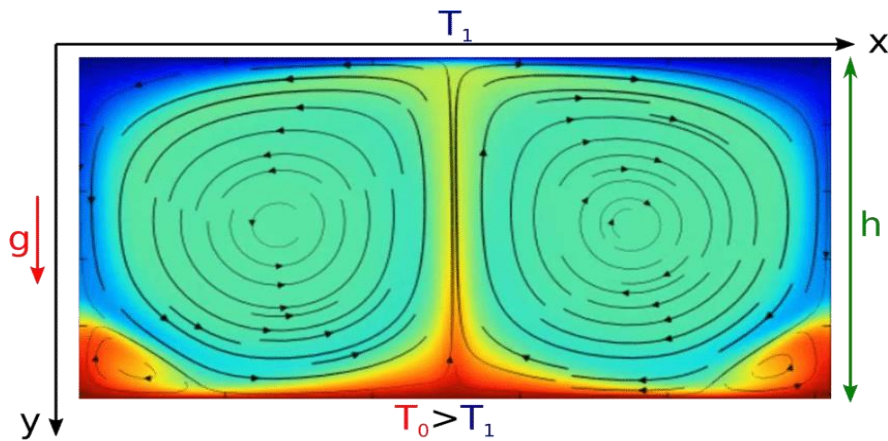


Figure II-2: Les cellules de Rayleigh-Bénard (Vergnet. 2016)

Ce phénomène est représenté pour un écoulement de convection naturelle horizontale et verticale à température T_c et T_f avec $T_c > T_f$.

1^{er} cas : Cavité avec un gradient horizontal de température :

Dans ce cas de figure, les parois verticales sont l'une chauffée et l'autre refroidie tandis que les parois horizontales sont adiabatiques. L'écoulement est sous forme d'un vortex où le fluide est ascendant le long de la paroi chaude et descendante sur la paroi froide.(DJAMILA BENYOUCEF 2018, Duffie et A.Beckman 2013)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

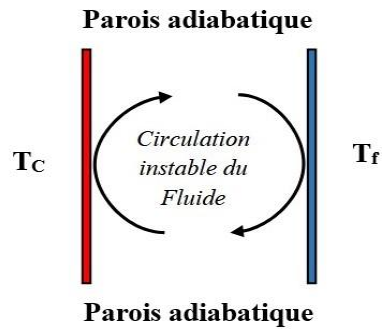


Figure II-3: La convection de Rayleigh Bénard avec un gradient de température horizontal

2^{ème} cas : Cavité avec un gradient de température vertical :

Les parois horizontales sont l'une chauffée (T_c) et l'autre refroidie (T_f) tandis que les parois verticales sont considérées comme adiabatiques, cependant les particules chaudes se déplacent du bas en haut. (DJAMILA BENYOUSSEF 2018)

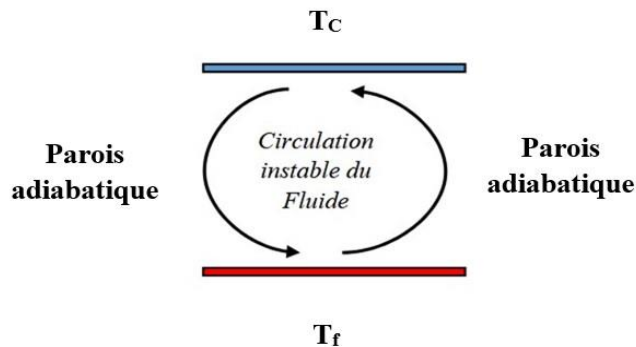


Figure II-4: La convection de Rayleigh-Bénard avec un gradient de température vertical

II.3.1.4.1 La convection mixte :

La convection mixte correspond à un mode de transfert thermique dans lequel la convection naturelle et la convection forcée interviennent simultanément. Elle se produit lorsque le mouvement du fluide est à la fois induit par les forces de flottabilité dues aux différences de températures et par une action mécanique externe, tel que le vent ou la ventilation. (P. INCROPERA, et al. 2011)

II.3.1.4.2 Les nombres adimensionnels :

Les nombres sans dimension sont des paramètres adimensionnels obtenus par la combinaison de grandeurs physiques fondamentales. Ils permettent de caractériser les régimes d'écoulement

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

et de transfert thermique, de comparer des phénomènes physiques et d'établir des lois de similitude indépendantes des unités utilisées.

Dans l'étude des transferts thermiques, ces nombres jouent un rôle essentiel dans l'analyse de la conduction, de la convection et du rayonnement.(P.INCROPERA, et al. 2011)

II.3.1.4.2.1 Nombre de Reynolds (Re) :

Le nombre de Reynolds (Re) permet de caractériser le régime d'écoulement d'un fluide en comparant les forces d'inertie aux forces visqueuses.(Pritchard. 2011)

$$Re = \frac{\text{les forces d'inertie}}{\text{les forces visqueuses}}$$

$$Re = \frac{U_0 \cdot L}{\vartheta} = \frac{\rho \cdot U_0 \cdot L}{\mu} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

- Re : le nombre de Reynolds.
- U_0 : la vitesse moyenne du fluide.
- L : longueur caractéristique.
- ϑ : la viscosité cinématique du fluide.
- ρ : la masse volumique.
- μ : la viscosité dynamique.

Selon sa valeur, l'écoulement peut être laminaire, de transition ou turbulent.

Le mode d'écoulement est déterminé à partir de la valeur du nombre de Reynolds : un écoulement laminaire est observé pour $Re < 2300$, un régime de transition pour $2300 \leq Re \leq 4000$, et un écoulement turbulent pour $Re > 4000$.(Pritchard. 2011)

II.3.1.4.2.2 Nombre de Prandtl (Pr) :

Le nombre de Prandtl, qui caractérise les propriétés thermophysiques d'un fluide, est défini comme le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement et la diffusivité thermique.(YUNUS et AFSHIN 2015)

Il est donné par la relation suivante :

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

- Pr : Nombre de Prandtl
- C_p : la capacité thermique massique.
- λ : la conductivité thermique.
- μ : la viscosité dynamique.

Le nombre de Prandtl permet de comparer la capacité d'un fluide à diffuser la chaleur à sa capacité à diffuser la quantité de mouvement. (YUNUS et AFSHIN 2015)

$Pr \ll 1$: la chaleur se diffuse plus rapidement que la quantité de mouvement.

$Pr \approx 1$: diffusion thermique et diffusion de quantité de mouvement sont comparables.

$Pr \gg 1$: la diffusion de quantité de mouvement est dominante.

II.3.1.4.2.3 Nombre de Grashof (Gr) :

Le nombre de Grashof (Gr) est un nombre sans dimension qui caractérise la convection naturelle en comparant les forces de flottabilité aux forces visqueuses dans un fluide soumis à un gradient de température. Il est défini comme une fonction de la différence de température, des propriétés thermophysiques du fluide et d'une longueur caractéristique. Lorsque le nombre de Grashof augmente, les effets de la convection naturelle deviennent prédominants par rapport à la conduction thermique est défini par : (Bejan. 2013)

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (II-7)$$

Avec :

- Gr : nombre de Grashof.
- g : accélération gravitationnelle.
- β : coefficient de dilation thermique volumique.
- L : longueur caractéristique
- ΔT : différence de température entre la paroi et le fluide.
- ν : viscosité cinématique.

II.3.1.4.2.4 Nombre de Nusselt (Nu) :

Le nombre de Nusselt exprime le rapport entre le transfert thermique par convection et celui par conduction et constitue un paramètre fondamental pour l'évaluation du coefficient de convection, il est donné par la relation suivante :(Duffie et A.Beckman 2013)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

$$Nu = \frac{h_{conv} \cdot L}{\lambda} \quad (\text{II-8})$$

Avec :

- Nu : le nombre de Nusselt.
- h_{conv} : le coefficient de transfert thermique.
- L : la longueur caractéristique.
- λ : la conductivité thermique du fluide.

Le nombre de Nusselt traduit le rôle de la convection par rapport à la conduction dans les échanges thermiques entre une surface et un fluide.

Si $Nu=1 \rightarrow$ transfert purement conductif

Où $Nu>1 \rightarrow$ convection dominante

II.3.1.4.2.5 Nombre de Rayleigh (Ra) :

Le nombre de Rayleigh (Ra) est un nombre sans dimension qui caractérise l'intensité de la convection naturelle dans un fluide soumis à un gradient de température. Il est défini comme le produit du nombre de Grashof (Gr) et du nombre de Prandtl (Pr) (J.P.Holman 2010)

$$Ra = \frac{\text{Poussée d'Archimède}}{\text{les forces de trainée visqueuse} \times \text{taux de diffusion de la chaleur}}$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu \cdot \alpha} = Gr \cdot Pr \quad (\text{II-9})$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot Cp} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

- Gr : le nombre de Grashof.
- Pr : nombre de Prandtl.
- g : Accélération gravitationnelle.
- L : Longueur caractéristique.
- T_p : Température de la paroi.
- T_∞ : Température du fluide loin de la paroi.
- β : Coefficient de dilatation thermique volumique.
- ν : Viscosité cinématique.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

- ρ : Masse volumique.
- α : Diffusivité thermique.
- C_p : Capacité thermique massique.
- λ : Conductivité thermique.

II.3.1.5 Le transfert de chaleur par rayonnement :

Le rayonnement thermique correspond à l'énergie émise par toute matière dont la température est supérieure au zéro absolu. Cette émission peut provenir de surfaces solides, de liquides ou de gaz. Contrairement à la conduction et à la convection, le transfert de chaleur par rayonnement s'effectue par le biais d'ondes électromagnétiques, ce qui explique qu'il puisse se produire sans la présence d'un milieu matériel, et même être plus efficace dans le vide. (P.INCROPERA, et al. 2011)

Le rayonnement émis par une surface est directement lié à l'énergie thermique de la matière qui la constitue. Il est caractérisé par la puissance émissive surfacique E exprimée en W/m^2 . La loi de Stefan-Boltzmann établit la valeur maximale de cette puissance et s'écrit : (P.INCROPERA, et al. 2011)

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (II-11)$$

Avec :

- ε : l'émissivité de la surface.
- σ : la constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2 \cdot K^4$].
- T_s : la température absolue de la surface [K].

L'émissivité est un paramètre sans dimension compris entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Elle traduit l'aptitude d'une surface réelle à émettre de l'énergie thermique par rayonnement par rapport à un corps noir idéal. Cette propriété dépend fortement de la nature du matériau ainsi que de l'état de surface (rugosité, oxydation, finition). (P.INCROPERA, et al. 2011)

Le rayonnement thermique reçu par une surface peut provenir de différentes sources, telles que le rayonnement solaire ou les surfaces environnantes. L'irradiation G représente le flux de rayonnement incident par unité de surface. Une partie de ce rayonnement est absorbée par le matériau, ce qui entraîne une augmentation de son

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

énergie thermique. Le flux absorbé par unité de surface est donné par : (P.INCROPERA, et al. 2011)

$$G_{abs} = \alpha_a G \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (II-12)$$

Avec :

- G_{abs} : L'irradiation absorbée.
- α_a : le taux d'absorption (absorptivité) [%].
- G : le flux incident.

La figure II.5 représente les échanges radiatifs d'une surface et d'une surface avec son environnement :

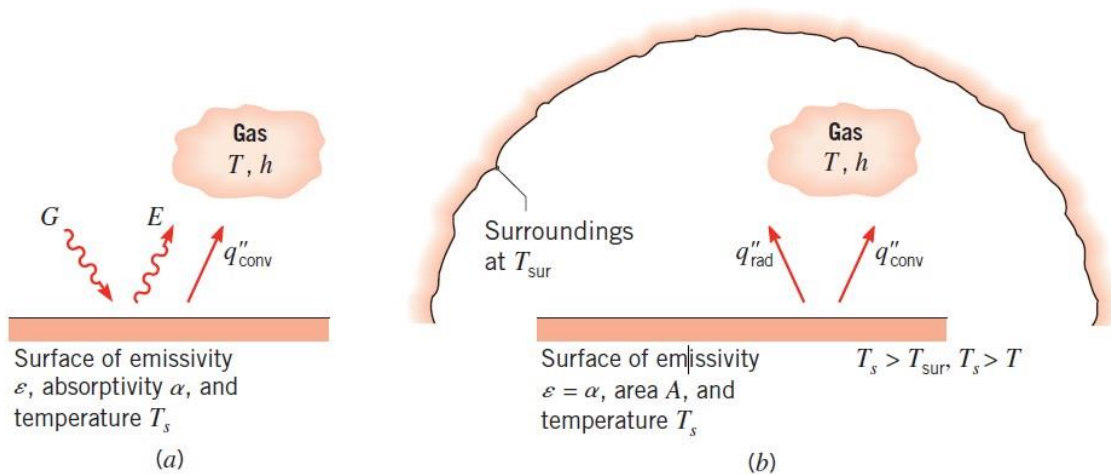


Figure II-5:a) Échange radiatif d'une surface ; b) Échange radiatif entre une surface avec son environnement

Dans de nombreux problèmes d'ingénierie thermique, les liquides sont considérés comme opaques au rayonnement thermique, tandis que les gaz sont généralement transparents. Les solides peuvent être opaques, comme les métaux, ou semi-transparentes, comme certains polymères ou matériaux semi-conducteurs. (P.INCROPERA, et al. 2011)

II.3.1.5.1 Échange radiatif entre surfaces :

Dans le cas d'un échange radiatif entre une petite surface à la température T_s et une grande surface isotherme à la température T_{sur} , le rayonnement incident peut être assimilé à celui émis par un corps noir à la température T_{sur} . Si la surface est considérée comme grise, le flux radiatif net par unité de surface s'exprime alors par (P.INCROPERA, et al. 2011) :

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

$$\dot{q}_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_S) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_{sur}^4) \quad (II-13)$$

Cette relation traduit la différence entre l'énergie thermique émise par la surface et celle qu'elle absorbe. Pour faciliter les calculs, notamment dans les problèmes couplés avec la convection, cette expression peut être linéarisée sous une forme analogue à la loi de Newton du refroidissement:(P.INCROPERA, et al. 2011)

$$q_{rad} = h_r A (T_S - T_{sur}) \quad II-14)$$

Avec :

- q_{rad} : le flux radiatif [W].
- A : la surface d'échange [m²].
- T_s : la température absolue de la petite surface [K].
- T_{sur} : la température de la grande surface [K].
- h_r : le coefficient d'échange radiatif [W/m². K].

Le coefficient d'échange radiatif est alors donné par :

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_S + T_{sur})(T_S^2 + T_{sur}^2) \quad II-15)$$

Cette approche permet de modéliser le rayonnement thermique de manière similaire à la convection, en rendant le flux proportionnel à la différence de température. Toutefois, il est important de souligner que le transfert de chaleur par rayonnement dépend fortement de la température, contrairement à la convection où cette dépendance est généralement plus faible.(P.INCROPERA, et al. 2011)

II.3.1.5.2 Couplage convection–rayonnement

Dans de nombreuses situations pratiques, une surface échange simultanément de la chaleur par convection avec le fluide environnant et par rayonnement avec les surfaces voisines. Le flux thermique total échangé par la surface s'écrit alors (P.INCROPERA, et al. 2011):

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} = hA(T_S - T_{sur}) + \varepsilon \sigma A(T_S^4 - T_{sur}^4) \quad (II-16)$$

II.4 Le rayonnement solaire :

Le soleil est la source de la d'énergie qui nous arrive sur terre sous forme de rayonnement électromagnétique L'environnement est plein d'objet (ciel, arbres, véhicules...)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

qui absorbe et émis le rayonnement solaire, ce qui influence sur le comportement thermique du bâtiment.(BERNARD. 2004, DIAW. 2005). L'énergie solaire qui atteint la surface du bâtiment dépend directement de son orientation et la position du soleil.(DIAW. 2005)

II.4.1 La constante solaire :

La valeur du rayonnement solaire "G", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne "G₀" appelée constante solaire est de l'ordre de 1366 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de "I_c" en fonction du numéro du jour de l'année "j" par la relation suivante :(Modest 2013)

$$G = G_0[1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times j)] \quad (\text{II-17})$$

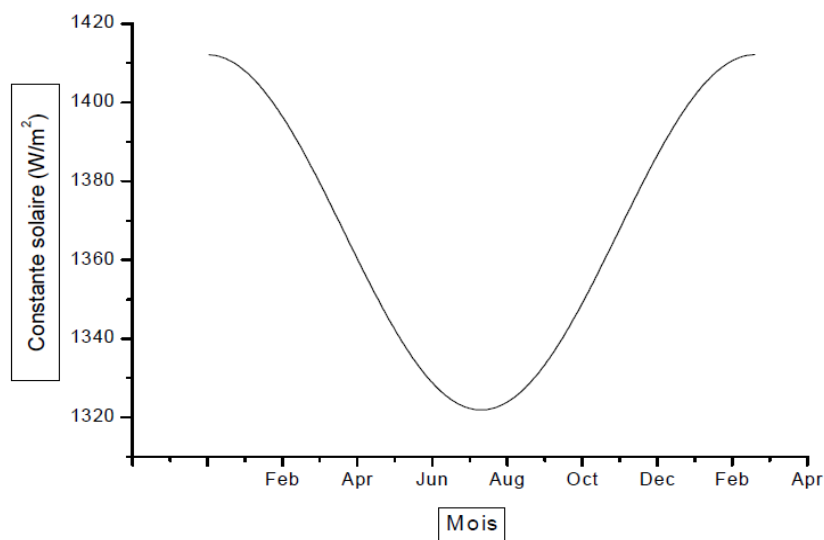


Figure II-6: Variation mensuelle de la constance solaire

II.4.2 La position du soleil par rapport à la terre :

II.4.2.1 Les cordonner géographiques :

La sphère terrestre est divisée par l'Equateur en deux demi sphères appelées : hémisphère Nord (boréal), située au pôle nord, et hémisphère sud (austral), située au pôle sud.

D'autre part elle est partagée d'Ouest en Est par le méridien qui passe par Greenwich repéré par l'arc en bleu sur la figure si dessous : (BERNARD. 2004)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

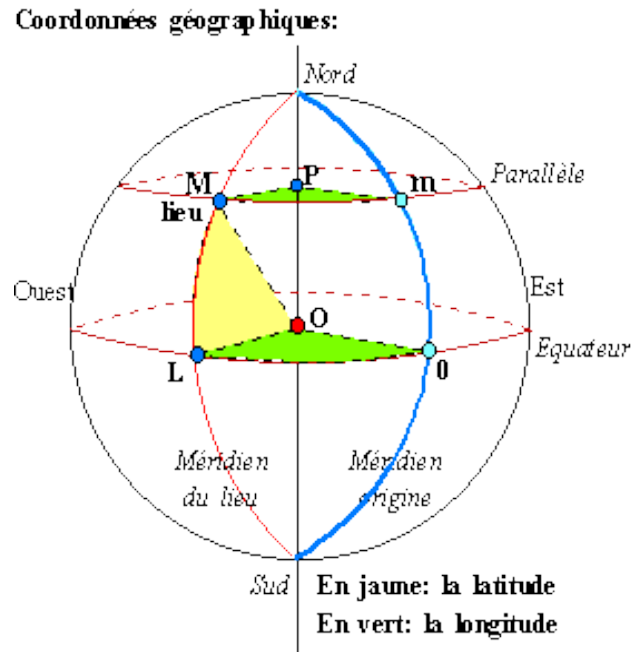


Figure II-7: Définition des coordonnées terrestres d'un lieu.

a) La longitude

C'est l'angle que fait le plan méridien qui passe par ce lieu avec le plan méridien d'origine (Greenwich). Elle est positive (0° à 180°) vers l'est et négative (0° - 180°) vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.(BERNARD. 2004)

b) La Latitude(φ) :

La latitude est l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre avec l'équateur. Il est positif sur l'hémisphère Nord (de 0° à 90°), et négatif sur l'hémisphère Sud.(BERNARD. 2004)

c) L'Altitude(A_a) :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre un point et une surface de référence (niveau de la mer), elle est mesurée en mètre.(BERNARD. 2004)

II.4.2.2 Les coordonnées célestes horaires :

- La voûte céleste :

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

Concept astronomique issu de l'Antiquité, qui décrit l'hémisphère située au-dessus de l'observateur, lui permettant de positionner les différents astres dans le ciel et de leur donner des coordonnées précises.(BERNARD. 2004)

- L'angle horaire (ω) :

L'angle horaire c'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan équatorial le méridien origine (zénith). Il est nul (0°) à midi, ensuite il varie de 15° par heure positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :(BERNARD. 2004)

$$\omega = 15 \times (TSV - 12) \quad (II-18)$$

Avec :

- ω : l'angle horaire.
- TSV : le temps solaire vrai.

- La déclinaison (δ) :

La déclinaison du soleil c'est l'angle entre l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil. Il varie symétriquement tout le long de l'année de -23.26° à 23.26° , on le donne par la relation suivante :(BERNARD. 2004, Laurent CADET. (2015). Étude du couplage convection-rayonnement en cavité différentiellement chauffée a haut nombre de Rayleigh en ambiances habitables 2015)

$$\delta = 23.45 \times \sin \left(\frac{360}{365} \times (284 + j) \right) \quad (II-19)$$

J : est le nombre de jour de l'année partir du premier janvier.

La figure si dessous représente la position terre-soleil et la variation de δ durant l'année (Duffie et A.Beckman 2013, BERNARD. 2004)

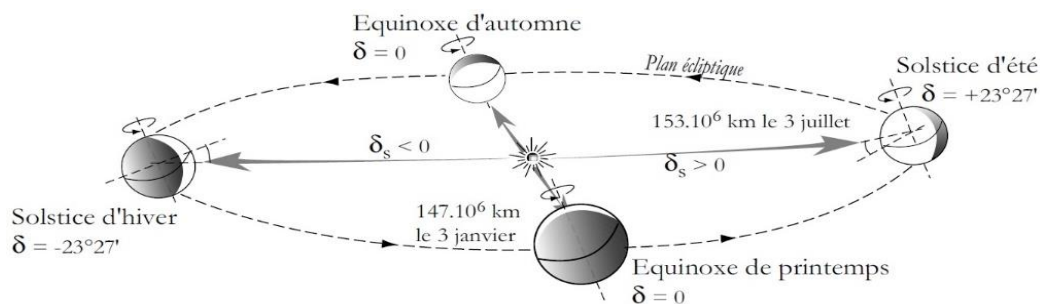


Figure II-8: Trajectoire de la terre au tour du soleil et la déclinaison du soleil.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

II.4.2.3 Coordonnées célestes horizontales :

- La hauteur angulaire (h) :

C'est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal. Il est compté de 0° à 90° si l'astre se trouve dans l'hémisphère Nord, et de 0° à 90° s'il se trouve sur l'hémisphère sud. (BERNARD. 2004, Duffie et A. Beckman 2013)

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\sin(h) = \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\varphi \cdot \sin\delta \quad (\text{II-20})$$

- Azimut (α) :

C'est l'angle entre la direction du soleil et la direction Sud. On peut le compter la positivement de 0 à +180° vers l'Ouest et négativement de 0 à -180° vers l'Est.

