UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Identification des briques locales adaptées dans la résistance des murs porteurs soumis aux efforts de compression

Ndayishimiye, Claude; Sous la direction de : Dr. Ir. Hatungimana Daniel

2024
UB, FSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1933

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

Ministère de l'éducation Nationale et de la recherche scientifique

Université du Burundi

Master en Génie Civil

Option : Génie Civil, Aménagement et Maitrise des Projets

Faculté des Sciences de l'Ingénieur Année Académique : 2020-2021

IDENTIFICATION DES BRIQUES LOCALES ADAPTEES DANS LA RESISTANCE DES MURS PORTEURS SOUMIS AUX EFFORTS DE COMPRESSION.

Mémoire

Présenté publiquement par :

NDAYIMIRIJE Claude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Civil, Aménagement et Maîtrise des Projets.

Soutenu le 04 /10 /2023 devant le jury composé de :

Dr. Ir. BIZINDAVYI Josias	: Président
Dr.Ir. MINANI Jérémie	: Lecteur Principal
Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel	: Directeur
Dr. Ir. NIBASUMBA Paul	: Membre

Bujumbura, Octobre 2023

COMPOSITION DES MEMBRES DU JURY :

- Dr. Ir. BIZINDAVYI Josias : Président
- Dr. Ir. MINANI Jérémie : Lecteur principal
- Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel : Directeur
- Dr. Ir. NIBASUMBA Paul : Membre

DEDICACE

En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce travail :

A ma femme ;

A mes enfants ;

A mon père ;

A ma chère mère ;

A mes frères et sœurs ;

A toute ma promotion de master ;

A toutes mes connaissances ;

Je dédie ce travail

NDAYIMIRIJE Claude

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de ce mémoire de fin de cycle de master est le fruit des efforts de plusieurs personnes à qui j'exprime mes vifs remerciements.

Je tiens à exprimer mes sentiments de profonde gratitude premièrement à notre Créateur, le Dieu Tout Puissant pour sa protection et son amour infini.

Mes vifs remerciements vont à l'égard de mon directeur de mémoire, Dr. Ir. HATUNGIMANA Daniel pour son encadrement, ses conseils et le temps qu'il a consacré, ce qui m'ont permis d'arriver à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie infiniment ma femme, mes enfants, mes parents, mes frères et sœurs, mes amis et toutes mes connaissances pour leur soutien tant moral que matériel, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements s'adressent également au projet Suisse au Burundi (SKAT PROECCO) et à la Société BBCOM qui nous ont permis de faire des recherches, leurs conseils en vue d'aboutir à ce travail.

J'adresse mes remerciements à tous mes collègues de classe dans ce cycle de master pour la meilleure collaboration et entraide mutuelle durant ce parcours.

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin de toute sorte que ce soit, je vous remercie.

Que Dieu vous bénisse.

RESUME

La maçonnerie se comporte bien en compression qu'en traction. Ce mauvais comportement en traction est dû essentiellement à la non linéarité du comportement de la maçonnerie provenant de la discontinuité entre les éléments de la maçonnerie et le mortier qui les lie.

La maçonnerie non armée chargée peut se rompre ou se fissurer. L'objectif de ce travail est d**'identifier les briques locales adaptées dans la résistance des murs porteurs soumis aux efforts de compression.**

Pour atteindre cet objectif, notre travail est scindé en cinq chapitres à savoir :

- ✓ Chapitre 0 : Introduction générale
- ✓ Chapitre I : Revue de la littérature ;
- ✓ Chapitre II : Etude expérimentale ;
- ✓ Chapitre III : Dimensionnement des murs porteurs maçonnés soumis aux efforts de compression.
- ✓ Chapitre IV : Modélisation et interprétation des résultats.

Après analyse des résultats, on a constaté que les briques semi-industrielles non réfractaires se comportent bien avec une résistance moyenne de 14,2Mpa que les briques semi-industrielles réfractaires et artisanales avec les résistances moyennes respectives de 5,8 et 3,73Mpa.

Mots clés : Briques semi-industrielles non réfractaires, Briques semi-industrielles réfractaires, briques artisanales, modélisation.