La relation qui donne l'azimut est donnée par : (BERNARD. 2004, Duffie et A. Beckman 2013)

$$\sin a = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos h} \quad (\text{II-21})$$

La figure suivante représente la position du soleil selon les coordonnées horizontales :

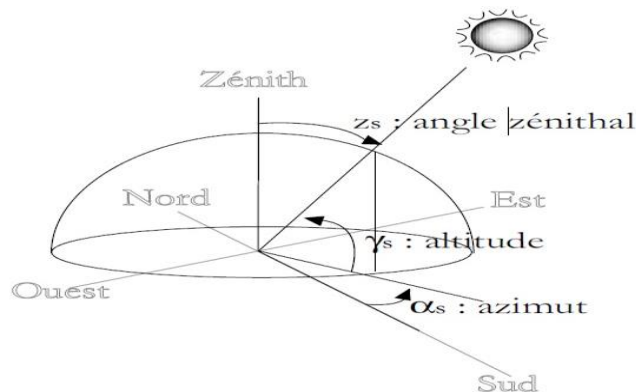


Figure II-9: La position du soleil selon les coordonnées horizontales

II.4.2.4 Les paramètres du temps :

- Le temps solaire vrai (TSV) :

Le temps solaire vrai est le temps indiqué par un cadran solaire :

- Il est midi solaire vrai quand le Soleil est exactement au méridien local, c'est-à-dire au point le plus haut dans le ciel (au sud dans l'hémisphère nord).
- À ce moment-là, le Soleil est au zénith local.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

Le soleil tourne sur l'équateur de 360° dans 24h, ce qui donne 15° par heure. (Duffie et A.Beckman 2013, BERNARD. 2004)

Il est donné par l'équation suivante :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{II-22})$$

➤ Le temps solaire moyen (TSM) :

La trajectoire de la terre au tour du soleil est elliptique et l'axe de rotation de la terre est incliné par rapport à ce plan elliptique ce qui donne la variation du jour solaire selon les époques de l'année. On introduit alors le temps solaire moyen qui correspond à une rotation uniforme de la terre au tour du soleil qui varie de plus au moins 16 min par rapport au TSV. On le donne par la relation suivante : (BERNARD. 2004)

$$TSM = TSV - ET \quad (\text{II-23})$$

Où ET est l'équation du temps.

$$ET = 9.87 \times \sin(2 \times N') - 7.53 \times \cos(N') - 1.5 \times \sin(N') \quad (\text{II-24})$$

Avec :

$$N' = \frac{360}{365} \times (n - 1) \quad (\text{II-25})$$

- n : le numéro du jour de l'année (1^{er} janvier =1).

➤ Temps universel (TU) :

Le temps universel(TU) est le temps moyen de Greenwich(BERNARD. 2004)

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (\text{II-26})$$

➤ Temps légal (TL) :

Le temps légal est le temps officiel d'un état, il est donnée par : (BERNARD. 2004)

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II-27})$$

ΔH = Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considère.

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

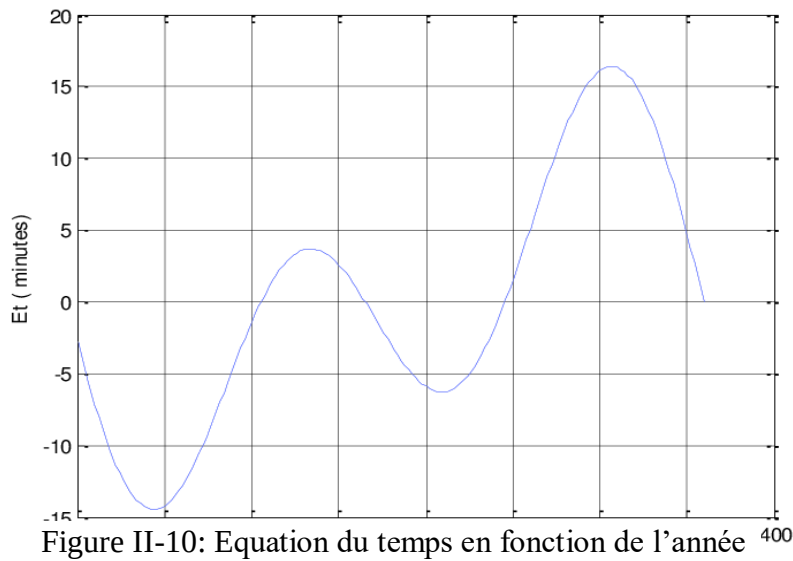


Figure II-10: Equation du temps en fonction de l'année ⁴⁰⁰

II.4.3 Les composantes de rayonnement solaire :

L'énergie solaire qui atteint la surface terrestre est inférieure à la valeur de la constante solaire, estimée environ 1366 W/m^2 , en raison de l'interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère. En effet, une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère (environ 15 %) puis réémise dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. Une autre fraction du rayonnement solaire est réfléchiée vers l'espace par les nuages, les aérosols et les gaz atmosphériques, représentant environ 6 % du rayonnement incident. (Duffie et A.Beckman 2013)

Ainsi, le rayonnement global reçu au niveau du sol correspond à la somme du rayonnement direct, provenant directement du soleil, et du rayonnement diffus, issu de la diffusion atmosphérique. La quantité d'énergie solaire reçue par une surface donnée dépend également de plusieurs facteurs, tels que la saison, la latitude, les conditions météorologiques, le relief, le niveau de pollution atmosphérique, ainsi que l'orientation et l'inclinaison de la surface considérée. (Duffie et A.Beckman 2013)

II.4.3.1 Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct correspond à la fraction du rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre sans être déviée par l'atmosphère. Il provient directement du disque solaire et n'inclut pas les composantes diffusées, réfléchies ou réfractées par l'atmosphère. Ce rayonnement est généralement noté G_b . (Duffie et A.Beckman 2013)

Chapitre II : notion sur les transferts thermiques

II.4.3.2 Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus résulte de la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère, les nuages et les particules en suspension. Il atteint la surface terrestre à partir de toutes les directions. Cette composante n'est pas négligeable et peut représenter jusqu'à 50 % du rayonnement global, selon la situation géographique et les conditions climatiques. Il est noté G_d . (Duffie et A. Beckman 2013)

II.4.3.3 Le rayonnement réfléchi (albédo) :

Le rayonnement réfléchi, également appelé albédo, correspond à la partie du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces environnantes telles que le sol, les nuages, l'eau, la neige, la végétation ou les bâtiments. Son importance augmente lorsque les surfaces sont fortement réfléchissantes, comme la neige ou les plans d'eau. Il est noté G_r . (Duffie et A. Beckman 2013)

II.4.3.4 Le rayonnement global :

Le rayonnement global représente la somme du rayonnement direct, du rayonnement diffus et du rayonnement réfléchi reçu par une surface donnée. Il constitue l'énergie solaire totale incidente sur une paroi et s'exprime par (Duffie et A. Beckman 2013)

$$G_G = G_B + G_D + G_R \quad (\text{II-28})$$

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les mécanismes fondamentaux des transferts thermiques, incluant la conduction, la convection sous ses différentes formes, les nombres sans dimension associés, ainsi que le rayonnement thermique et solaire. Ces notions constituent une base essentielle pour la modélisation et l'analyse du comportement thermique de la brique isolante étudiées dans ce travail.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'approche expérimentale adoptée dans le cadre de ce travail. L'objectif principal est la réalisation d'un prototype de brique permettant d'évaluer et de comparer les performances thermiques et mécaniques d'une nouvelle géométrie de brique isolante par rapport à une brique creuse standard. Dans un premier temps, il a été jugé nécessaire de concevoir et fabriquer un moule de brique standard, afin de produire des briques de référence élaborées dans les mêmes conditions de façonnage. Cette démarche vise à garantir la pertinence de la comparaison expérimentale ultérieure.

III.2 Matériaux utilisés :

III.2.1 Argile utilisée

L'argile employée dans les essais expérimentaux provient de la briqueterie IZERKHEF dans laquelle le stage pratique a été réalisé. Elle est destinée à la fabrication industrielle de briques et se caractérise par une bonne plasticité, permettant son façonnage par extrusion après ajout d'une quantité contrôlée d'eau.

III.2.2 Matériaux du moule

Pour la réalisation des prototypes de moule, deux matériaux ont été testés :

- Le bois, utilisé pour un premier prototype en raison de sa facilité d'usinage et de son faible coût.
- La tôle d'acier, utilisée pour un second prototype afin d'augmenter la résistance mécanique du moule face aux fortes pressions générées lors de l'extrusion.
- Les tiges d'acier, jouent un rôle essentiel en tant que supports des cavités. Elles garantissent leur stabilité et leurs dimensions sont méticuleusement calibrées pour assurer une précision optimale.
- Le téflon, est un matériau qui est utilisé dans le processus de fabrication des cavités.
- Une tige filetée associée à une manivelle est utilisée afin d'exercer une force mécanique contrôlée sur l'argile lors du processus de mise en forme.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.3 Réalisation des moules d'extrusion

III.3.1 Choix de la méthode de façonnage

La méthode de façonnage par extrusion a été retenue, car elle est largement utilisée dans l'industrie de la briqueterie pour la fabrication de briques creuses. Cette méthode permet d'obtenir des briques de section constante, et une fluidité dans la production.

Le moule d'extrusion constitue un élément clé du procédé, car il doit :

- Résister à des pressions élevées,
- Assurer la stabilité géométrique des cavités,
- Permettre une sortie fluide de l'argile sans obstruction ni déformation.

III.3.2 Conception du moule d'extrusion :

Dans un premier temps, la conception du moule et de l'ensemble de ses composants a été réalisée à l'aide du logiciel SOLIDWORKS, permettant de modéliser précisément toutes les pièces nécessaires avant leur fabrication.

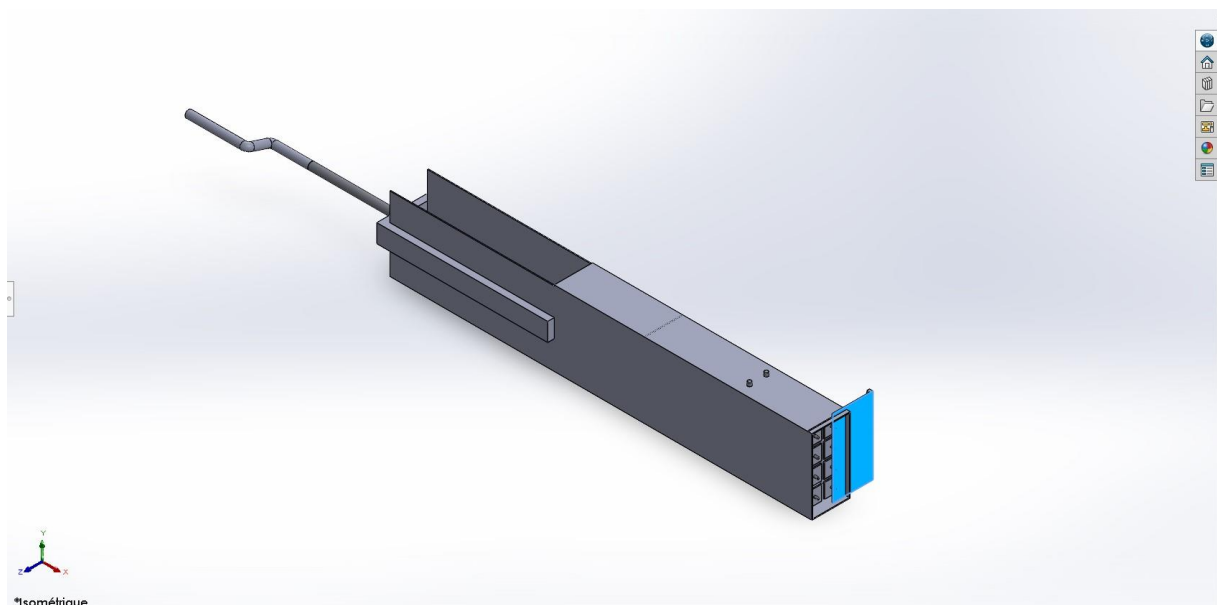


Figure III-1: Conception du moule sur SOLIDWORKS

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.3.2.1 Usinages des pièces :

Les différentes pièces du moule ont été usinées au sein du hall de technologie du département, tandis que les boîtiers ont été fabriqués respectivement par un menuisier et un soudeur, en fonction des matériaux et des opérations



Figure III-2: Usinages des supports cavités



Figure III-3: Découpage de la tôle

Après l'usinage et la fabrication des différentes pièces constituant le moule, une étape d'assemblage a été réalisée afin d'obtenir un dispositif fonctionnel et conforme aux objectifs expérimentaux du projet.



Figure III-5: Support cavités



Figure III-4: Le moule finale

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.3.2.2 Premier prototype de moule en bois

Dans un premier temps, un moule en bois a été réalisé afin de valider le principe de fonctionnement et de limiter les coûts de fabrication.

Cependant, dès les premiers essais, ce moule s'est révélé inadapté aux contraintes mécaniques du procédé d'extrusion. En effet, le bois n'a pas résisté aux pressions exercées par l'argile, et le moule a été endommagé dès le premier essai.

Ce résultat a mis en évidence la nécessité d'utiliser un matériau présentant une résistance mécanique plus élevée.

III.3.2.3 Second prototype de moule en acier

Suite à l'échec du moule en bois, un second moule a été fabriqué en tôle d'acier d'épaisseur 3 mm, afin d'améliorer la résistance mécanique nécessaire.



Figure III-6 : Moule en acier

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Malgré ce choix, des déformations ont été observées à la sortie du moule, au niveau de la zone d'extrusion où l'argile sort sous forme de brique. Ces déformations ont conduit à une altération de la géométrie finale de la brique.



Figure III-7: Le moule déformé

Afin de limiter ce phénomène, le moule a été renforcé par des fers plats en acier. Toutefois, cette modification a entraîné une augmentation importante des forces de frottement entre l'argile et les parois du moule, empêchant l'écoulement correct de l'argile. Les efforts nécessaires à l'extrusion ont alors dépassé la capacité de la manivelle, rendant impossible la production de briques.

Afin de minimiser les forces de frottement internes, une optimisation du moule est proposée via la conception d'une géométrie convergente, où la section d'entrée est supérieure à celle de la sortie. Cette configuration permet de limiter le contact prolongé de la matière avec les parois et de réduire l'adhérence. Parallèlement, le remplacement de la tige filetée par une vis sans fin vise à améliorer la compression et la régularité du flux. Ces deux modifications structurelles permettent non seulement de faciliter le processus d'extrusion de l'argile, mais garantissent également une meilleure symétrie géométrique de la brique finale.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.4 Conclusion :

Ce chapitre a présenté la démarche expérimentale adoptée pour la réalisation de prototypes de briques creuses, ainsi que les difficultés techniques rencontrées lors de la conception des moules d'extrusion. Malgré l'échec des deux prototypes de moules réalisés, ces essais ont permis d'identifier les contraintes mécaniques et tribologiques majeures liées à l'extrusion de l'argile. Fort de ces enseignements, l'étude s'oriente désormais vers une solution optimisée combinant une géométrie de moule convergente et l'intégration d'une vis sans fin, afin de s'affranchir des problèmes d'adhérence et de garantir la conformité géométrique des briques.

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, les équations fondamentales régissant les transferts thermiques dans la brique creuse sont présentées. Elles sont formulées à partir d'hypothèses simplificatrices afin de faciliter l'analyse du problème. Une approche de simulation numérique, basée sur l'utilisation le logiciel de calcul scientifique ANSYS, est ensuite mise en œuvre pour résoudre ces équations et analyser le comportement thermique de la brique.

IV.2 La modélisation numérique :

IV.2.1 La description du modèle physique :

La brique standard est une enceinte rectangulaire avec une longueur $l=300$ mm et une hauteur $H=200$ mm et une épaisseur $L=100$ mm. Elle est constituée de 8 cavités rectangulaire de hauteur $H_2=40$ mm et une largeur $L_2=38$ mm, l'épaisseur de la paroi de la brique $L_1=L_3=H_1=H_3=8$ mm. Les deux parois verticales sont maintenues a une différence de température horizontale (TC, TF), les parois horizontales sont considéré adiabatique, comme il est schématisé sur la figure III-1 :

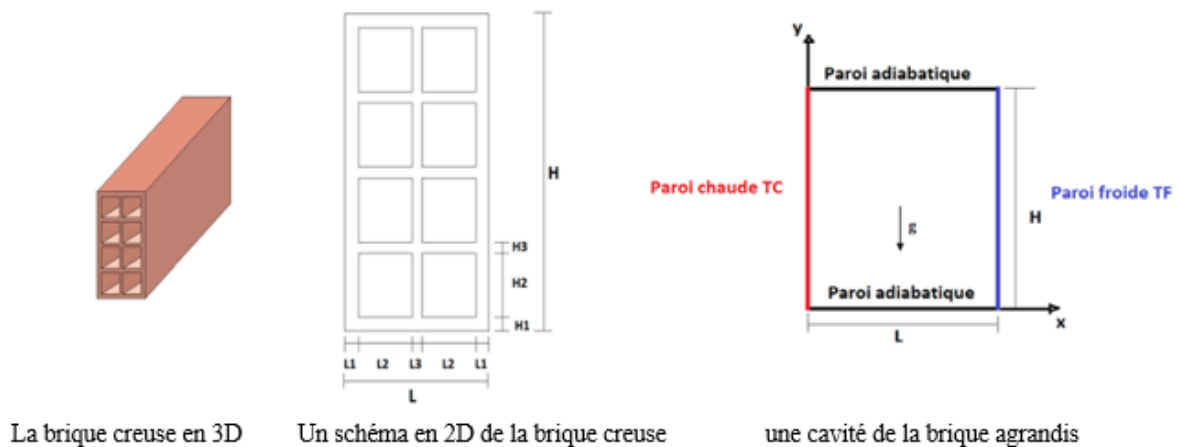


Figure IV-1:Description du modèle physique

IV.2.1.1 Les hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation mathématique des échanges thermiques au sein de la brique creuse, un ensemble d'hypothèses simplificatrices a été adopté. Ces hypothèses, d'ordre

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

physique et mathématique, permettent de rendre l'analyse plus accessible et de faciliter la résolution du système d'équations étudié. Elles sont présentées comme suit :

- ✓ Le fluide (air) est continu et incompressible.
- ✓ L'écoulement est bidimensionnel on régime laminaire stationnaire.
- ✓ La seule force extérieure c'est celle du champ gravitationnel de la terre (l'équation de la quantité de mouvement suivent y est parallèle au vecteur de gravité g).
- ✓ Toutes les caractéristiques physiques du fluide sont considérées constantes et calculer à la température moyenne du fluide sauf la masse volumique dans le terme des forces volumiques dans l'équation du mouvement qui est en fonction de l'évolution du gradient de température (approximation de Boussinesq).

IV.2.1.2 L'approximation de Boussinesq :

En mécanique des fluides, les écoulements engendrés par la poussée d'Archimède (effets de flottabilité) conduisent à des équations fortement non linéaires, dont la résolution analytique devient complexe. Afin de rendre le problème traitable, il est nécessaire d'introduire une approximation. Parmi les approches les plus couramment utilisées pour prendre en compte la flottabilité, l'approximation de Boussinesq est la plus simple et la plus répandue. Elle repose sur l'hypothèse que les variations de densité du fluide sont négligeables, sauf dans le terme de force volumique lié à la gravité, où elles sont à l'origine des mouvements convectifs, elle s'énonce comme suit :

« ... il faut savoir que dans la plupart des mouvements provoqués par la chaleur sur nos fluides pesants, les volumes ou les densités se conservent à peu près, quoique la variation correspondante du poids de l'unité de volume soit justement la cause des phénomènes qu'il s'agit d'analyser.

De là résulte la possibilité de négliger les variations de la densité, là où elles ne sont pas multipliées par la gravité g , tout en conservant, dans les calculs, leur produit par celle-ci... ».(DJAMILA BENYOUCEF 2018)

La modélisation de la convection naturelle est réalisée en supposant que l'approximation de Boussinesq est valable. Cette approximation permet de simplifier les équations de l'écoulement tout en conservant l'effet de la flottabilité, responsable du mouvement du fluide.

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- La masse volumique du fluide est considérée comme constante dans l'ensemble des équations, à l'exception du terme de la poussée d'Archimède, où elle est supposée dépendre uniquement des variations de température. L'influence des variations de pression sur la masse volumique est négligée.
- Les autres propriétés thermophysiques du fluide (viscosité, conductivité thermique, chaleur spécifique) sont supposées constantes.
- Les effets de la dissipation visqueuse sont considérés comme négligeables.

Dans ces conditions, la force volumique liée à la poussée d'Archimède s'exprime sous la forme : (P.INCROPERA, et al. 2011)

$$\text{Où : } \rho = \rho(T) = \rho_m + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_m) = \rho_m(1 - \beta(T - T_m)) \quad (\text{IV-1})$$

$$\text{Avec : } \beta = -\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (\text{IV-2})$$

- ρ_m : La densité de référence,
- ρ : La densité de fluide
- T_m : La température moyenne,
- T : La température locale de fluide,
- β : Le coefficient de dilatation thermique du fluide,

Cette approximation se limite aux cas où les différences de température sont suffisamment faibles ($\Delta T \leq 30^\circ$). (DJAMILA BENYOUNEF 2018)

IV.2.2 Les équations gouvernantes :

Sur la base des hypothèses simplificatrices précédemment établies, la modélisation des phénomènes thermo-fluides dans la brique creuse repose sur les lois fondamentales de conservation suivantes : (DJAMILA BENYOUNEF 2018)

- L'équation de conservation de la masse (équation de continuité).
- L'équation de conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier–Stokes).

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

- L'équation de conservation de l'énergie.

IV.2.2.1 Équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{IV-3})$$

- ρ : la masse volumique.
- $\vec{V}$: le vecteur vitesse.