ABSTRACT

The masonry behaves well in compression than in traction. This poor tensile behaviour is mainly due to the non-linearity of the masonry behaviour resulting from the discontinuity between the masonry elements and the mortar that binds them.

Loaded unarmed masonry may break or crack. The objective of this work is to identify local bricks adapted to the strength of load-bearing walls subjected to compressive forces.

To achieve this objective, our work is divided into five main chapters:

 Chapter 0: General introduction;

 Chapter I: Literature review;

 Chapter II: Experimental study;

 Chapter III: Sizing of masonry load-bearing walls subjected to compressive forces;

 Chapter IV: Modelling and interpretation of results.

After analysis of the results, it was found that non-refractory semi-industrial bricks behave well with an average strength of 14,2Mpa than refractory and artisanal semi-industrial bricks with the respective average resistances of 5,8 and 3,73Mpa.

Keywords: Non-refractory semi-industrial bricks, Refractory semi-industrial bricks, artisanal bricks, modeling.

TABLE DES MATIERES

COMPOSITION DES MEMBRES DU JURY : i

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME iv

ABSTRACT v

TABLE DES MATIERES vi

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

LISTE DES PHOTOS xi

SIGLES ET ABREVIATIONS xii

AVANT PROPOS xiii

CHAPITRE 0: INTRODUCTION GENERALE 1

0.1. Problématique **1**

0.2. Défis majeurs à relever **2**

0.3. Objectifs du sujet **2**

0.4. Méthodologie adoptée **2**

0.5. Résultats attendus **3**

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE 4

I.1 Généralités sur les briques cuites **4**

I.2. Mode de fabrication des briques cuites **7**

I.3. Caractérisation des matériaux **13**

I.3.1. Description des matériaux utilisés **13**

I.3.2. Description des essais réalisés **15**

I.3.3. Influence des joints sur la résistance des murs **22**

CHAPITRE II: ETUDE EXPERIMENTALE 23

II.1 Essai de contrôle de dimensions **23**

II.2. Capacité d'absorption de l'eau **25**

II.3. Masse volumique **28**

II.4. Essais de compression **30**

II.4.1. Essais de compression sur les briques **30**

II.4.2. Essais de compression sur les murs testés **32**

CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DES MURS PORTEURS MACONNES 35

III.1 Introduction générale **35**

III.1.1. Résistance à la compression de briques de maçonnerie : f_b **35**

III.1.2. Résistance à la compression du mortier : f_m **36**

III.1.3. Résistance de la maçonnerie: f_k **37**

III.1.4. Résistance à la compression de la maçonnerie--valeur de calcul: f_d **37**

III.2 Dimensionnement proprement dit **39**

III.2.1. Dimensionnement des murs en briques artisanales **42**

III.2.2. Dimensionnement des murs en briques semi-industrielles non réfractaires **47**

III.2.3. Dimensionnement des murs en briques semi-industrielles réfractaires **53**

III.3 Comparaison des contraintes **60**

CHAPITRE IV : MODELISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS DES 61

IV.1. Description du logiciel utilisé dans la modélisation **61**

IV.2. Paramètres d'entrée **61**

IV.3. Principe de modélisation utilisé **61**

IV.4. Critère de rupture choisi **61**

IV.5. Etape et processus de modélisation **62**

IV.6. Modélisations des murets testés dans le laboratoire **62**

IV.7. Récapitulatif des valeurs après modélisation **64**

IV.8. Comparaison des contraintes (celles du dimensionnement et celles apres modélisation) **66**

IV.9. Courbes contraintes-déformations **66**

CONCLUSION GENERALE 69

RECOMMANDATIONS 70

BIBLIOGRAPHIE 71

ANNEXES 72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Principaux composants de l'argile **7**

Tableau 2: Valeurs de K pour le calcul de la résistance caractéristique à la compression **20**

Tableau 3: Valeurs de dimensions des briques testées **24**

Tableau 4: Valeurs moyennes issues des essais de l'absorption d'eau sur les briques testées **26**

Tableau 5: Masse volumique des briques testées **28**

Tableau 6 : Variation des contraintes en fonction des types de briques testées **31**