Cette équation traduit le principe de conservation de la masse, selon lequel la masse d'un fluide est conservée au cours du temps. Il n'y a ni création ni disparition de masse à l'intérieur du domaine considéré (DJAMILA BENYOUNCEF 2018)

IV.2.2.2 Équation de conservation de la quantité de mouvement (équation de Navier–Stokes)

L'équation de la quantité de mouvement établit la relation entre le mouvement du fluide et les forces qui s'exercent sur celui-ci. Elle est dérivée du principe de conservation de la quantité de mouvement, basé sur la deuxième loi de Newton. (DJAMILA BENYOUNCEF 2018)

$$\frac{D(\rho \vec{V})}{Dt} = \vec{F} - \overrightarrow{\text{grad}}(p) + \mu (\Delta \vec{V}) + \frac{1}{3} \mu \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{V})) \quad (\text{IV-4})$$

Avec :

- $\frac{D(\rho \vec{V})}{Dt}$: le taux de variation et de transport de la quantité de mouvement.
- $\overrightarrow{\text{grad}}(p)$: les forces de pression.
- $\mu(\Delta V)$: les forces visqueuses.
- $\frac{1}{3} \mu \overrightarrow{\text{grad}}(\text{div}(\vec{V}))$: Terme visqueux de Brinkman.
- $\vec{F}$ est une force par unité de volume.
- P : la pression.
- μ : la viscosité dynamique.

IV.2.2.3 Équation de la conservation de l'énergie :

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

L'équation de conservation de l'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique, appliqué à un fluide en écoulement. Elle est donnée comme suit : (SALHI, 2015)

$$\frac{D}{Dt} (\rho C_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad (\text{IV-5})$$

Avec

- $\frac{D}{Dt} (\rho C_p T)$: la variation totale d'énergie (par accumulation et convection).
- $\Delta(\lambda T)$: la variation d'énergie par conduction.
- q : puissance volumique dissipé.
- $\beta T \frac{Dp}{DT}$: la variation d'énergie due a la compressibilité.
- $\mu \Phi$: la dissipation irréversible due au frottement visqueux.

IV.3 Les conditions aux limites :

La résolution du système d'équation obtenu, nécessite d'ajouter des conditions aux limites pour chaque variable dépendante, afin de représenter les conditions thermiques au limites comme l'illustre la figure III-2 ci-dessus :

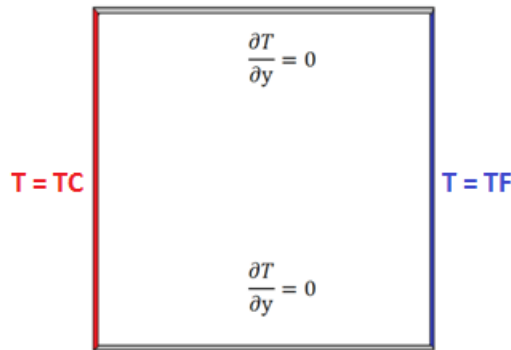


Figure IV-2: Condition aux limites

Dans notre système, la paroi chaude a été chauffée par une intensité solaire. Nous avons pris Tizi-Ouzou comme localisation précise, le 21 Juin à midi, sachant que la valeur interprétée par le logiciel PVGIS correspond à l'intensité horizontal global G_h moyenne de la période 2005-2023 comme le montre la figure III-3 suivante :

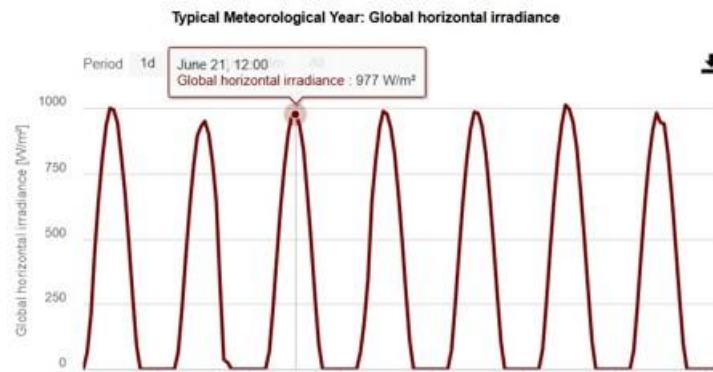


Figure IV-3: Le diagramme d'irradiation horizontale moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.

La figure IV-3 illustre l'évolution temporelle de l'irradiance solaire globale horizontale sur plusieurs jours consécutifs du mois de juin. On observe un comportement cyclique journalier, caractérisé par des valeurs nulles durant la nuit et des maxima atteints autour de midi solaire. Les pics élevés, proches de 1000 W/m², traduisent un fort ensoleillement typique de la période estivale, avec des conditions météorologiques relativement stables.

Le **21 juin à midi**, correspondant au **solstice d'été**, l'irradiance solaire globale horizontale atteint une valeur maximale d'environ **977 W/m²**. Étant donné que la paroi étudiée est verticale, cette irradiation est assimilée à un vecteur incident, lequel est décomposé afin de déterminer la composante effective du rayonnement solaire reçue par la surface verticale. Selon la relation suivante :

$$G_v = G_h \cdot \cos H \quad (\text{IV-6})$$

Avec :

- G_v : l'irradiation verticale [W/m²].
- G_h : l'irradiation horizontale [W/m²].
- H : la hauteur de soleil [°].

La hauteur du soleil varie en fonction du temps. Selon PVGIS la hauteur du soleil le 21 juin à midi est de 76° comme l'illustre la figure suivante :

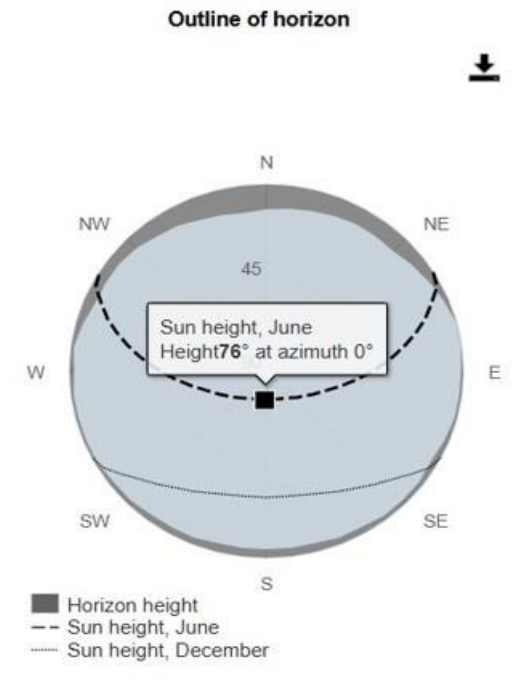


Figure IV-4: La hauteur du soleil moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.

Donc on obtient :

$$G_v \approx 236.36 \text{ W/m}^2$$

Il est à noter que cette valeur sera imposée sur la paroi de brique. Dans le cadre de cette étude, nous aborderons la question de la dissipation thermique dans un contexte de paroi. Il est important de noter que ces processus distincts : l'absorption par la paroi de brique, l'évacuation par convection et le transféré par conduction.

L'évaluation du taux de chaleur par conduction a été effectuée par l'introduction d'un bilan thermique de puissance, défini comme suit :(DIAW. 2005)

$$\alpha G_v - \dot{q}_{conv_{ext}} = \dot{q}_{cond} = \dot{q}_{conv_{int}} \quad (IV-7)$$

D'autre manière, l'expression devient (DIAW. 2005)

✓ α : est l'absorption d'intensité de la surface.

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

Le taux d'absorption de la brique est indiqué dans le tableau suivant :(P.INCROPERA, et al. 2011)

Description/Composition	α_s	ϵ^b	α_s/ϵ	τ_s
Aluminum				
Polished	0.09	0.03	3.0	
Anodized	0.14	0.84	0.17	
Quartz overcoated	0.11	0.37	0.30	
Foil	0.15	0.05	3.0	
Brick, red (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concrete	0.60	0.88	0.68	
Galvanized sheet metal				
Clean, new	0.65	0.13	5.0	
Oxidized, weathered	0.80	0.28	2.9	
Glass, 3.2-mm thickness				
Float or tempered				0.79
Low iron oxide type				0.88
Metal, plated				
Black sulfide	0.92	0.10	9.2	
Black cobalt oxide	0.93	0.30	3.1	
Black nickel oxide	0.92	0.08	11	
Black chrome	0.87	0.09	9.7	
Mylar, 0.13-mm thickness				0.87
Paints				
Black (Parsons)	0.98	0.98	1.0	
White, acrylic	0.26	0.90	0.29	
White, zinc oxide	0.16	0.93	0.17	
Plexiglas, 3.2-mm thickness				0.90
Snow				
Fine particles, fresh	0.13	0.82	0.16	
Ice granules	0.33	0.89	0.37	
Tedlar, 0.10-mm thickness				0.92
Teflon, 0.13-mm thickness				0.92

✓ $h_{conv_{ext}}$: est le coefficient d'échange convectif, il dépend de la vitesse de vent.

Figure IV-5: Les propriétés du rayonnement solaire de différents matériaux(P.INCROPERA, et al. 2011)

Le coefficient d'échange par convection peut être sous forme :(DIAW. 2005)

$$h_{conv_{ext}} = A + B \cdot V_V^C \quad (IV-8)$$

Les valeurs des coefficients A, B et C est :(ASHRAE 2017)

- Si $5 \leq V_V \leq 30$ m/s :

$$h_{conv_{ext}} = 7.2 V_V^{0.78} \quad (IV-9)$$

- Si $V_V < 5$ m/s

$$h_{conv_{ext}} = 5.62 + 3.9 \cdot V_V^1 \quad (IV-10)$$

V_V est la vitesse du vent, donnée par la figure suivante :

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

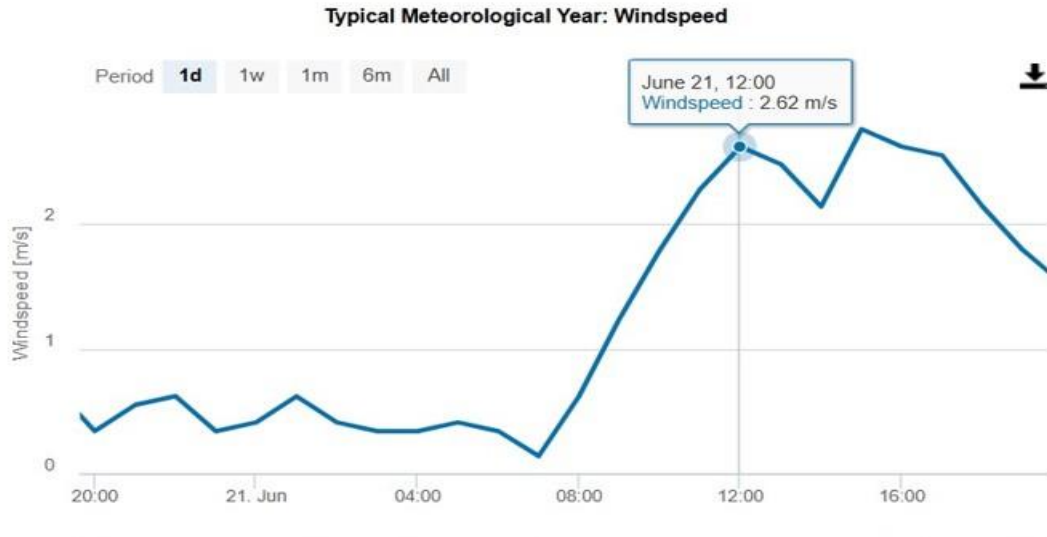


Figure IV-6: Le diagramme de la vitesse du vent moyen 2005-2023 en 21 juin à midi.

La figure IV-6 illustre l'évolution horaire de la vitesse du vent au cours de la journée du 21 juin. Des vitesses faibles sont observées durant la nuit, traduisant une atmosphère stable. À partir de la matinée, la vitesse du vent augmente progressivement sous l'effet du réchauffement solaire, pour atteindre un maximum d'environ 2,62 m/s à midi. Dans notre cas, cette valeur reste inférieure à 5 m/s, ce qui indique un régime de vent modéré, d'où :

$$h_{conv_{ext}} = 5.62 + 3.9 \times 2.62$$

$$h_{conv_{ext}} = 15.8380 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- ✓ $T_{\square_{ext}}$: est la température de l'air extérieur qui est donnée par la figure suivante :

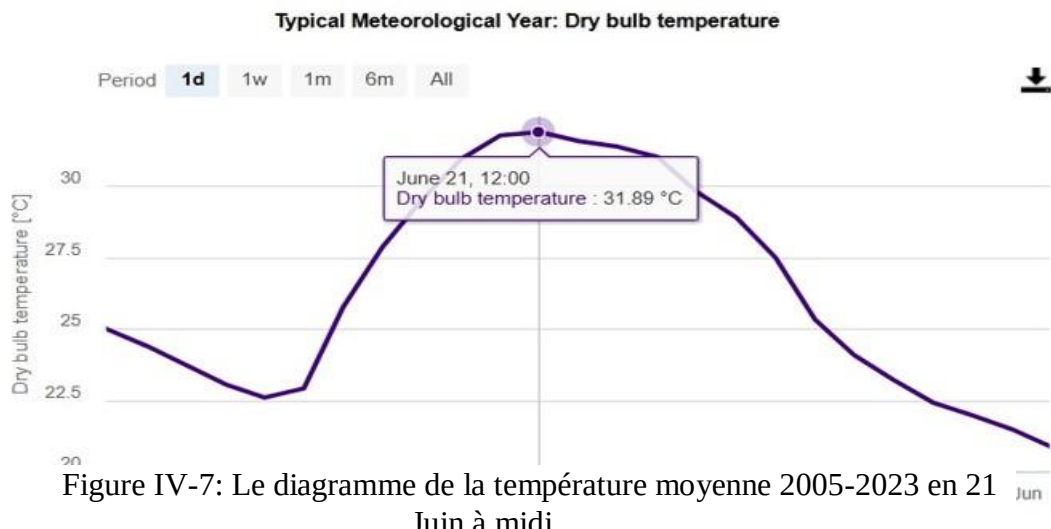


Figure IV-7: Le diagramme de la température moyenne 2005-2023 en 21 Juin à midi

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

La figure IV-8 présente l'évolution journalière de la température de l'air extérieur le 21 juin.

Après des valeurs minimales observées durant la nuit, la température augmente progressivement au cours de la matinée sous l'effet du rayonnement solaire, pour atteindre un maximum d'environ 31,9 °C à midi.

D'où : $T_{\square_{ext}} = 31.89^{\circ}\text{C}$

k_{cond} : est le coefficient d'échange par conduction qui est donnée par la relation suivante : (CNERIB 1997)

$$k_{cond} = \frac{\lambda}{e} \quad (\text{IV-11})$$

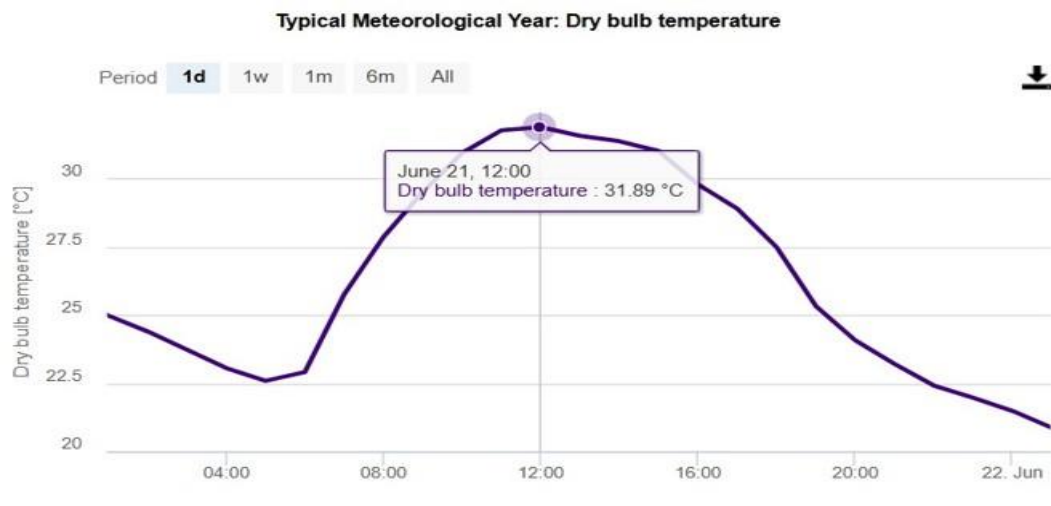
Avec :

- k_{cond} : le coefficient d'échange par conduction [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].
- e : l'épaisseur du solide [m].
- λ : la conductivité thermique du matériau [$\text{W}/\text{m. K}$].

On prend la brique creuse standard (8 trous) comme référence. Les caractéristiques de la brique standard sont donnée par : (CNERIB 1997)

$e = 0.1\text{m}$, $\lambda = 0.39 \text{ W}/\text{m. K}$, ce qui donne :

$$k_{cond} = 3.9 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$$



- ✓ $h_{conv_{int}}$: est le coefficient d'échange par convection [$\text{W}/\text{m}^2. \text{K}$].
- ✓ $T_{\infty_{int}}$: est la température de l'air intérieur (ambiante) [K].

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

Pour $h_{conv_{int}}$:

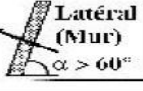
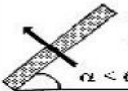
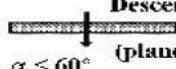
$\frac{l}{h}$ en $m^2 \cdot ^\circ C/W$	Paroi en contact avec :			Paroi en contact avec :		
	- l'extérieur, - un passage ouvert, - un local ouvert.			- un autre local, chauffé ou non chauffé, - un comble, - un vide sanitaire.		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
 Latéral (Mur) $\alpha > 60^\circ$	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
 Ascendant (toiture) $\alpha < 60^\circ$	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
 Descendant (plancher) $\alpha < 60^\circ$	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Figure IV-8:Les résistances thermiques des différentes parois (CNERIB 1997)

Pour $T_{\infty_{int}}$:

Immeuble d'habitation, maison individuelle

- Pièce principale, pièce de service 21°C
- cage d'escalier chauffée, circulation chauffée en continu 18°C
- Bureau chauffé en continu 21°C
- Magasin chauffé en continu 21°C
- Local artisanal chauffé en continu 21°C

Figure IV-9 : Les températures ambiantes des locaux l'intérieurs
(CNERIB 1997)

Remarque :

on prend : $T_{S_{int}} = T_{\infty_{int}} = 293.15 \text{ K}$ et $h_{conv_{int}} = \frac{1}{0.11} \approx 9.1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

Après interprétation nécessaire des données, on remarque que la température de la surface extérieure est inconnue. Compte tenu de la complexité du calcul analytique, nous avons utilisé un calcul numérique, avec le logiciel de programmation MATLAB afin d'obtenir un résultat approximatif.

Les programmes numériques se résolvent avec MATLAB, par boucles. Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de Newton-Raphson.

La méthode de Newton-Raphson (voir la figure III-11) est plus utilisée pour trouver les racines d'une fonction. Si on connaît la racine x_i , on peut prolonger une tangente à partir du point $[x_i, f(x_i)]$. Le point où la tangente rencontre l'axe X est souvent une meilleure estimation de la racine (Chapra 2015)

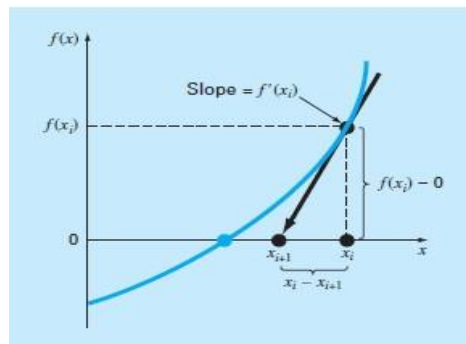


Figure IV-10 : Représentation graphique de la méthode de Newton-Raphson

Une fois le programme numérique établi, nous avons pu atteindre les résultats souhaités, comme l'indique le tableau suivant :

Tableau IV-1: Résultats de la programmation

Flux solaire absorbé [W/m ²]	Flux convectif externe [W/m ²]	Flux par conduction [W/m ²]	La température de parois extérieur [K]
148.9053	82.2747	66.6306	310,2348

Une fois les résultats obtenus, on peut intégrer les conditions aux limites, comme le montre le tableau suivant :

Tableau IV-2 : Conditions aux limites

Limites	Conditions hydrodynamique	Conditions thermique
Paroi chaude $x=0 ; 0 < y < H$	$u=0 ; v=0$	$\dot{q} = \dot{q}_{cond}$
Paroi froide $x=L ; 0 < y < H$	$u=0 ; v=0$	$T = T_{air_{int}} ; h = h_{conv_{int}}$
Paroi supérieure $y=H ; 0 < x < L$	$u=0 ; v=0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$
Paroi inférieure $y=0 ; 0 < x < L$	$u=0 ; v=0$	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$

IV.4 Introduction à la simulation :

Ansys Workbench est une plateforme d'intégration et de gestion des flux de travail qui unifie les différents produits de simulation d'Ansys, permettant de créer des workflows complexes, de gérer les données et d'automatiser les analyses, offrant ainsi une approche plus efficace pour la conception et l'optimisation des produits grâce à la simulation multiphysique dans un seul environnement. C'est l'outil central qui connecte et orchestre des logiciels comme Fluent (fluides) et Mechanical (structure), facilitant le transfert de données et les études paramétriques.

IV.4.1 DesignModeler :

L'application Ansys Désigne Modeler est conçue pour être utilisée comme éditeur de géométrie de modèles CAO existants. Il est basé sur des fonctionnalités paramétriques, conçu pour pouvoir commencer à dessiner intuitivement et rapidement des croquis 2D, modéliser des pièces 3D ou télécharger des modèles CAO 3D pour le prétraitement d'analyses d'ingénierie.

IV.4.1.1 Barre d'outils de DesignModeler :

Il existe barre d'outils situer on hauts de l'interface :

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

IV.4.1.1.1 Barre d'outils menus :

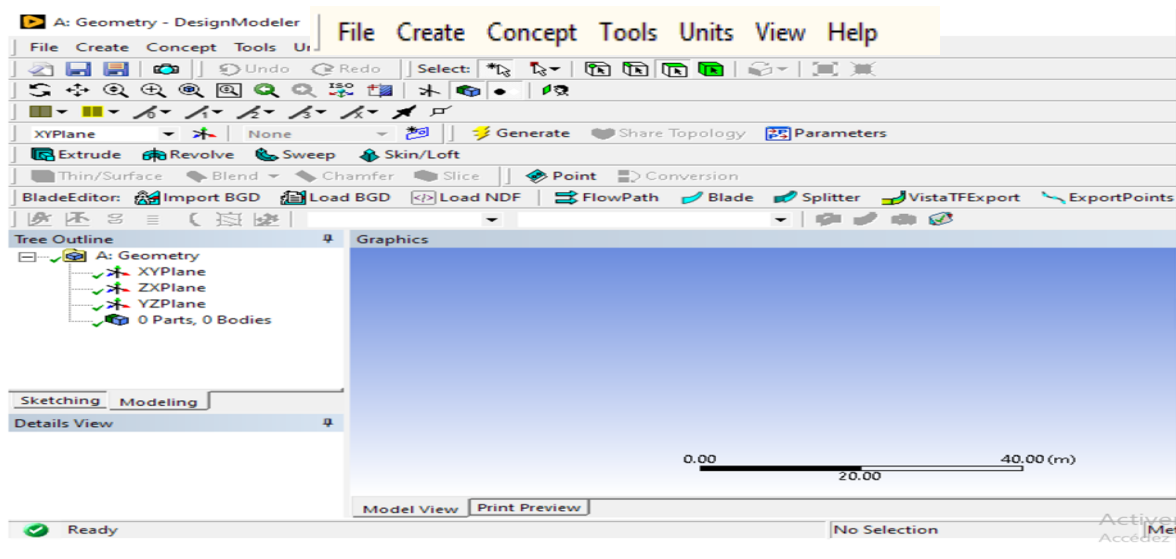


Figure IV-11 : Fenêtre de DesignModeler

Mesh → Insert → Method.

Un maillage non structuré de type tétraédrique a été adopté sous ANSYS Meshing afin de discrétiser la géométrie complexe de la brique creuse et de ses cavités interne.

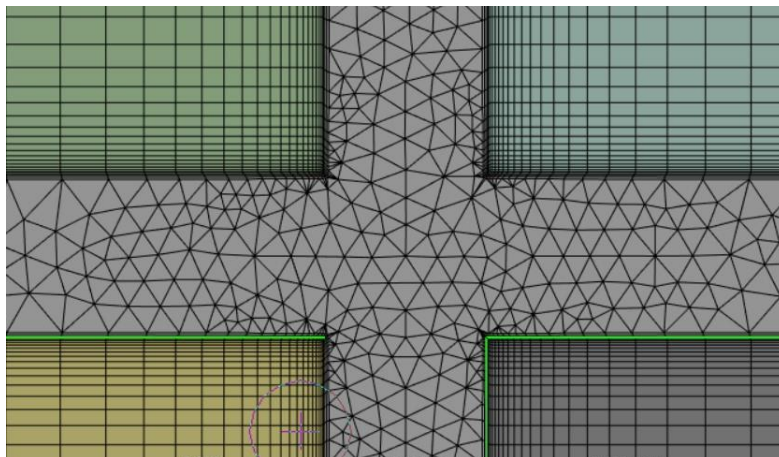


Figure IV-12: Le maillage de tétraédrique

IV.4.1.2 Définition de la taille globale du maillage :

Mesh → Details → Sizing.

La taille globale du maillage a été définie dans ANSYS Meshing afin d'assurer une discrétisation homogène des domaines solide et fluide de la brique creuse. Ce paramétrage résulte d'un compromis entre la précision des résultats thermique et le temps de calcul. Il

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

constitue une base de maillage sur laquelle des raffinements locaux ont été appliqués, notamment au niveau des parois interne des cavités, afin de mieux capter les gradients thermiques.

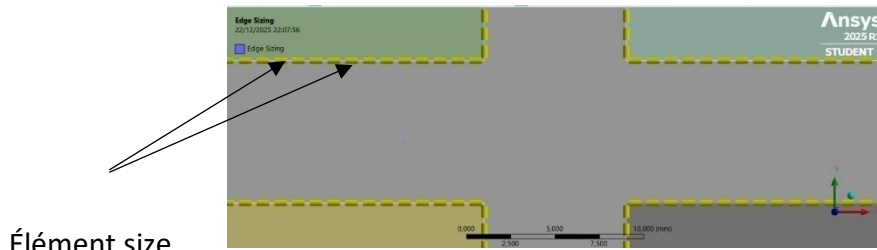


Figure IV-13: Insertion n de taille d'élément

IV.4.1.3 Raffinement local dans les cavités et les interfaces solide-fluide :

Mesh → Details → Sizing.

Afin d'améliorer la précision des résultats numériques, un raffinement local du maillage a été appliqué au niveau des cavités internes de la brique creuse ainsi qu'aux interfaces solide-fluide. Ces zones sont caractérisées par de forts gradients de température et de vitesse, liés aux phénomènes de convection naturelle de l'air et de conduction thermique dans le matériau solide.

Le raffinement du maillage permet une meilleure résolution des couches limites thermiques et une représentation plus fidèle des échanges thermiques à l'interface entre la brique et l'air contenu dans les alvéoles. Dans ANSYS Meshing, ce raffinement a été réalisé par l'application de paramètres de *Face Sizing* et de *BodySizing*, conduisant à une diminution locale de la taille des éléments sans affecter excessivement le coût de calcul global.

Cette stratégie de raffinement ciblé constitue un compromis efficace entre précision numérique et performance de calcul, garantissant une meilleure convergence de la solution et une fiabilité accrue des résultats de transfert thermique.

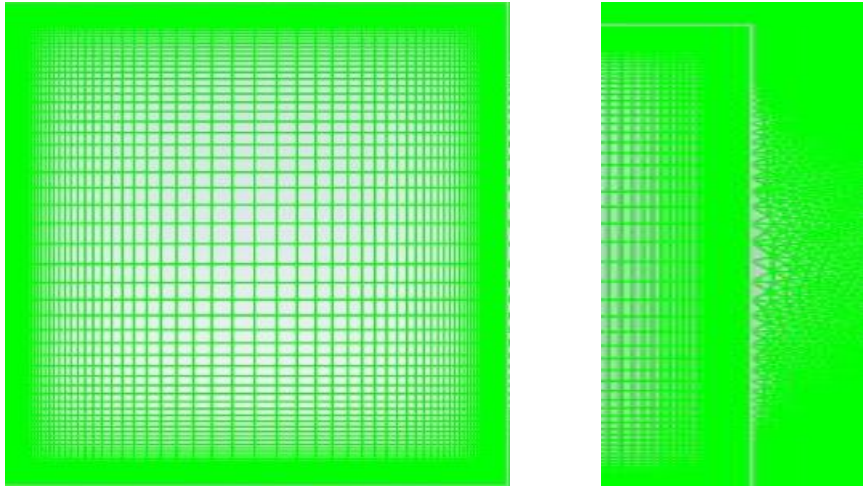


Figure IV-14 : Maillage raffiné pour les cavités et les interfaces

IV.4.1.4 Génération du maillage :

Mesh → Generate Mesh.

Une fois les paramètres de maillage définis, la génération du maillage est effectuée directement dans le module Ansys Meshing. Cette étape permet de créer les éléments finaux qui seront utilisés pour la simulation thermique de la brique creuse.

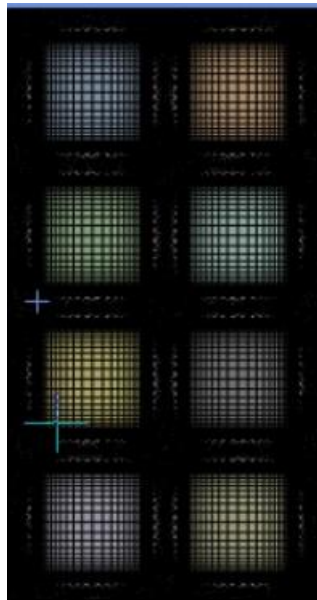


Figure IV-15: La génération finale maillée

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

IV.5 ANSYS Fluent :

IV.5.1 Introduction à ANSYS Fluent

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique largement utilisé dans les domaines de la mécanique des fluides et des transferts thermiques. Il repose sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations gouvernantes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie (ANSYS 2021)

Ce logiciel permet de modéliser et d'analyser différents phénomènes physiques tels que la conduction thermique, la convection naturelle ou forcée et le rayonnement, dans des géométries simples ou complexes. Grâce à ses nombreux modèles physiques intégrés ANSYS Fluent offre un outil performant pour l'étude du comportement thermique des matériaux et des systèmes (ANSYS 2021)

Dans le cadre de ce travail, ANSYS Fluent est utilisé pour simuler les transferts thermiques à travers une brique creuse, afin d'évaluer ses performances en isolation thermique.

IV.5.2 Méthode numérique et discrétisation

La résolution analytique des équations gouvernantes du transfert thermique et de l'écoulement des fluides est généralement impossible pour des géométries réelles et des conditions aux limites complexes, telles que celles rencontrées dans l'étude d'une brique creuse. Il est donc nécessaire de recourir à une méthode numérique afin d'obtenir une solution approchée du problème physique (Patankar 1980)

Dans ce travail, la résolution numérique est effectuée à l'aide de la méthode des volumes finis (Finite Volume Method – FVM), implémentée dans le logiciel ANSYS Fluent, largement utilisé pour les simulations de mécanique des fluides et de transfert thermique.

La méthode des volumes finis repose sur la discrétisation du domaine de calcul en un ensemble de volumes de contrôle. Les équations de conservation (masse, quantité de mouvement et énergie) sont intégrées sur chaque volume de contrôle, ce qui garantit une conservation locale et globale des grandeurs physiques. Les flux de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont évalués aux faces des volumes de contrôle, assurant ainsi un bilan précis des échanges entre cellules voisines. (Patankar 1980, Versteeg 2007)

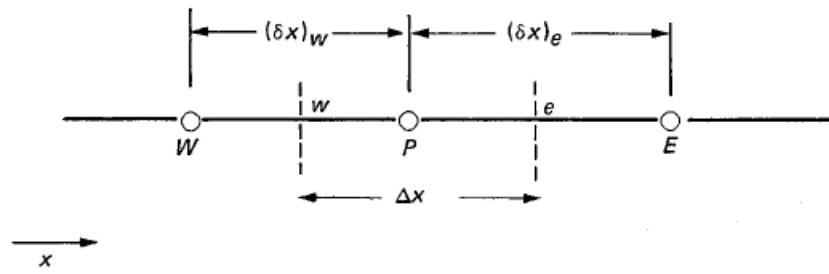


Figure IV-16 : Discretisation d'un point unidimensionnelle par la méthode des volumes finis

Dans le cas d'une modélisation bidimensionnelle (2D), le domaine est découpé en mailles surfaciques. Les variables inconnues (vitesse, pression, température) sont généralement stockées au centre de chaque volume de contrôle. Les termes convectifs et diffusifs sont ensuite approximés à l'aide de schémas numériques appropriés (schéma amont, schéma central, etc.), conduisant à un système d'équations algébriques couplées (Patankar 1980)

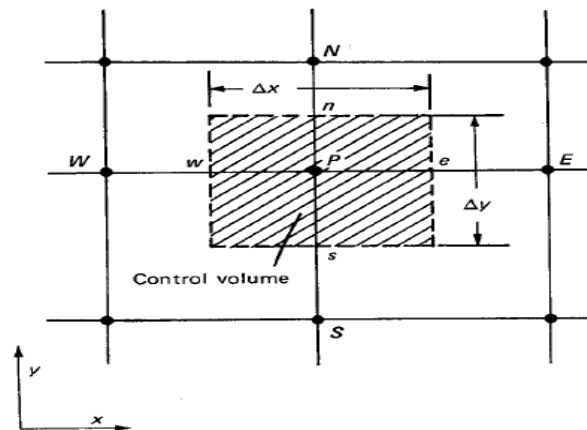


Figure IV-17: Volume de contrôle en 2D

IV.5.3 La simulation numérique :

IV.5.3.1 Conditions de simulation :

La simulation porte sur un régime permanent de l'équation d'énergie sur l'ensemble de la brique. Les deux parois latérales sont soumises à des conditions différentes. La paroi extérieure est exposée à une puissance thermique de $66,6303 \text{ W/m}^2$, tandis que la paroi intérieure échange de la chaleur avec un milieu ambiant à 293.15 K (20°C), avec un coefficient d'échange fixé à $9,1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

L'air intérieur de la cavité a des propriétés, sont considérera une température moyenne de $30^{\circ}\text{C} = 303.15\text{K}$, comme le montre le tableau suivant :

The values of μ , k , c_p , and Pr are not strongly pressure-dependent and may be used over a fairly wide range of pressures							
T, K	ρ kg/m^3	c_p $\text{kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$\mu \times 10^5$ $\text{kg/m} \cdot \text{s}$	$\nu \times 10^6$ m^2/s	k $\text{W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$	$\alpha \times 10^4$ m^2/s	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

Tableau IV-18: Les propriétés de l'air à 30°C (J.P.Holman 2010)

Les propriétés de l'argile sont les suivantes :

Table 1. Properties of materials.

Properties	$k, \text{W/(m} \cdot \text{K)}$		$c, \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$		$\rho, \text{kg/m}^3$		$\mu, \text{Pa} \cdot \text{s}$	$Lf, \text{J/kg}$
	Solid	Liquid	Solid	Liquid	Solid	Liquid		
Brick	0.7		840		1600			
RT25HC ($T_f = 26.6^{\circ}\text{C}$)	0.19	0.18	1800	2400	785	749	0.00375	232,000

Figure IV-19 : Les propriétés de l'argile.

Chapitre IV : Modélisation mathématique et simulation numérique.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, les bases théoriques nécessaires à la modélisation des transferts thermiques au sein de la brique creuse ont été présentées à travers les équations gouvernantes, établies sous des hypothèses simplificatrices appropriées. Par ailleurs, les outils numériques utilisés pour la simulation, à savoir **ANSYS Workbench** et **ANSYS Fluent**, ont été introduits, en précisant leurs principes de fonctionnement et leur intérêt dans la résolution des problèmes de transfert thermique. Ces éléments constituent une base méthodologique essentielle pour les analyses et exploitations numériques développées dans le chapitre suivant.

Chapitre V : Résultats et discussion

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus lors de la simulation numérique. L'objectif est d'étudier le transfert de chaleur dans différentes géométries et de déduire les résistances thermiques.

V.2 Représentation de différentes géométries :

V.2.1 La brique creuse standard :

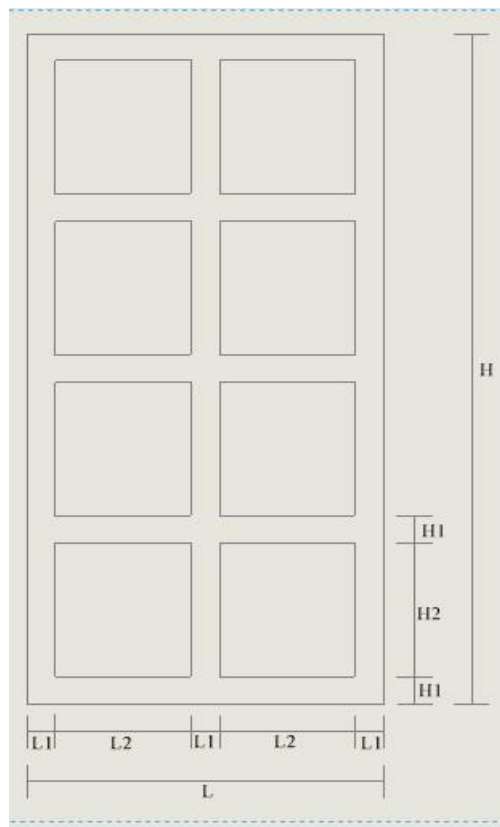


Figure V-1: Représentation de la brique standard

Le tableau suivant présente les dimensions de la brique standard :

Hauteur (mm)	H	200	Largeur (mm)	L	100	longueur (mm)	l	300
	H1	8		L1	8			
	H2	40		L2	38			

Tableau V-1: Dimension de la brique standard

Chapitre V : Résultats et discussions

V.2.2 La brique rectangulaire :

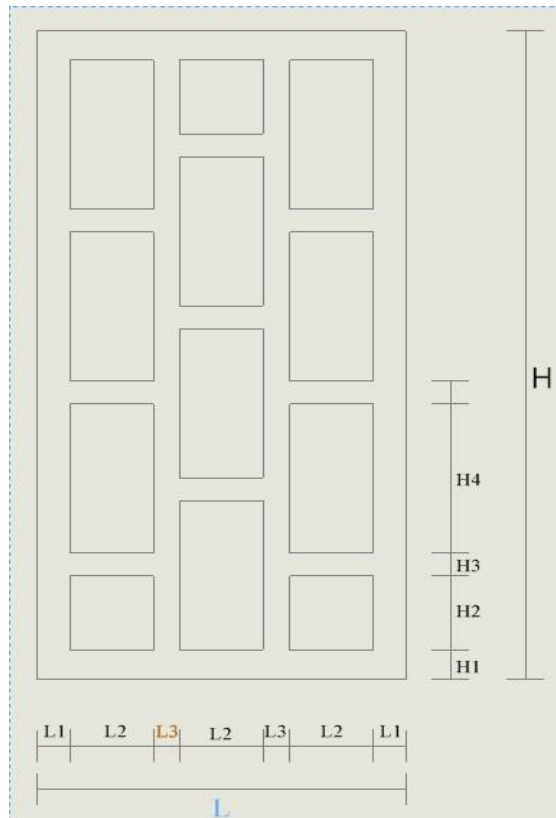


Figure V-2: Représentation de la brique rectangulaire

Le tableau suivant montre les dimensions de la brique rectangulaire :

Tableau V-2 : Les dimensions de la brique rectangulaire

	H	200		L	100		l	300
Hauteur (mm)	H1	9	Largeur (mm)	L1	9	longueur (mm)		
	H2	40,25		L2	22,67			
	H3	7		L3	7			
	H4	52,25						

Chapitre V : Résultats et discussions

V.2.3 Nouvelle brique :

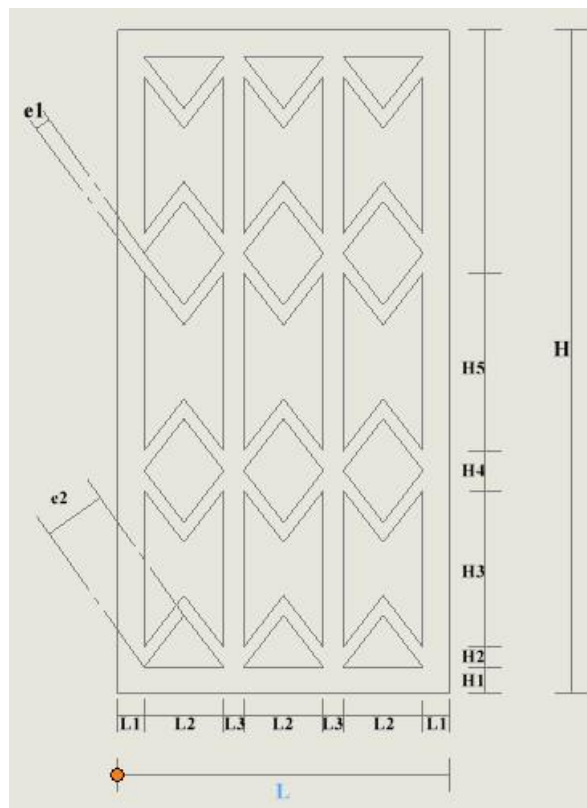


Figure V-3: Les dimensions de la nouvelle brique

Tableau V-3 : Les dimensions de la nouvelle brique.

Hauteur (mm)	H	200	Largeur (mm)	L	100	longueur (mm)	l	300	epaisseur (mm)	e1	19,7
	H1	8		L1	8					e2	3,66
	H2	6		L2	24						
	H3	47,25		L3	6						
	H4	12									
	H5	53,5									

V.3 Résultats de la simulation :

V.3.1 Résultats de maillage :

L'étude de sensibilité du maillage constitue une étape essentielle dans toute simulation numérique par la méthode des volumes finis. Elle permet de vérifier que les résultats obtenus sont indépendants de la taille des éléments du maillage et reflètent fidèlement le comportement physique du phénomène étudié. Un maillage insuffisant peut entraîner des erreurs numériques

Chapitre V : Résultats et discussions

significatives, tandis qu'un maillage excessivement fin augmente inutilement le coût de calcul sans amélioration notable de la précision.(Versteeg 2007)(Ferziger 2002)

Dans le cadre des simulations de transfert thermique et d'écoulement convectif, en particulier dans les géométries complexes telles que les briques creuses, la précision du maillage joue un rôle déterminant dans la capture des gradients de température et des structures d'écoulement. Ainsi, une étude de raffinement progressif du maillage est réalisée afin d'évaluer l'influence de la taille des cellules sur les paramètres physiques d'intérêt, tels que la température moyenne, le flux thermique et la vitesse du fluide.(Versteeg 2007)(Ferziger 2002)

Cette démarche permet de garantir la fiabilité des résultats numériques et d'assurer un compromis optimal entre précision et temps de calcul.

V.3.1.1 La brique standard

➤ Affichage du maillage :

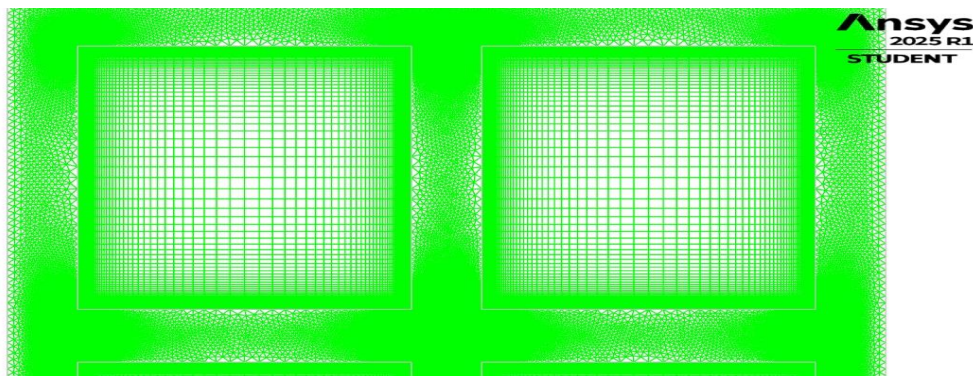


Figure V-4 : Le maillage de la brique standard

Le rapport du maillage :

Tableau V-4: Etude de la sensibilité de maillage dans la brique standard

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Nombre total d'éléments	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)
0.25	314516	3.99

Chapitre V : Résultats et discussions

V.3.1.2 La brique rectangulaire :

- Affichage du maillage :

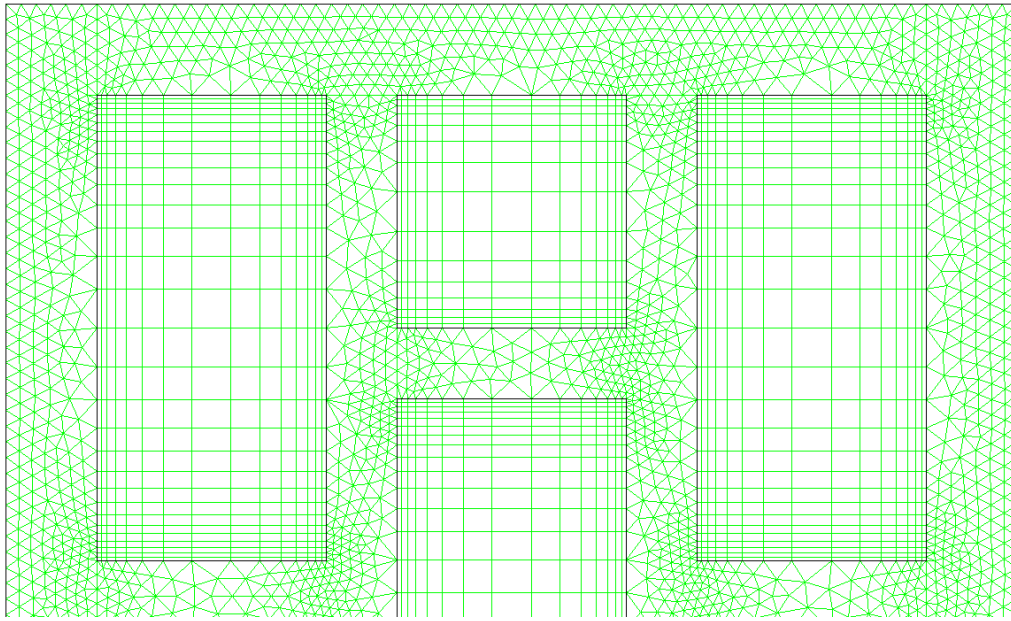


Figure V-5 : Le maillage finale de la brique rectangulaire.