Tableau 7: Variation des contraintes dans les murets de dimensions et de nature différentes **34**

Tableau 8 : Valeurs de δ en fonction des dimensions de la brique **36**

Tableau 9 : Information non-normative quant aux différents mortiers et à l'adéquation de la résistance des briques à la résistance du mortier **37**

Tableau 10 : Facteurs $^{\alpha}$, $^{\beta}$ et K dépendant du type de mortier et du groupe **38**

Tableau 11 : Coefficients de sécurité du matériau **38**

Tableau 12 : Modèles des briques testées **40**

Tableau 13 : Modèles des murets testés dans le laboratoire **41**

Tableau 14 : Récapitulatif des valeurs après dimensionnement **59**

Tableau 15 : Contraintes des différents modèles des briques artisanales **62**

Tableau 16 : Contraintes des différents modèles des briques semi-industrielles non réfractaires .**62**

Tableau 17: Contraintes des différents modèles des briques semi-industrielles réfractaires **63**

Tableau 18 : Contraintes et déplacements pour les briques artisanales **64**

Tableau 19 : Contraintes et déplacements pour les briques semi-industrielles non réfractaires **64**

Tableau 20 : Contraintes et déplacements pour les briques semi-industrielles réfractaires **65**

Tableau 21 : Comparaison des Contraintes du dimensionnement et celles après modélisation **66**

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma d'une brique d'argile avec les différentes désignations. **17**

Figure 2 : Schéma d'un mur de maçonnerie non armée de briques et désignations des dimensions……18

Figure 3 : Définition de la résistance caractéristique à la compression d'une maçonnerie **19**

Figure 4 : Effet de bord…….20

Figure 5: Schéma du mur en maçonnerie **21**

Figure 6 : Influence de l'épaisseur des joints dans la résistance des murs en maçonnerie **22**

Figure 7 : Variation de la capacité d'absorption d'eau en fonction des types de briques **27**

Figure 8 : Comparaison des masses volumiques en fonction des types de briques **29**

Figure 9: Variation des contraintes pour les briques artisanales **32**

Figure 10 : Courbe contrainte-déformation de trois types de briques testées. **67**

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Fabrication des briques étirées (source: photo prise sur le site Buringa **10**

Photo 2 : Séchage des briques..... **11**

Photo 3 : Four continu de type four tunnel **12**

Photo 4 : Trou d'alimentation du four tunnel **12**

Photo 5 : Briques artisanales **13**

Photo 6 : Briques semi-industrielles non réfractaires **14**

Photo 7 : Briques semi-industrielles réfractaires **14**

Photo 8 : Poudre en kaolin **15**

Photo 9 : Poudre en chamotte..... **15**

Photo 10 : Dimensions en X..... **23**

Photo 11 : Dimensions en Y..... **23**

Photo 12 : Dimensions en Z..... **23**

Photo13 : Réglage de la surface d'assise **30**

Photo14 : Brique en cours de compresssion **30**

Photo15 : Brique rompue **30**

Photo 16 : Confection des murets **33**

Photo 17 : Réglage de la surface d'assise **33**

Photo 18 : Muret en cours de compression **33**

SIGLES ET ABREVIATIONS

BBCOM : Burundi Bricks Company

C/S : Rapport ciment sur sable

N/S : Non Spécifié

PROECCO : Promoting Employment through Climate Responsive Construction.

B.A : Béton armé

AVANT PROPOS

Le Burundi est un pays qui regorge d'une quantité suffisante en argile et qui peut être exploitée conformément aux règles et arts en vue d'accroitre l'économie nationale.

Ce travail de fin d'études intitulé : « **IDENTIFICATION DES BRIQUES LOCALES ADAPTEES DANS LA RESISTANCE DES MURS PORTEURS SOUMIS AUX EFFORTS DE COMPRESSION »** va nous permettre à identifier les briques ayant une grande résistance en compression qui peuvent être contribuées dans la construction des murs porteurs.

Pour atteindre l'objectif de ce travail, ce mémoire s'articule sur trois points principaux à savoir :

- Identification des paramètres de résistance pour chaque type de briques (capacité d'absorption, la masse volumique, contraintes) dans l'étude expérimentale ;
- Modélisation et interprétation des résultats des modèles testés ;
- Comparaison des paramètres trouvés.