Le rapport du maillage :

Tableau V-5 : Etude de la sensibilité de maillage dans la brique rectangulaire

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Nombre total d'éléments	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)
0.25	404510	3.99

V.3.1.3 La nouvelle brique :

- L'affichage du maillage :

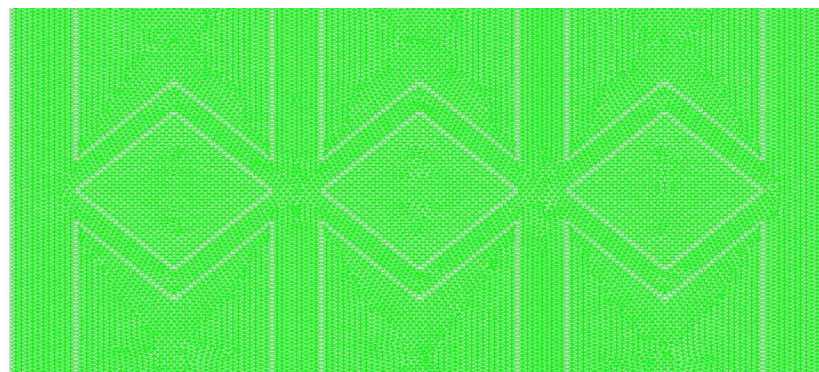


Figure V-6 : Le maillage finale de la nouvelle brique.

Chapitre V : Résultats et discussions

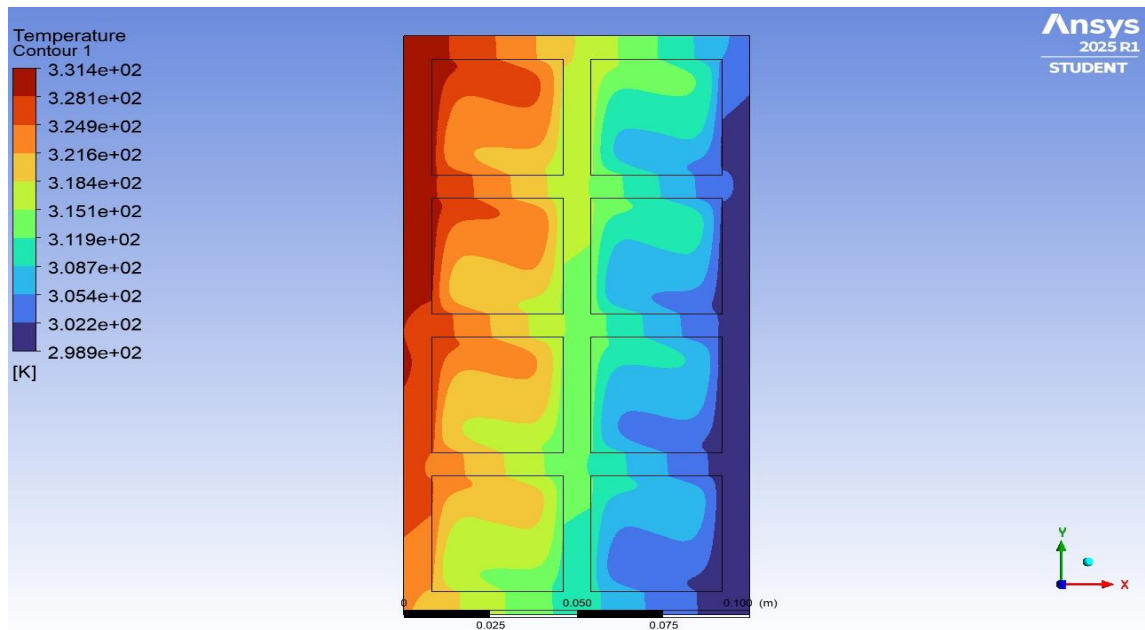
Le rapport du maillage :

Tableau V-6: Etude de la sensibilité de maillage dans la nouvelle brique

Taille d'intervalle entre deux nœuds	Nombre total des nœuds	Flux de chaleur traversant la brique (Watts)
0.25	731884	3.99

V.3.2 Résultats de calculs numériques :

V.3.2.1 La brique standard :



V.3.2.1.1 Champ de température :

Figure V-7 : Evolution de la température dans la brique standard

V.3.2.1.2 Les isothermes :

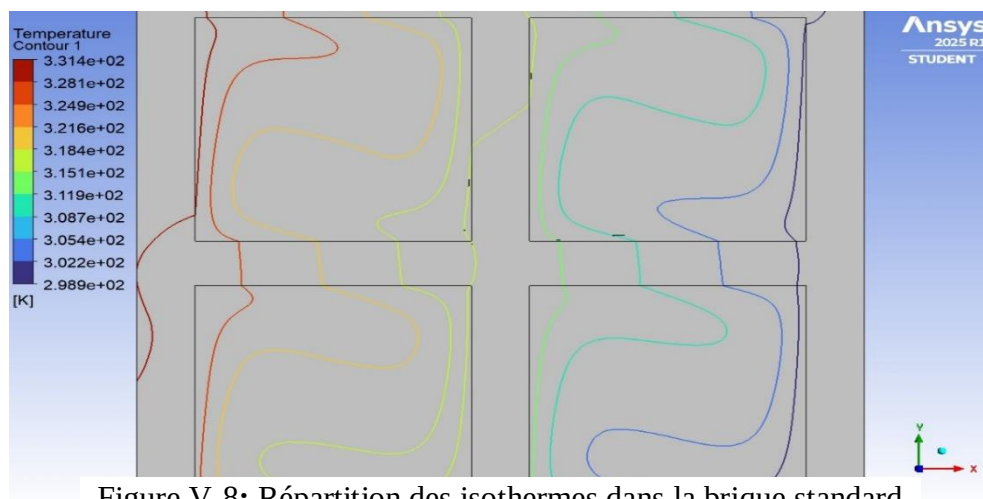


Figure V-8: Répartition des isothermes dans la brique standard

Chapitre V : Résultats et discussions

V.3.2.1.3 Vecteurs de vitesse dans les cellules :

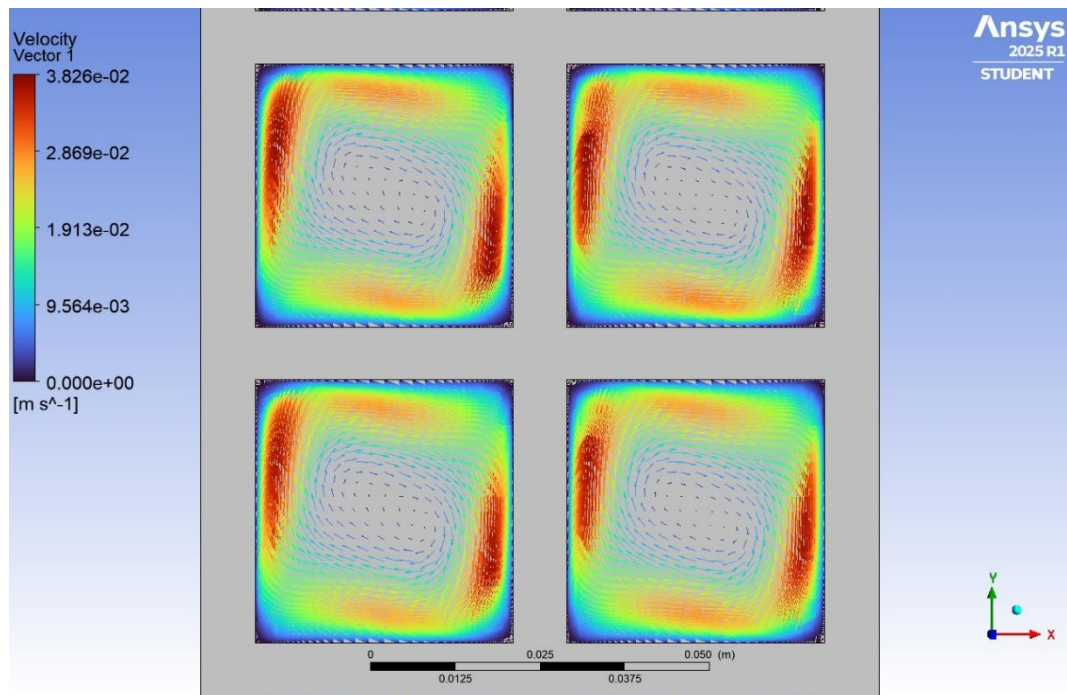


Figure V-9: Affichage des vecteurs de vitesse dans les cavités de la brique standard

V.3.2.1.1 Lignes de courants

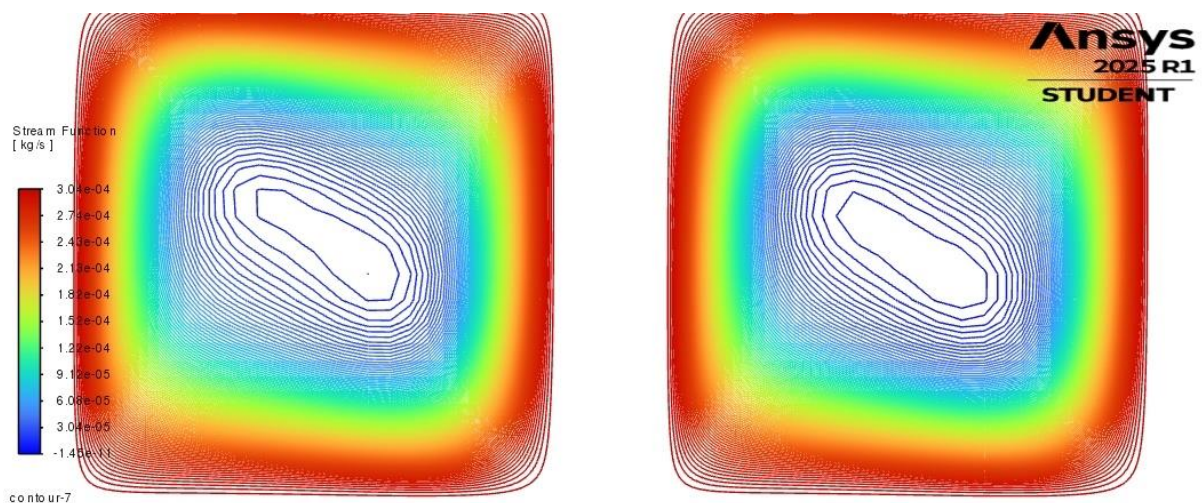


Figure V-10 : Les ligne de courant de la brique standard

Chapitre V : Résultats et discussions

V.3.2.2 La brique rectangulaire

V.3.2.2.1 Champs de température :

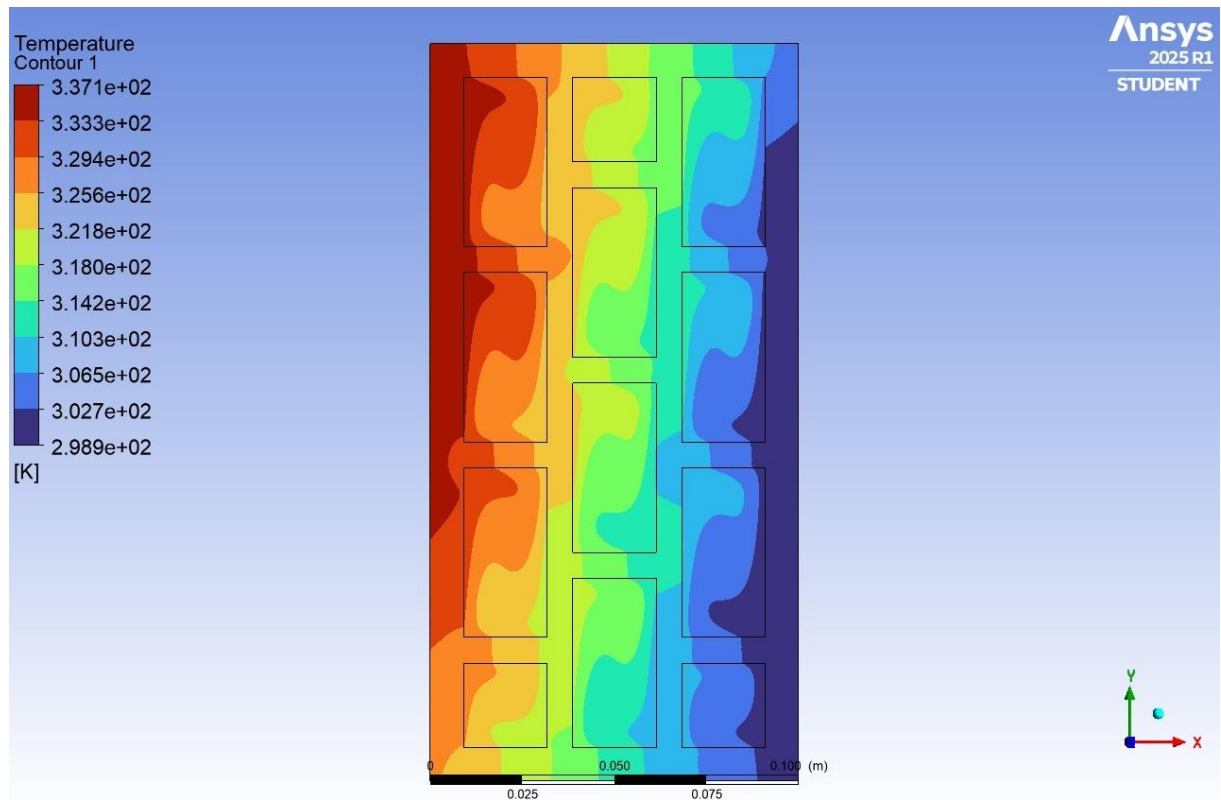


Figure V-11 : Le champ de température de la brique rectangulaire.

V.3.2.2.2 Le champ de vitesse :

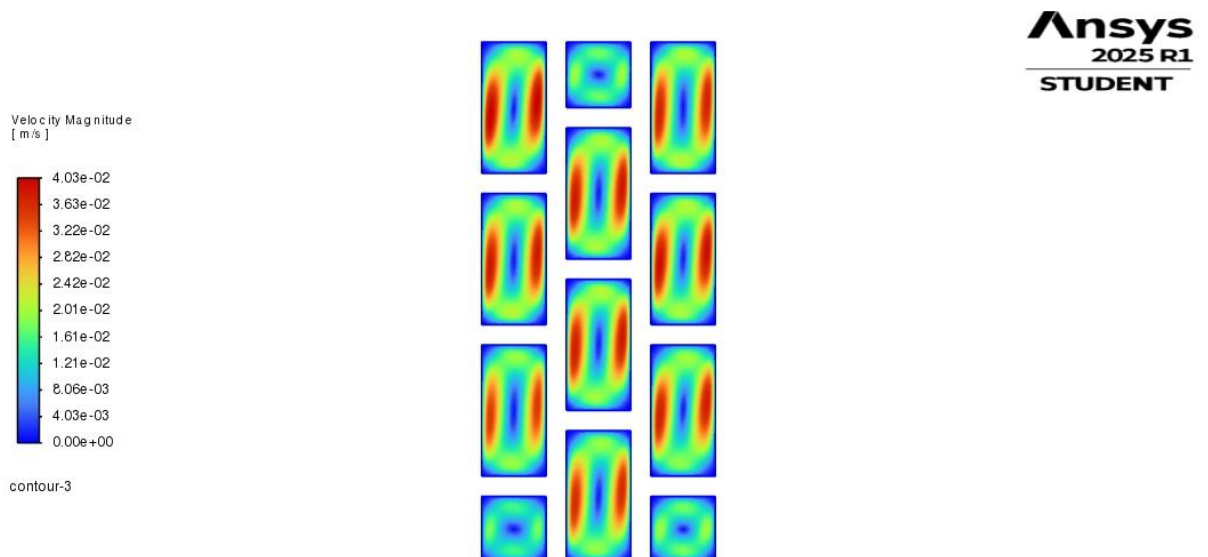
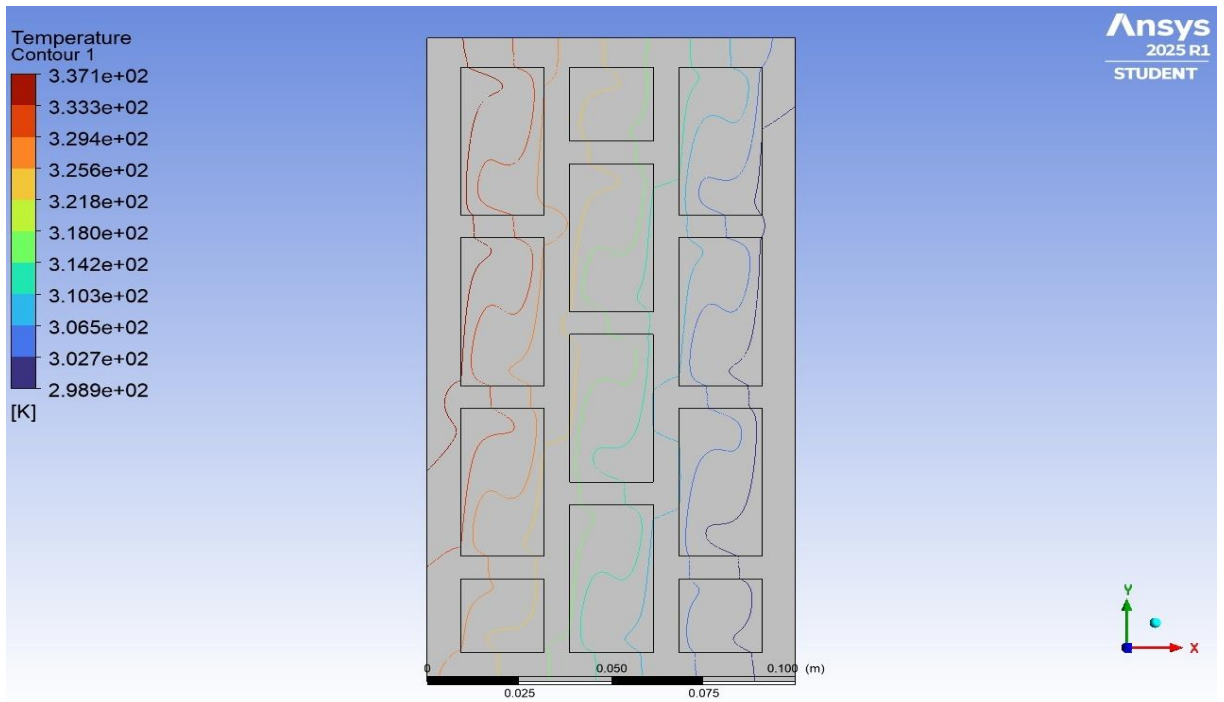


Figure V-12 : champ de vitesse de la brique rectangulaire.



V.3.2.2.3 Les vecteurs vitesse :

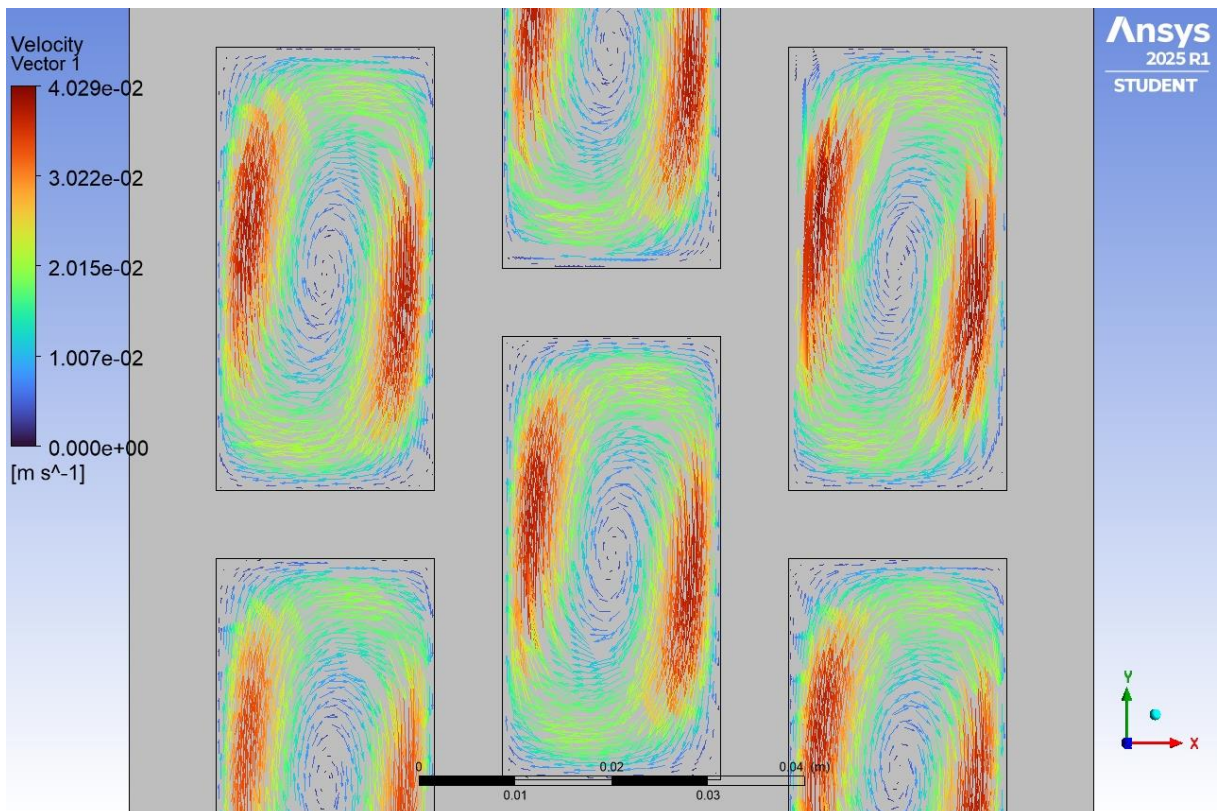


Figure V-13 : Les vecteurs vitesse de la brique rectangulaire.

V.3.2.2.4 Les isothermes :

Figure V-14 : Les isothermes de la brique rectangulaire.

V.3.2.2.5 Les lignes de courant :

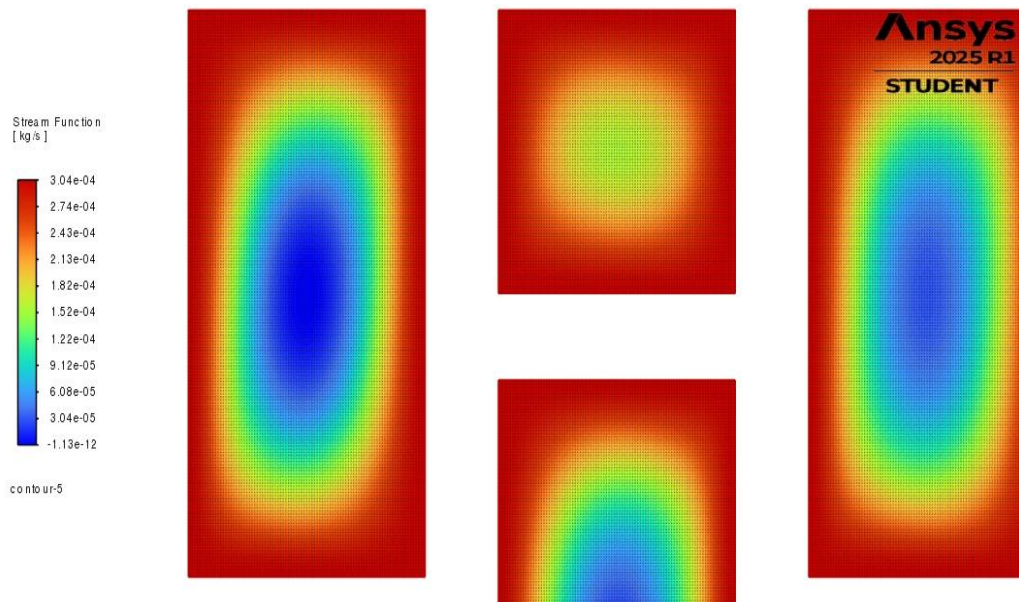


Figure V-15: Les lignes de courant de la brique rectangulaire.

V.3.2.3 La nouvelle brique :

V.3.2.3.1 Le champ de températures :

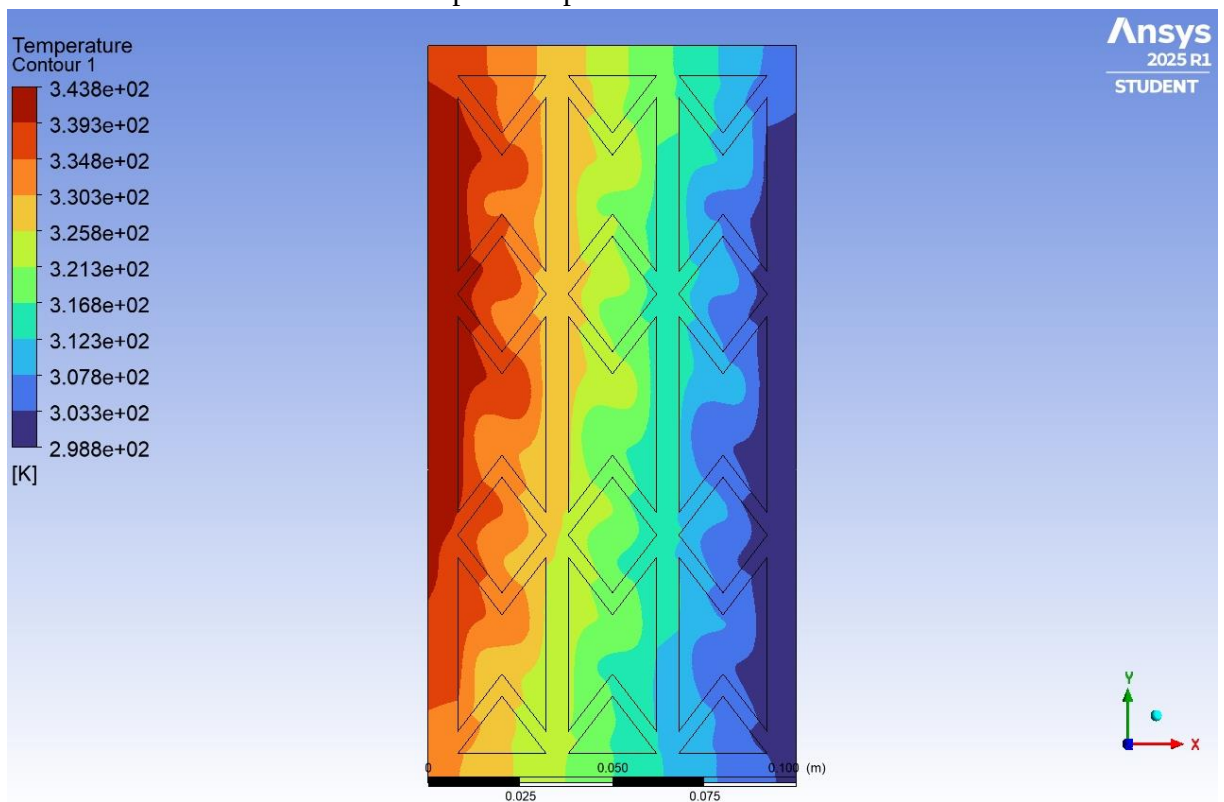


Figure V-16 : Le champ de température de la nouvelle brique.

Chapitre V : Résultats et discussions

V.3.2.3.2 Le champ de vitesse :

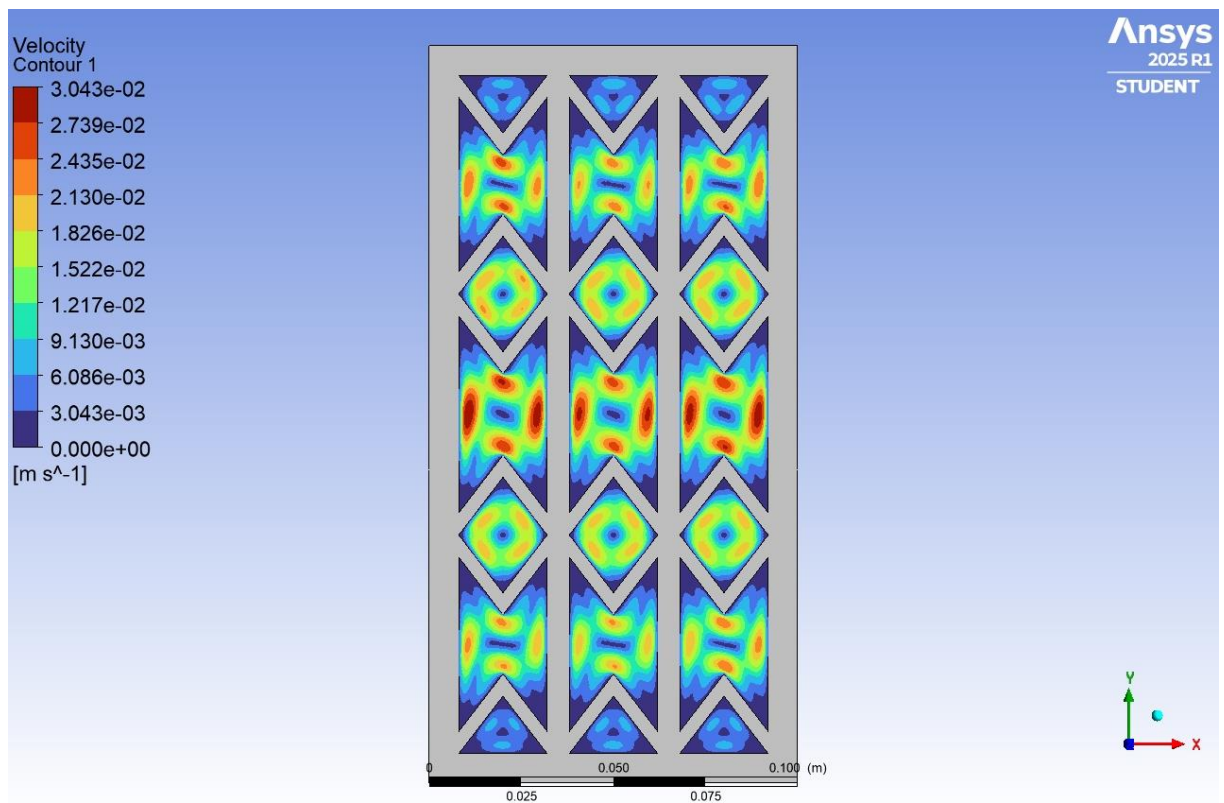


Figure V-17 : Le champ de vitesse de la nouvelle brique.

V.3.2.3.3 Les vecteurs vitesses :

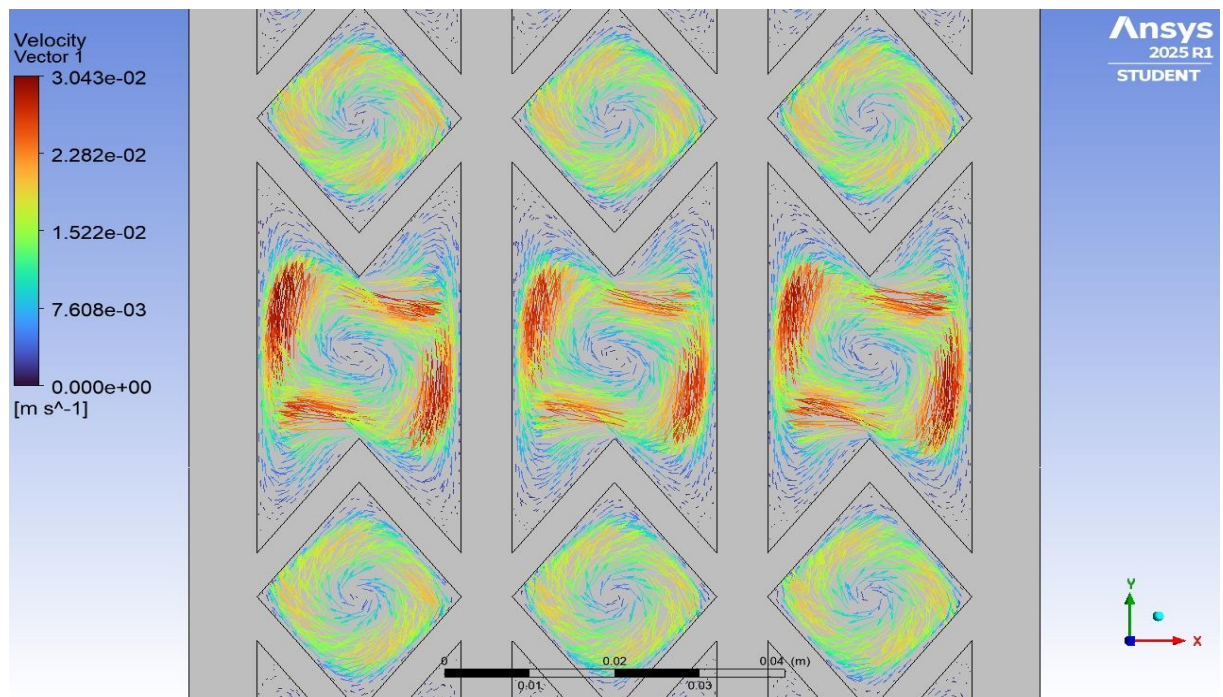


Figure V-18 : Les vecteurs vitesses de la nouvelles brique.

V.3.2.3.4 Les isothermes :

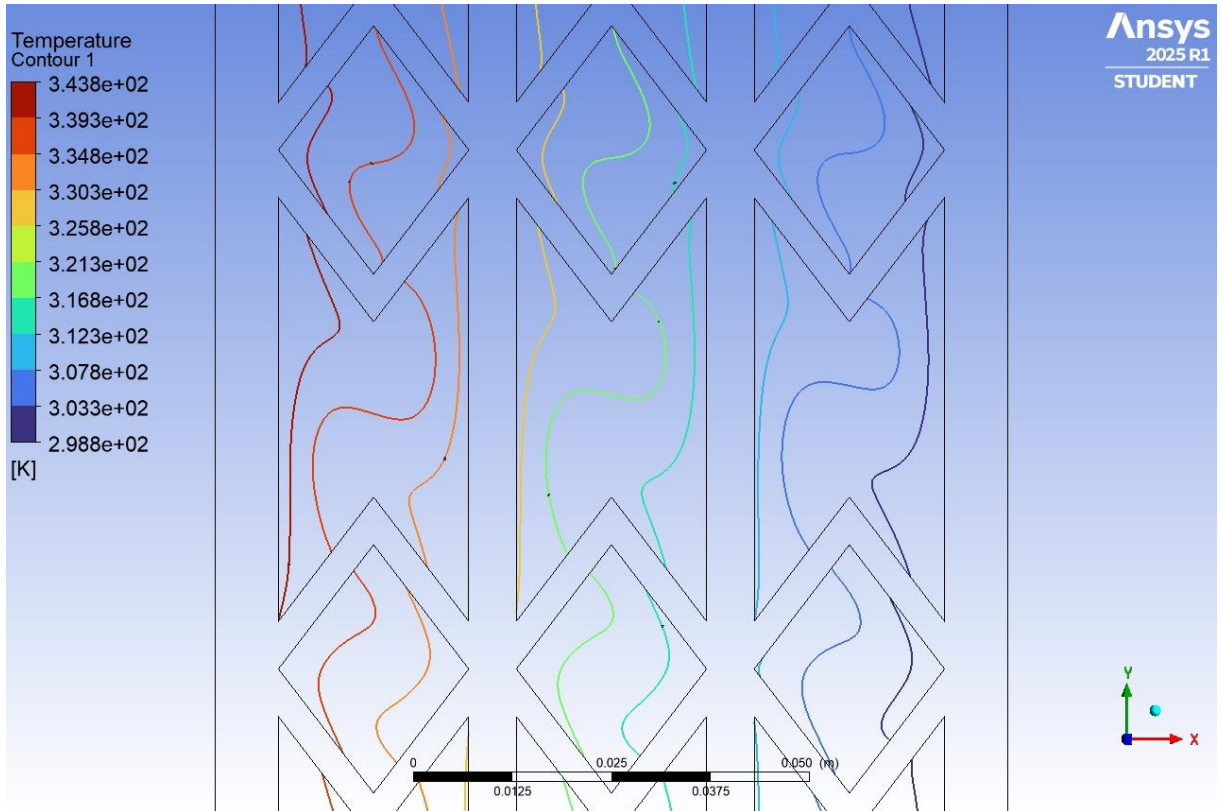


Figure V-19 : Les isothermes de la nouvelle brique.

V.3.2.3.5 Les lignes de courant :

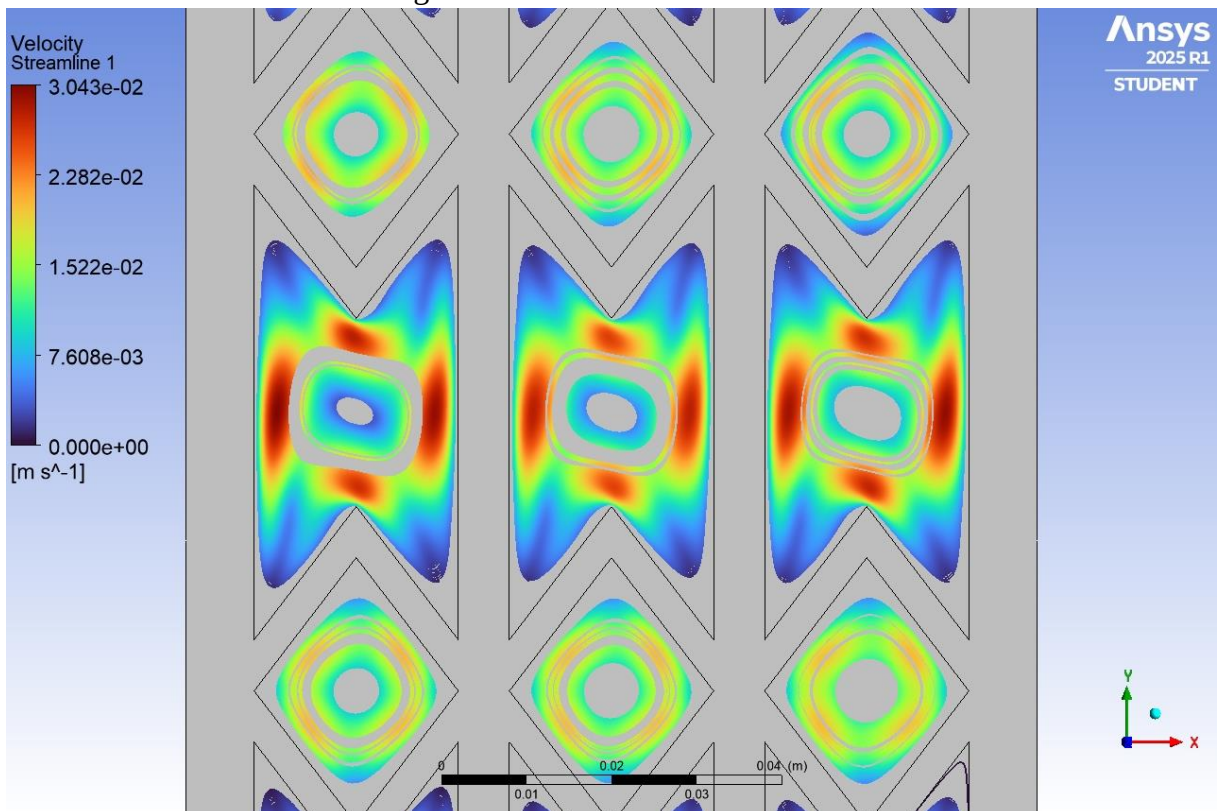


Figure V-20 : Les lignes de courant de la nouvelle brique.

Chapitre V : Résultats et discussions

V.3.3 Comparaison entre les briques :

Le même flux thermique a été imposé aux surfaces extérieures des différentes briques. Conformément à la loi de conservation de l'énergie, et étant donné que les briques présentent une surface d'échange thermique identique, le flux thermique traversant chacune d'entre elles brique à l'autre. D'autre part, un autre facteur important en thermique est la résistance thermique, qui diffère d'un matériau à l'autre. C'est pourquoi on distingue la résistance thermique de chaque brique selon la formule suivante :

On a :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T = \frac{1}{R_{\text{équi}}} A \Delta T \quad (\text{V-1})$$

Avec :

- U : Le coefficient d'échange global [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$].
- A : la surface d'échange [m^2].
- ΔT : la différence de température [K].
- $R_{\text{équi}}$: la résistance équivalente [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$].

La résistance équivalente est la somme des résistances comme décrit la formule suivante :

$$R_{\text{équi}} = R_b \quad (\text{V-2})$$

Avec :

- R_b : la résistance thermique de la brique [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$].

D'où :

$$R_b = \frac{\Delta T \cdot A}{q} \quad (\text{V-3})$$

Traduisant des performances thermiques distinctes, comme le montre le tableau V-7 suivant :

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V-7 : Le gradient de température et les résistances thermiques des briques de construction.

Brique	Le flux de chaleur (W)	ΔT (°C)	La résistance de brique (°C/W)	Le volume (m ³)	La masse (m ²)
La brique standard	3.99	27.5	0.41	0.002352	3.76
La brique rectangulaire	3.99	33.1	0.49	0.00245	3.82
La nouvelle brique	3.99	39.9	0.6	0.0028	4.48

La présente étude compare les performances thermiques de trois briques présentant des caractéristiques physiques et thermiques différentes, notamment en termes de résistance thermique, d'écart de température et de masse. Cette comparaison permet d'évaluer l'influence conjointe des propriétés thermiques et du poids sur le comportement global des matériaux.

La première brique, d'une masse de 3.76 kg, possède une résistance thermique de **0,41 m²·K/W** et présente un écart de température de 27.5 °C entre ses faces. Sa faible masse et sa résistance thermique relativement basse se traduisent par une capacité limitée à stocker et à freiner le transfert de chaleur, ce qui conduit à une performance thermique modérée.

La deuxième brique, d'une masse intermédiaire de 3.82 kg, se caractérise par une résistance thermique plus élevée, égale à **0,49 m²·K/W**, associée à un écart de température de 33.1 °C. L'augmentation simultanée de la masse et de la résistance thermique améliore l'inertie thermique de la brique, contribuant ainsi à une réduction plus efficace des échanges thermiques à travers la paroi.

La troisième brique, la plus lourde avec une masse de **4.48 kg**, présente la résistance thermique la plus élevée (**0,6 m²·K/W**) et l'écart de température le plus important (**39.9 °C**). Cette configuration offre les meilleures performances thermiques parmi les briques étudiées, en raison d'une inertie thermique accrue et d'une meilleure opposition au transfert de chaleur.

En conclusion, les résultats montrent que l'augmentation de la masse, associée à une résistance thermique plus élevée, conduit à une amélioration significative des performances thermiques des briques. La brique de 5 kg se distingue par son comportement thermique optimal, ce qui

Chapitre V : Résultats et discussions

souligne l'importance de prendre en compte à la fois les propriétés thermiques et physiques dans la conception de matériaux de construction à haute performance énergétique.

V.4 Conclusion :

L'étude comparative des trois briques a mis en évidence l'influence déterminante de la résistance thermique et de la masse sur le comportement thermique des parois. Les résultats montrent qu'une augmentation progressive de la résistance thermique, passant de 0,21 à 0,43 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, s'accompagne d'une augmentation de l'écart de température, traduisant une amélioration significative des performances isolantes.

Par ailleurs, l'augmentation de la masse des briques de 3.76 kg à 4.48 kg contribue à une inertie thermique plus élevée, permettant une meilleure atténuation des transferts de chaleur. La troisième brique, combinant la masse la plus élevée et la résistance thermique maximale, présente ainsi les meilleures performances thermiques globales.

En conclusion, cette étude confirme que l'optimisation simultanée des propriétés thermiques et physiques des briques constitue un levier essentiel pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Les résultats obtenus peuvent servir de base pour le choix et la conception de matériaux de construction plus performants sur le plan thermique.

Ainsi, cette étude analyse le comportement thermique d'une brique alvéolaire en tenant compte de la conduction et de la convection naturelle dans les cavités. Les résultats montrent que la géométrie des alvéoles affecte significativement la résistance thermique et l'inertie du matériau. Cependant, le modèle actuel ignore le transfert radiatif, qui devient important dans des conditions réelles avec des gradients de température élevés.

L'échange d'énergie par rayonnement thermique, selon la loi de Stefan-Boltzmann, peut affecter la distribution de la température et la résistance thermique. Pour la modélisation plus précise, il serait bénéfique d'intégrer un modèle de rayonnement surface-surface. Cela permettrait d'estimer la contribution réelle du rayonnement, d'optimiser la géométrie des cavités et d'améliorer la performance énergétique de la brique, notamment dans les climats chauds et humides.

Chapitre VI : Création d'une startup

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.1 Présentation du projet :

VI.1.1 Présentation de l'équipe de projet :

VI.1.1.1 Porteurs de projet

BELAIDI Zohra

Étudiante en fin de cycle, Master 2 en génie mécanique, spécialité énergétique, faculté génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Diplômée en licence en génie mécanique (université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

ZEGGANE Walid

Étudiant en fin de cycle, Master 2 en génie mécanique, spécialité froid, chaud et climatisation, faculté génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Diplômé en licence en génie mécanique (université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

VI.1.1.2 Encadreur :

Mr MAKHLOUF SAID :

Il est professeur et directeur du laboratoire de mécanique, structures et énergétique au sein du département de génie mécanique de la faculté du Génie de la Construction de l'université Mouloud-Mammeri de Tizi-Ouzou. Il a obtenu son DES de Physique à l'université de USTHB en 1982. Il est ensuite parti poursuivre ses études en France, où il a obtenu un DEA en 1983, puis un doctorat en sciences en 1988. De retour en Algérie en 1988, il est devenu un excellent professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, formant plusieurs doctorants et étudiants, et proposant des projets start-up comme le nôtre.

VI.1.2 L'idée du projet (solution proposée) :

Le secteur du bâtiment en Algérie est le principal responsable de la consommation croissante d'énergie, un problème exacerbé par la faible isolation thermique des constructions, dont l'enveloppe est majoritairement assurée par la brique creuse standard. Cette brique traditionnelle est critiquée pour sa faible résistance thermique et sa conduction de chaleur élevée ; elle ne parvient pas à isoler efficacement les intérieurs des conditions climatiques extrêmes du pays (étés très chauds et hivers froids), obligeant les occupants à recourir excessivement à la climatisation et au chauffage, ce qui surcharge le réseau national d'électricité. C'est pourquoi on a eu l'idée de développer une brique creuse à haute performance thermique qui sera une

Chapitre VI : Création d'une Startup

réponse directe et concrète à ce défi, et assure la haute résistance mécanique. En optimisant la géométrie de la brique et ses alvéoles on peut considérablement augmenter la résistance thermique (R) et mécanique du mur, réduisant ainsi drastiquement les besoins en énergie de climatisation et de chauffage.

Ce produit ne sera plus qu'un simple matériau de remplissage, mais un composant actif d'isolation construction fiable, contribuant directement à l'efficacité énergétique et mécanique du bâtiment et à la réduction de la facture énergétique nationale.

VI.1.3 Justification Stratégique :

- **Exceptionnelle** tout en permettant une **réduction significative du coût total de construction** grâce à la parité de coût initial et, surtout, à la faible consommation de mortier lors de l'assemblage.
- **Dépendance excessive** aux solutions d'isolation importées (laines minérales, polystyrène), entraînant des surcoûts et une complexité de mise en œuvre.
- **Absence de production locale massive** de briques intégrées thermiquement (produit "tout-en-un") : opportunité majeure pour un projet national capable de réduire les dépenses énergétiques du pays et d'améliorer durablement le confort des bâtiments.
- **Croissance de la demande nationale** liée au développement constant des infrastructures et à la forte natalité.
- **Matériau de gros œuvre indispensable** dans la majorité des projets de construction.
- **Innovation Technique et Économique** : La brique offre une **rigidité mécanique**

VI.1.4 Valeurs proposés :

VI.1.4.1 Valeur Technique et de Performance :

- **Isolation Thermique Supérieure** : La valeur clé est d'offrir une brique avec une résistance thermique (R) significativement plus élevée que celle des produits standards. Ceci est obtenu par une conception optimisée (géométrie des cavités complexe).
- **Réduction des Ponts Thermiques** : Une meilleure conception structurelle minimise les zones de déperdition de chaleur, assurant une enveloppe plus homogène et performante.
- **Stabilité Dimensionnelle et Qualité** : Un processus industriel moderne garantit des briques ayant des dimensions précises et une haute résistance thermique (plus haute que celle de la brique standard).

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.1.4.2 Valeur Économique pour l'Utilisateur Final

- **Réduction des Coûts Énergétiques** : Pour le propriétaire ou l'occupant, la brique modernisée permet de diminuer drastiquement les besoins en climatisation et en chauffage. Cela se traduit par des économies substantielles sur les factures d'électricité et de gaz.
- **Réduction des coûts de la construction** : La brique développée dans ce travail permet d'assurer l'isolation thermique des murs sans recourir à l'utilisation de matériaux isolants coûteux supplémentaires.
- **Investissement Durable** : La nouvelle brique isolante est positionnée stratégiquement au même coût initial que la brique standard. Cette parité de prix d'achat rend l'investissement immédiatement avantageux, car l'intégralité des économies d'énergie réalisées tout au long du cycle de vie du bâtiment se traduit directement par un gain net pour le propriétaire, maximisant ainsi le retour sur investissement sans surcoût initial.
- **Meilleur Confort de Vie** : Les murs régulent mieux la température intérieure, assurant un confort thermique accru en toute saison.

VI.1.4.3 Valeur Environnementale et Stratégique pour l'Algérie :

1. **Contribution à l'Efficacité Énergétique Nationale** : En réduisant la demande d'énergie dans le secteur du bâtiment (le plus énergivore), le projet participe directement aux objectifs nationaux de maîtrise de l'énergie.
2. **Réduction des Émissions** : Moins de consommation d'énergie (électricité produite majoritairement par des combustibles fossiles) signifie une réduction de l'empreinte carbone des constructions.
3. **Valorisation des Ressources Locales** : Utilisation et transformation des argiles algériennes en un produit à haute valeur ajoutée technologique.
4. **Alignement Réglementaire** : Le projet se positionne favorablement par rapport aux actuelles ou futures réglementations thermiques obligatoires pour les nouveaux bâtiments.

VI.1.5 Objectifs du projet :

- **Nos Objectifs à moyen terme** :

Chapitre VI : Création d'une Startup

- Finaliser la conception de la brique modernisée (géométrie, composition) pour atteindre la résistance thermique (R) ciblée et une résistance mécanique importante qui assure la solidité du mur.
- Procéder à l'installation, au réglage et à la mise en service des équipements de production (four, séchoir, ligne de façonnage).
- Atteindre la parité de coût initial entre la nouvelle brique isolante et la brique standard du marché.
- Obtenir les certifications et homologations nécessaires (Normes NA) pour la commercialisation du nouveau produit.
- Recruter et former le personnel technique et opérationnel à la maîtrise du processus de fabrication optimisé.
 - **Nos Objectifs à long terme :**
- Atteindre la rentabilité financière et assurer la pérennité du projet sur le marché algérien.
- Devenir la référence de choix pour les projets de construction nécessitant une performance énergétique élevée et une bonne résistance mécanique (bâtiments publics, logements haut de gamme).
- Contribuer significativement à la réduction de la consommation énergétique nationale du secteur du bâtiment (via l'adoption massive du produit).
- Réaliser des économies substantielles et durables pour l'utilisateur final sur sa facture énergétique et sur la facture de construction.
- Être reconnu comme un moteur de l'innovation et de la transition énergétique dans l'industrie algérienne des matériaux de construction.

VI.1.6 Calendrier de réalisation

La réalisation du projet s'effectuera selon le calendrier suivant :

Chapitre VI : Création d'une Startup

			MARS	AVRIL	MAI	JUN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DÉCEMBRE
1		étude préalable : formation, préparation des supports et documents nécessaires,	X	X								
2		conception du premier moule prototype sur logiciel solidworks			X							
3		formation sur le terrain industriel (briquaterie IZERKHEF)				X						
4		simulation et modélisation numérique sur le logiciel CFD				X	X					
5		réalisation du premier prototype en bois					X					
6		réalisation du deuxième prototype en tôle d'acier							X	X	X	X

VI.2 L'aspect innovant du projet :

VI.2.1 Nature de l'Innovation :

L'innovation de notre projet est principalement une innovation d'usage de produit qui représente une modification significative des caractéristiques de la brique creuse existante. Elle est centrale car elle transforme la brique pour lui conférer une double fonctionnalité essentielle : elle ne sert plus uniquement de support structurel, mais devient également un isolant thermique performant, garantissant ainsi une résistance thermique considérablement accrue. Crucialement, cette nouvelle conception garantit une rigidité mécanique maintenue, permettant à la fois une utilisation structurelle fiable et un assemblage facilité avec moins de mortier.

VI.2.2 Domaine d'Innovation

Notre projet est une amélioration du projet s'inscrit clairement dans le domaine de la Transition Énergétique et du Génie de la construction.

Chapitre VI : Création d'une Startup

- Offrir un produit rentable avec une bonne résistance thermique.
- Offrir une résistance mécanique et homogénéité de mur remarquable.
- Offrir un confort thermique à l'intérieur des locaux en minimisant la consommation d'énergie
- Trouver une solution au problème de la surconsommation d'énergie par le secteur résidentiel en Algérie
- Le projet soutient la transition énergétique en proposant un moyen passif et durable de réduire les besoins en énergie des constructions.

VI.2.3 Intensité d'innovation :

En termes d'innovation, le présent projet relève d'une innovation incrémentale. Il ne s'agit pas de créer un matériau entièrement nouveau, mais d'améliorer une brique de construction déjà existante par l'optimisation de sa géométrie et de ses performances thermiques et mécaniques. Cette approche permet de s'appuyer sur des procédés industriels maîtrisés tout en apportant une valeur ajoutée significative en matière d'efficacité énergétique. L'innovation proposée est ainsi facilement intégrable dans le tissu industriel existant, avec un risque technologique limité, ce qui favorise son adoption par le secteur du bâtiment et contribue concrètement aux objectifs de la transition énergétique.

VI.3 L'analyse stratégique du marché :

VI.3.1 Segmentation du marché :

- **Marché potentiel**

Le marché potentiel de la brique isolante englobe l'ensemble des acteurs du secteur du bâtiment et de la construction en Algérie, incluant les organismes publics et étatiques, les promoteurs immobiliers privés, les auto-constructeurs et particuliers, ainsi que les entrepreneurs généraux et sociétés de construction. Ce marché est porté par la forte demande en logements, la croissance du secteur résidentiel et la nécessité croissante de réduire la consommation énergétique des bâtiments.

- **Marché ciblées**

Organismes Publics et Étatiques :

Chapitre VI : Création d'une Startup

Ce segment est critique en Algérie, englobant les agences de logement social (AADL, OPGI...etc.) et les administrations gérant la construction d'infrastructures publiques (écoles, hôpitaux... etc.). Ces entités sont principalement sensibles au coût initial que notre produit neutralise et aux objectifs nationaux de réduction énergétique et aussi la réduction du coût de la construction. Les cible garantit des volumes importants et contribue directement à la diffusion de l'efficacité énergétique à grande échelle.

Les Promoteurs Immobiliers Privés (Haut de Gamme) :

Ce segment concerne les entreprises construisant des résidences de luxe, des complexes touristiques ou des bureaux modernes. Leur motivation première est la différenciation et la qualité de vie. Ils peuvent utiliser la qualité de confort et de sécurité de son immeuble et le prix raisonnable de l'achat qui est causé par la décroissance de revue annuelle de la construction, comme un argument et plaider les clients et les satisfaire.

Les Auto-Constructeurs et Particuliers :

Ce marché est très sensible à la fois au budget et aux bénéfices à long terme. La parité de coût initial de notre brique est un atout décisif pour ce segment, car il leur permet d'intégrer une meilleure performance énergétique et mécanique sans compromettre le budget de gros œuvre. Ils sont directement récompensés par des économies substantielles sur leurs propres factures d'énergie futures et les factures de construction.

Les Entrepreneurs Généraux et Sociétés de Construction :

Bien qu'ils ne soient pas les utilisateurs finaux, ils sont les prescripteurs et les acheteurs directs en volume. Il est essentiel de les cibler en mettant l'accent sur la facilité d'utilisation, la conformité technique et le fait que la brique isolante simplifie la chaîne de construction en intégrant l'isolation dans le mur porteur, et une bonne tenue assurée par la haute rigidité mécanique de la brique et le principal atout, la facilité d'assemblage et la réduction significative de la consommation de mortier(ciment), permettant de minimiser les coûts de main-d'œuvre et de matériaux chers. Réduisant potentiellement le besoin d'isolants additionnels coûteux.

Possibilités de conclusion des contrats :

Chapitre VI : Création d'une Startup

Les possibilités de conclusion des contrats sont élevées compte tenu de l'adéquation du produit avec les besoins du marché. Elles peuvent prendre la forme de contrats cadres avec les organismes publics, de partenariats avec des promoteurs immobiliers privés, de ventes en gros aux entreprises de construction, ainsi que de distribution directe auprès des particuliers via des réseaux de matériaux de construction. La compétitivité économique, la simplicité d'intégration dans les procédés constructifs existants et les bénéfices énergétiques à long terme facilitent l'adoption du produit et contractuelles durables. Favorisent des relations.

VI.3.2 Perspective de Conclusion de Contrats d'Achat (Révisée) :

- Les Organismes Publics procèdent généralement par appels d'offres annuels ou pluriannuels, avec la possibilité de conclure des contrats cadres. La performance énergétique nationale et la réduction des coûts à long terme sont les arguments clés.
- Les Promoteurs Privés, quant à eux, disposent de procédures d'achat plus flexibles, permettant une conclusion rapide des transactions, notamment lorsque la parité de coût initial est démontrée.
- Les Entreprises de Gros Œuvre (Entrepreneurs Généraux), qui sont de gros consommateurs de briques, représentent une cible prioritaire pour les commandes en volume. Elles seront convaincues par la rigidité mécanique du produit et l'avantage direct sur le chantier : la réduction du coût de construction grâce à la faible consommation de ciment.
- Enfin, des partenariats avec des négociants de matériaux (distributeurs) ouvrent des perspectives nationales et régionales.

VI.3.3 Intensité de la Concurrence

- **Concurrents Directs** : Les grandes briqueteries nationales et régionales (souvent sans nom de marque fort) qui produisent la brique creuse standard (le produit de substitution le plus direct en termes de gros œuvre).
- **Concurrents Indirects** : Les autres matériaux de gros œuvre (parpaings en béton, blocs de béton cellulaire autoclave (BCA), systèmes de coffrage isolant) et les fournisseurs de solutions d'isolation séparées (polystyrène expansé/extrudé, laines minérales) qui répondent au besoin de performance thermique.

Chapitre VI : Création d'une Startup

- **Part de Marché Actuelle** : 90% dominée par la brique creuse standard et le parpaing ; 10% par les solutions d'isolation externe ou les matériaux alternatifs.
- **Faiblesses des Concurrents** :
 - Absence de performance thermique intégrée (nécessité d'ajouter une couche d'isolation).
 - Coût total du mur fini souvent plus élevé (à cause du coût des isolants additionnels et de la main-d'œuvre).
 - Forte consommation de mortier pour la brique standard.

VI.3.3.1 Avantage Stratégique du Projet :

- Fabrication locale.
- Parité de prix initial avec la brique standard.
- Réduction des coûts de pose grâce à la faible consommation de mortier.
- Performance thermique et mécanique certifiée.
- Produit "tout-en-un" qui simplifie la chaîne de construction.

VI.3.4 Stratégie Marketing

VI.3.4.1 Segmentation :

- Organismes Publics (AADL, OPGI)
- Promoteurs Immobiliers Privés (Résidentiel haut de gamme)
- Entrepreneurs Généraux (Sociétés de gros œuvre)
- Auto-Constructeurs Individuels
- Distributeurs de matériaux de construction

VI.3.4.2 Ciblage :

Priorité sur :

- Organismes Publics : (Grand volume, alignement sur les objectifs énergétiques nationaux).
- Entrepreneurs Généraux : (Achats réguliers en volume, impact direct de la réduction du coût de main-d'œuvre et de ciment).
- Promoteurs Privés : (Valorisation de la différenciation et de l'argument de confort client).

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.3.4.3 Positionnement :

- Matériau de gros œuvre local certifié.
- Performance thermique et mécanique garantie (produit fiable et durable).
- Prix du mur fini compétitif (grâce à la réduction de la consommation de ciment).
- Simplicité de mise en œuvre pour les maçons.
- Contribution directe aux économies d'énergie à vie du bâtiment.

VI.3.4.4 Mix Marketing (Les 4P) :

Produit : Brique creuse isolante (Résistance thermique certifiée), haute rigidité mécanique, système d'emboîtement optimisé pour une pose avec mortier-colle mince ou joint réduit, dimensions adaptées aux modules de construction locaux.

Prix : Prix unitaire proche de la brique standard, mais avec une communication axée sur le coût total du mur fini (plus compétitif), offres pour grands volumes (contrats cadres).

Place (Distribution) : Vente directe aux grands promoteurs et organismes publics, partenariats stratégiques avec les négociants en matériaux les plus influents, création d'un réseau de distribution national ciblé.

Promotion : Démonstrations sur chantiers (pour prouver la facilité de pose et l'économie de ciment), calculs personnalisés (retour sur investissement énergétique) pour les promoteurs, participation aux salons du BTP, formation des maçons et ingénieurs.

VI.4 Plan de Production et Organisation (Briqueterie Innovante)

VI.4.1 Le Processus de Production

Le processus de production de la brique isolante et rigide se compose de plusieurs étapes essentielles, permettant d'assurer la qualité, la performance thermique et la solidité mécanique du matériau. Ce processus comprend l'extraction et la préparation de la matière première, la fabrication et le façonnage des briques (avec création des alvéoles isolantes), le séchage, la cuisson, ainsi que le conditionnement final. Chaque étape est cruciale pour obtenir une brique conforme aux normes du BTP et adaptée aux exigences d'efficacité énergétique. Le tableau suivant définit chaque étape et sa durée :

Chapitre VI : Création d'une Startup

Étape du processus	Description	Durée approximative
Extraction de la matière première	Extraction de l'argile et transport vers l'unité de production	Variable (selon site)
Préparation de l'argile	Broyage, humidification et malaxage pour obtenir une pâte homogène	12 à 24 h
Façonnage / extrusion	Mise en forme de la brique avec création des alvéoles isolantes	Quelques minutes par brique
Découpe	Découpe des briques aux dimensions normalisées	Quelques secondes
Séchage	Élimination progressive de l'humidité pour éviter les fissures	24 à 72 h
Cuisson	Cuisson dans un four pour assurer la résistance mécanique	24 à 48 h
Refroidissement	Refroidissement contrôlé après cuisson	12 à 24 h
Conditionnement	Contrôle qualité, stockage et emballage	Variable

Tableau VI-1 :Processus de production.

VI.4.1.1 Achat de Matières Premières (MP)

- **Collecte de la Matière Première :** Choix et acquisition de l'argile (homogène et de qualité), des additifs dégression (tuf) pour la correction de la qualité de l'argile, et des combustibles nécessaires à la cuisson (Gaz Naturel). Tous les matériaux doivent se conformer aux standards de qualité pour garantir la performance thermique et mécanique finale.
- **Fournisseurs :** Sélection et mise en place de contrats avec des fournisseurs fiables pour l'argile (gestion de la carrière) et avec des partenaires énergétiques (gaz) pour garantir une disponibilité durable et optimisée en coûts.

VI.4.1.2 Conditionnement de produit d'emballage :

Après la phase de production, les briques font l'objet d'une inspection visuelle et fonctionnelle afin de détecter d'éventuels défauts de cuisson, fissures ou non-conformités dimensionnelles. Les briques conformes sont ensuite empilées, palettisées, filmées et étiquetées, avec l'indication des informations techniques essentielles (numéro de lot, caractéristiques mécaniques et thermiques, résistance). Cette étape vise à assurer la protection du produit, la traçabilité et la sécurité lors de la manutention et du transport.

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.4.1.3 Préparation des commandes logistique :

Les commandes sont préparées en fonction des besoins des clients (quantités, destinations), tout en respectant les délais de livraison.

VI.4.1.4 Recours à la Manutention :

- **Automatisation du Traitement des Matériaux :** Utilisation de chargeurs, tapis roulants, ponts roulants, robots de palettisation pour manipuler les grands volumes de briques et de matières premières.
- **Manipulation Manuelle :** Limitée aux tâches d'inspection, de réglage fin des machines et de gestion des incidents.
- **Formation des Employés :** Formation intensive sur l'utilisation des équipements industriels lourds, la maîtrise du cycle de cuisson (thermique) et les normes de sécurité en vigueur dans l'industrie

VI.5 . L'Approvisionnement (Briqueterie Innovante) :

VI.5.1 Détermination de la Politique d'Achat :

La politique d'acquisition doit garantir la qualité, la disponibilité et l'efficacité des coûts pour les matières premières (MP), l'énergie et les équipements requis pour la production de la brique isolante.

- **Matières Premières de Base (Lourdes) :** Opter pour l'acquisition et l'exploitation d'une carrière d'argile propre et homogène. La stratégie doit se concentrer sur la sécurisation à long terme du gisement d'argile de qualité requise pour l'extrusion et la cuisson.
- **Énergie et Combustible :** Établir un contrat d'approvisionnement stable en électricité et en Gaz Naturel (ou autre combustible pour le four tunnel) pour assurer la continuité de la production et la maîtrise des coûts énergétiques.
- **Divers Matériaux et Fournitures :** Inclure les fournitures requises pour le conditionnement et l'expédition (palettes en bois, film plastique pour le cerclage, étiquettes, etc.). Établir des contrats de longue durée pour stabiliser les prix logistiques.
- **Équipements et Pièces de Rechange :** Acquisition et maintenance des équipements lourds (concasseur, malaxeur, extrudeuse, filières spécifiques, fours, séchoirs, palettiseurs). Accorder la priorité aux fournisseurs qui offrent des garanties, des services

Chapitre VI : Création d'une Startup

de maintenance et un support technique localisé pour les pièces d'usure (notamment les filières de façonnage).

VI.5.2 Détermination des Fournisseurs les plus Importants

- **Argile** : Contrôle du carrière d'argile (autonomie) ou partenariat exclusif avec un gisement de qualité.
- **Énergie** : Partenariat stratégique et négociations de volume avec l'entreprise nationale de distribution de gaz (Sonelgaz) ou d'électricité.
- **Équipements de Façonnage** : Collaborer avec des fabricants internationaux d'équipements de briqueterie réputés pour la robustesse et la précision des extrudeuses et des filières.
- **Logistique** : Opter pour des fournisseurs stables de palettes et de transport pour la livraison des volumes importants.

VI.5.3 Détermination de la Politique de Paiement et des Délais de Réception

- **Politique de Paiement** : La négociation de conditions de paiement flexibles permet de maintenir de bonnes relations avec les fournisseurs réguliers et d'assurer une disponibilité continue des matières premières, indispensables à la production quotidienne. Cette approche repose sur un mécanisme de dettes à court terme, caractérisé par le versement d'un acompte à la commande, généralement compris entre 20 et 30 %, le solde étant réglé ultérieurement selon les délais convenus.
- **Délais de livraison** : Définir des délais de livraison clairs pour assurer la fiabilité de marché. Mise en place de stocks de sécurité (argile préparée et pièces de rechange critiques) pour éviter les arrêts de production, très coûteux dans l'industrie lourde.
- Un stock de sécurité est maintenu pour les matières premières afin de prévenir les retards éventuels ou les perturbations logistiques

VI.5.4 Gestion de la chaîne d'approvisionnement et optimisation des livraisons

Utilisation de systèmes informatiques de gestion des stocks et des tournées de livraison pour minimiser les coûts de transport (par kilomètre) et assurer la ponctualité sur les chantiers.

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.6 La Main-d'œuvre :

VI.6.1 Les qualifications des personnes :

- **Opérateurs et Techniciens** : Aptitudes en électromécanique, automatisation et thermique industrielle. Emplacement : Site de Production (Briqueterie).
- **Ingénieurs** : Ingénieurs en Matériaux, Génie des Procédés ou Thermique. Rôle dans l'optimisation des mélanges et la surveillance du cycle de cuisson. Emplacement : Bureau d'ingénierie sur site.
- **Personnel de Contrôle de Qualité** : Expérience dans le domaine des normes du BTP et des essais de résistance. Emplacement : Laboratoire d'Assurance Qualité sur site.

VI.6.2 Le Nombre de postes Créés et leurs spécialités :

Une estimation de 25 à 40 postes peut être envisagée, compte tenu de l'automatisation de la production (four tunnel) mais aussi de la gestion des volumes lourds et du contrôle qualité.

- **Opérateurs de Production et de Façonnage (8–12 postes)** : Surveillance des lignes d'extrusion, séchage et enfournement/défournement.
- **Techniciens de Maintenance Industrielle (4–6 postes)** : Maintenance mécanique et électrique des machines lourdes (extrudeuse, four, broyeurs, robots de palettisation).
- **Personnel Logistique et Carrière (4–6 postes)** : Gestion des stocks d'argile et de produits finis, chargement/déchargement.
- **Contrôle Qualité (2–3 postes)** : Vérification des résistances mécaniques et thermiques, gestion des normes.
- **Équipe Administrative et Gestion (4–5 postes)** : Comptabilité, GRH, gestion de projet, direction.
- **Responsable Marketing et Commercial (2 postes)** : Relations avec les promoteurs et les distributeurs, négociation des appels d'offres

VI.7 Les Principaux Partenaires (Briqueterie Innovante) :

VI.7.1 Fournisseurs

- **Équipements Industriels** : Fabricants de fours tunnels, d'extrudeuses de haute précision, de broyeurs.
- **Énergie** : Organismes publics pour l'approvisionnement en Gaz Naturel.

Chapitre VI : Création d'une Startup

- **Additifs et Matières Premières Secondaires** : Fournisseurs de tuf.
- **Logistique** : Sociétés de transport et fournisseurs d'emballage industriel (palettes, films).

VI.7.2 Collectivités et Institutions Publiques

- **Assistance Publique** : Aides financières, incitations fiscales pour l'investissement industriel lourd, soutien aux projets énergétiques et de souveraineté nationale.
- **Administrations** : Facilitation de l'obtention des permis d'exploitation de carrière et des autorisations de construction.

VI.7.3 Centres de Recherche et Laboratoires

- **Universités et Laboratoires Spécialisés** : Assistance pour la validation des performances thermiques (R) et mécaniques (résistance à la compression) selon les normes algériennes et internationales.
- **Centres Techniques du Bâtiment** : Validation de la conformité du produit et de son comportement en œuvre
- **Incubateur UMMTO** : Incubateurs constitue des structures d'accueil et d'accompagnement de projets innovants ayant un lien direct avec la recherche. Il nous a aidés à formaliser nos idées et à valider la faisabilité de notre projet. Il est chargé à accomplir deux missions : mission valorisation et mission sensibilisation.

VI.7.4 Banques et Institutions Financières

- **Banques Commerciales** : Financement des investissements lourds (CPA) pour les équipements et l'usine.
- **Structures de Soutien à l'Investissement** : Fonds spécialisés ou fonds d'innovation pour le démarrage et la croissance (CPA, BNA).

V.4.4.5. Partenaires Commerciaux et Clients

- **Distributeurs de Matériaux** : Partenariats clés pour la diffusion nationale du produit.
- **Entrepreneurs Généraux et Promoteurs** : Utilisateurs finaux majeurs et sources de contrats en volume.
- **Organismes de Normalisation** : Pour la certification et l'homologation du produit (conformité aux normes antisismiques et thermiques).

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.8 Prestataires de Services Logistiques

- **Sociétés de transport spécialisées (matériaux de construction lourds) :**
Partenariat avec des entreprises disposant de flottes de camions à forte capacité de charge (semi-remorques, camions plateaux). Leur rôle est d'assurer l'acheminement des briques palettisées vers :
 - o Les grands chantiers (Organismes Publics et Promoteurs).
 - o Le réseau de distributeurs/négociants en matériaux.
- **Services de stockage externalisé (en cas de pic de production ou de demande) :**
Location d'entrepôts ou de plateformes logistiques (de préférence à ciel ouvert et sécurisés) pour stocker les palettes de briques finies avant leur expédition. Cela permet de :
 - o Soulager l'espace de stockage de l'usine.
 - o Répondre rapidement aux commandes volumineuses (AADL, gros promoteurs).

Gestion de la chaîne d'approvisionnement et optimisation des livraisons : Utilisation de systèmes informatiques de gestion des stocks et des tournées de livraison pour minimiser les coûts de transport (par kilomètre) et assurer la ponctualité sur les chantiers.

VI.9 Le plan financier du projet et Business Model Canvas (BMC)

VI.9.1 Les coûts et charges :

Le tableau ci-dessous récapitule les principales charges d'exploitation annuelles liées au fonctionnement courant de la briqueterie, telles que la masse salariale, l'énergie, les matières premières et la maintenance

Poste d'investissement	Description	Coût estimé (DZD)
Équipements industriels lourds	Four tunnel, extrudeuse, séchoir industriel, broyeur, convoyeurs, automatisation	300 000 000 – 540 000 000
Génie civil et bâtiments industriels	Hangar de production, fondations, aires de stockage, bureaux administratifs	50 000 000 – 150 000 000
Installation et mise en service	Montage des équipements, essais, mise en fonctionnement	20 000 000 – 60 000 000
Études techniques et autorisations	Études de faisabilité, ingénierie, dossiers réglementaires	5 000 000 – 15 000 000

Chapitre VI : Création d'une Startup

Poste d'investissement	Description	Coût estimé (DZD)
Total estimé de l'investissement initial	—	375 000 000 – 765 000 000

Tableau VI-2 : Charge d'investissement

VI.9.2 Charges d'exploitation :

Le tableau suivant détaille les charges mensuelles liées à l'exploitation du site industriel, incluant les coûts de location, de transport, de logistique et les charges diverses.

Poste de charge	Description	Coût mensuel estimé (DZD)	Coût annuel estimé (DZD)
Location du site industriel	Loyer du site de production (si non propriétaire)	150 000 – 300 000	1 800 000 – 3 600 000
Masse salariale	Chef d'unité, techniciens, opérateurs, maintenance, sécurité	600 000 – 1 000 000	7 200 000 – 12 000 000
Énergie et fluides	Gaz naturel, électricité, eau industrielle	300 000 – 600 000	3 600 000 – 7 200 000
Matières premières	Argile, sable, additifs, palettes	200 000 – 400 000	2 400 000 – 4 800 000
Maintenance et pièces de rechange	Entretien des équipements, pièces mécaniques	100 000 – 250 000	1 200 000 – 3 000 000
Transport et logistique	Acheminement des matières et livraison des briques	150 000 – 3 00 000	1 800 000 – 3 600 000
Assurances et charges diverses	Assurances industrielles, frais administratifs	80 000 – 150 000	960 000 – 1 800 000
Total estimé des charges d'exploitation	—	1 580 000 – 3 000 000	18 960 000 – 36 000 000

Tableau VI-3 : Charges d'exploitation

VI.9.3 Coûts commerciaux et administratifs

Le tableau ci-après présente les dépenses de support nécessaires à la gestion administrative, commerciale et informatique de l'entreprise, notamment le marketing, les logiciels de gestion et les honoraires professionnels.

Poste de dépense	Description	Coût estimé (DZD)
Marketing et commercialisation	Signalétique, actions de prospection, supports commerciaux et communication	300 000 – 600 000
Matériel bureautique et informatique	Ordinateurs, imprimantes, mobilier de bureau, équipements informatiques	400 000 – 600 000

Chapitre VI : Création d'une Startup

Poste de dépense	Description	Coût estimé (DZD)
Logiciels de gestion et de facturation	Logiciels comptables, gestion des stocks, facturation et suivi clients	250 000 – 400 000
Honoraires professionnels	Expert-comptable, conseiller juridique et accompagnement administratif	200 000 – 400 000 / an

Tableau VI-4 : Cout commerciaux et administratifs

VI.10 Le financement du projet

Le financement du projet de briqueterie sera assuré par :

- Apport personnel du promoteur,
- Crédit bancaire à moyen et long terme,
- Dispositifs de soutien à l'investissement industriel (fonds publics, mécanismes d'aide aux PME/PMI, dispositifs de financement nationaux).

VI.11 . Le remboursement des crédits et emprunts :

Le remboursement des crédits contractés s'effectuera selon un échéancier négocié avec l'organisme financier, tenant compte :

- De la capacité de production (10 000 briques/jour),
- Du chiffre d'affaires prévisionnel,
- De la marge nette générée,
- D'un délai de grâce durant la phase de démarrage.

VI.12 Justification économique du Business Model Canvas

Le modèle économique repose sur :

- La production locale de briques,
- La réduction des coûts logistiques,
- Une demande constante du secteur du bâtiment,
- La maîtrise des coûts énergétiques grâce à des équipements modernes.

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.13 Prévision financière et analyse de rentabilité

VI.13.1 Hypothèses de production

Paramètre	Valeur
Capacité de production	10 000 briques / jour
Nombre de jours ouvrables	300 jours / an
Production annuelle	3 000 000 briques / an

Tableau VI-5: Production

VI.13.2 Hypothèse de prix de vente

Afin d'estimer le chiffre d'affaires prévisionnel, un prix moyen de vente unitaire est retenu sur la base des prix du marché local des briques creuses.

Prix moyen de vente : **30 DZD / brique**

VI.13.3 Chiffre d'affaire prévisionnel

Le chiffre d'affaires annuel est calculé à partir de la production annuelle et du prix unitaire de vente, selon la relation suivante :

$CA = \text{Production annuelle} \times \text{Prix unitaire}$

$CA = 3\,000\,000 \times 30 = 90\,000\,000 \text{ DZD/an}$

VI.6. Résultat d'exploitation estimé

Indicateur	Montant DZD
Chiffre d'affaires	90 000 000
Charges OPEX moyennes	25 000 000
Résultat brut estimé	≈ 65 000 000

Tableau VI-6 : Résultat d'exploitation estimé

VI.7. Analyse de rentabilité

- **Marge brute estimée : ~ 70 %**
- **Délai de retour sur investissement (Payback) :**

$$\text{Payback} = \frac{C_{APEX}}{\text{Résultat annuel}}$$

Entre 1,5 et 3 ans, ce qui est très acceptable pour un projet industriel.

Chapitre VI : Création d'une Startup

VI.14 Conclusion financière

Les résultats financiers prévisionnels montrent que le projet de briqueterie :

- Est économiquement viable,
- Présente une rentabilité attractive,
- Offre un retour sur investissement rapide,
- Répond à une demande structurelle du secteur du bâtiment.

BISNES MODEL CANVAS (BMC) :

Projet : conception et réalisation d'une brique isolante thermiquement et résistante mécaniquement				
Partenaires clés	Activités clés	Proposition de valeur	Relations clients	Segments de marché
- Fournisseurs de matières premières (argile, sable) - laboratoires pour les testes - Fournisseurs d'énergie (gaz, électricité, eau) - Fournisseurs d'équipements industriels - - Transporteurs et logisticiens - - Banques et institutions financières - Organismes publics de contrôle	- Préparation et traitement de l'argile - Façonnage par extrusion - Séchage industriel - Cuisson en four tunnel - Contrôle qualité - Stockage et distribution	- Briques innovante avec une géométrie optimisée pour : Isolation thermique. Résistance mécanique renforcer. - Conformité aux normes nationales - Disponibilité locale et adapter au climat algérien. - Prix compétitifs - Fiabilité de l'approvisionnement - Contribution au développement local	- Relations commerciales directes - Contrats avec entreprises BTP - Fidélisation par la qualité et la régularité - Remises pour gros volumes	- Entreprises de BTP - Promoteurs immobiliers - Auto-constructeurs - Distributeurs de matériaux
	Ressources clés		Canaux de distribution	
	- L'incubateur. -Brevet. - Équipements industriels lourds - Infrastructure de production - Matières premières locales - Ressources humaines qualifiées - Énergie (gaz, électricité)		- Vente directe à l'entreprise - Dépôts de matériaux - Livraison directe aux chantiers - plateforme en ligne de présentation commande. - participation à des salons nationaux de construction.	
Structure des coûts		Flux de revenus		

Chapitre VI : Création d'une Startup

-coûts d'investissement : • Terrain : installation d'usine et un carrier pour l'extraction d'argile • Machines : broyeurs, extrudeuse, séchoir, four, ...etc. - Coûts fixes : • Masse salariale • Amortissement • Assurances - Coûts variables : • Énergie • Matières premières • Maintenance • Transport	- Vente de produit finale - Vente en gros (BTP) - Vente au détail CA estimé : ~90 000 000 DZD/an - vente de produits dérivés : • Hourdis • Brique mono-mure Brique pour la séparation intérieure.
---	---

Tableau VI-7 : Bisness Model Canvas (BMC)

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail a porté sur l'étude, la modélisation et l'amélioration des performances thermiques d'une brique creuse en terre cuite, dans un contexte marqué par des exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique des bâtiments. L'objectif principal était de réduire les pertes de chaleur tout en conservant des caractéristiques mécaniques acceptables, à travers une analyse approfondie des différents modes de transfert thermique.

Dans un premier temps, les notions fondamentales du transfert de chaleur — conduction, convection naturelle et rayonnement — ont été rappelées, ainsi que le rôle des nombres sans dimension (Rayleigh, Nusselt, Prandtl, Grashof) dans la caractérisation des phénomènes thermiques. L'état de l'art a mis en évidence les limites des briques creuses classiques, notamment la convection naturelle non maîtrisée dans les cavités internes et les pertes radiatives élevées, justifiant ainsi la recherche de géométries optimisées.

La modélisation mathématique a ensuite été développée à partir des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, en adoptant l'approximation de Boussinesq pour décrire la convection naturelle. La résolution numérique a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent, basé sur la méthode des volumes finis. Une étude de sensibilité du maillage a permis d'assurer la fiabilité et l'indépendance des résultats numériques.

Les simulations ont montré que, sous un flux thermique imposé identique sur les surfaces extérieures, les différentes géométries de briques présentent des écarts de température distincts, traduisant des résistances thermiques différentes. La nouvelle géométrie proposée permet une réduction notable des transferts thermiques par rapport à la brique standard, grâce à une meilleure maîtrise de la convection interne et à une augmentation de la résistance thermique globale.

Enfin, une approche expérimentale a été engagée par la réalisation de prototypes de briques et la conception de moules adaptés, afin de poser les bases d'une validation expérimentale future. Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation géométrique des briques de construction, en vue d'améliorer la performance énergétique des bâtiments.

Bibliographies:

- (CEN), European Committee for Standardization. *EN 771-5:2011+A1 Specification for masonry units - Part 5: Manufactured stone masonry units*. Brussels: CEN-CENELEC Management Centre, 2015.
- (CMHC)., Canada Mortgage and Housing Corporation. *Compressed Earth Block Construction*. Ottawa, Canada.: SCHL (CMHC)., 1999.
- AISSAOUI., Faris. *Contribution a l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire place dans un climat aride : cas de la région de Biskra*. Biskra: université Mohamed Khider, 2017.
- ANA-MARIA BIANCHI, YVES FAUTRELLE. JACQUELINE ETAY. *TRANSFERTS THERMIQUES* . Lausanne: Presses polytechniques et universitaire romandes , 2004.
- ANSYS, Inc. *Ansys Fluent theory guide (Release 2021 R2)*. Canonsburg, PA, États-Unis: ANSYS, Inc, 2021.
- ASHRAE. *ASHRAE Handbook—Fundamentals*. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.
- Bejan., Adrian. *Convection Heat Transfer*. Hoboken, NJ, États-Unis (Siège social de Wiley).: Wiley., 2013.
- BELMILOUD., Mouhamed Amine. *Etude numérique de la convection mixte couplée a une radiation dans une cavité : cas des fluides non-newtoniens*. Tiaret: l'université IBN KHALDOUN, 2016.
- BERNARD., Jacques. *Energie solaire : calculs et optimisation*. paris: Editions Ellipses, 2004.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. *Numerical methods for engineers* . New York, NY, États-Unis: McGraw-Hill Education., 2015.
- Childe, V. Gordon. «"The Urban Revolution".» *The Town Planning Review* 21, n° 1 (1950): 3-17.
- CNERIB. *DTR C 3-2 : Réglementation thermique des bâtiments d'habitation - Règles de calcul des déperditions calorifiques*. Alger: Ministère de l'Habitat., 1997.
- DIAW., Djibril. *Réalisation d'un programme de simulation d'un comportement thermique d'un bâtiment a usage d'habitation*. DACAR: université CHEIKH ANAT DIOP , 2005.
- DJAMILA BENYOUCEF. *Etude de la convection naturelle dans une enceinte à gradient de température pariétal horizontal et vertical*. Batna: Université El-Hadj Lakhdar, 2018.
- Duffie, John A., et Wiliam A. Beckman. *solar engineeering of thermal processes*. New Jersey : John Wiley & Sons , 2013.
- Farid Touloumi, Akli Younsi, Abdelhak Kaci, Adel Benchabane. «Formulation of a composite of date palm wood-cement.» *J. Appl. Eng. Sci. Technol.* 2, n° 2 (2016): 57-63.
- Fioretti, Roberto, et Paolo. Principi. «Thermal Performance of Hollow Clay Brick with Low Emissivity Treatment in Surface Enclosures.» *Coatings*. 4, n° 4 (2014): 715-731.
- Immessad, K., Kharchi, R., et al. «Mise en application de la réglementation thermique du bâtiment.» *Revue des Énergies Renouvelables*. 20, n° 4 (2017): 591-597.
- J.P.Holman. *Heat Transfer*. new yourk: McGRAW-Hill., 2010.

- K. Imessad, R. Kharchi, S. Bouchaib, A. Chenak, S. Hakem A. Hamidat, S. Larbi-youcef, S. Sami et F. Sahnoune. «Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment .» *Revue des Energies Renouvelables* 20, n° 4 (2017): 591-597.
- KHARCHI, RAZIKA. *etude energetique de chauffage, refroidissement et eau chaude sanitaire dans une maison type algerie* . Tlemcen: université Abou - Bekr Belkaïd - Tlemcen, 2013.
- Laurent CADET. (2015). Étude du couplage convection-rayonnement en cavité différentiellement chauffée a haut nombre de Rayleigh en ambiances habitables, thèse de doctorat, université de la Rochelle. *Étude du couplage convection-rayonnement en cavité différentiellement chauffée a haut nombre de Rayleigh en ambiances habitables*. france : université de la Rochelle, 2015.
- Leylegian., Philip J. Pritchard. John C. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. Hoboken, NJ, États-Unis.: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- Lukas G. Swan and V. Ismet Ugursal. «Modeling of End-Use Energy Consumption in the Residential Sector: A Review of Modeling Techniques'». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, n° 8 (2009): pp.
- Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Berlin: Birkhäuser, 2012.
- Modest, M. F. *Radiative Heat Transfer* . The University of California at Merced: Academic Press/Elsevier, 2013.
- Patankar, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation., 1980.
- Pritchard., Philip J. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. Hoboken, NJ, États-Unis.: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- Razika, KHARCHI. *L'efficacité énergétique dans le bâtiment*. Alger (Lieu du CDER): CDER (Centre de Développement des Énergies Renouvelables), 2013.
- Said Bouabdallah, Badia Ghernaout, Mohamed Teggat, Ahmed Benchatti et F-Zohra Benarab. « "Onset of Natural Convection and Transition Laminar-Oscillatory Convection Flow in Rayleigh-Bénard Configuration". » *International Journal of Heat and Technology*. 34, n° 1 (2016): 151-157.
- SALHI., Hicham. *Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide*. Batna: université de Batna., 2015.
- Shedd, Solon. *The Clays of the State of Washington: Their Geology, Mineralogy, and Technology*. thèse de doctorat, Pullman: State College of Washington, 1910.
- THEODORE, L.BERGMAN, S.LAVINE ADRIENNE , P.INCROPERA FRANK, et P.DEWITT DAVID. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7th ed)*. Hoboken, New Jersey, État-Unis: John Wiley and Sons, 2011.

- Ugochukwu, Ukaegbe, et Anya Chukwuma. «The Enduring Foundation: Analyzing the Importance of Fired Clay Bricks in Building Construction.» *IRE Journals* 9, n° 4 (2025): 667-673.
- Vergnet., David Dumont et Hadrien. *Convection de Rayleigh-Bénard : Modélisation numérique*. Lyon: ENS de Lyon (École Normale Supérieure de Lyon) et Université Claude Bernard Lyon I., 2016.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Harlow, Angleterre: Pearson Prentice Hall, 2007.
- YUNUS, A. Çengel , et J.Ghajar AFSHIN . *Heat and Mass Transfer : Fundamentals & Applications* .United States of America : McGraw-Hill Education , 2015.