L'identification des paramètres de résistance pour chaque type de briques est faite au niveau du laboratoire du campus KIRIRI suivant la norme NF EN 771-1/C.

Au niveau du laboratoire également, des modèles variés des murets construits en briques cuites avec un mortier C/S=3, sont testés suivant les essais de compression où on a pu déterminé la charge de rupture qui nous a fait aboutir à la contrainte maximale du muret.

Après, les mêmes murets considérés homogènes ont été modélisés à l'aide du logiciel **LIRA-SAPR** en appliquant les charges variées.

CHAPITRE 0 : INTRODUCTION GENERALE

Suite à ses avantages et son meilleur comportement en compression, la maçonnerie en briques cuites se trouve parmi les matériaux les plus utilisés dans la construction partout dans le monde entier.

Pourtant, l'acier et le béton qui font le béton armé interviennent dans la construction en tant qu'élément porteur. Les erreurs de sous dimensionnement peuvent arriver et les briques de remplissage peuvent contribuer dans les murs porteurs. Cela est dû à leurs propriétés physico-mécaniques, leurs provenances ainsi que les matériaux utilisés pendant la production.

Organisation du mémoire

Le présent travail de mémoire de Master est scindé en quatre chapitres principaux à savoir :

- Chapitre 0 : Introduction générale
- Chapitre premier : Revue de la littérature ;
- 2 ème chapitre : Etude expérimentale ;
- 3ème chapitre : Dimensionnement des murs porteurs maçonnés soumis aux efforts de compression.
- 4ème chapitre : Modélisation et interprétation des résultats des murets testes au laboratoire.

0.1. Problématique

Pour construire un bâtiment possédant des charges les plus élevées, le dimensionnement des éléments porteurs en B.A est nécessaire. Néanmoins, des erreurs dans le dimensionnement peuvent avoir lieu en sous dimensionnant la structure.

Cela nous amène à penser si une fois l'erreur est notifiée après avoir exécuté la structure porteuse, la solution à entreprendre sans démolir l'ouvrage.

On cherche à trouver les réponses aux questions suivantes :

- Comment va-t-on procéder pour garantir la construction et les usagers ?
- Quelles sont les briques les plus appropriées ?
- Comment confectionner les mortiers à utiliser ?
- D'où l'on va trouver les coûts supplémentaires ?

0.2.Défis majeurs à relever

- Nécessité des coûts supplémentaires pour les briques et le mortier appropriés ;
- Au cas échéant, démolition des constructions.

0.3.Objectifs du sujet

a) Objectif global

L'objectif global de ce travail est d'identifier les briques locales adaptées dans la résistance des murs porteurs soumis aux efforts de compression pour garantir la sécurité de la construction et des usagers.

b) Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques pour ce travail sont :

- Identification des paramètres de résistance pour chaque type de briques (capacité d'absorption, la masse volumique, détermination des contraintes de rupture et des déplacements).
- Modélisation et interprétation des résultats des modèles testés ;
- Comparaison des paramètres trouvés ;

0.4.Méthodologie adoptée

- Pour aboutir à ces différents objectifs, on a commencé par l'introduction générale dans le chapitre 0, suivi de la revue de la littérature dans le premier chapitre contenant les généralités des briques cuites, ses modes de fabrications ainsi que la caractérisation des matériaux et cela contient dans les revues bibliothèques, de l'étude expérimentale au niveau du 2ème chapitre contenant les différents essais à savoir l'essai de contrôle de dimensions, la capacité d'absorption d'eau, la masse volumique ainsi que l'essai de résistance à la compression au niveau du laboratoire, suivi du 3ème chapitre relatant le dimensionnement des murs porteurs maçonnés soumis aux efforts de compression et enfin le dernier chapitre concernant la modélisation des murets confectionnés de dimensions différentes.

Pour atteindre les objectifs visés lors de l'étude, des méthodologies empiriques et théoriques ont été utilisées :

- Revue bibliographique : recherche des articles qui parlent des murs porteurs en maçonnerie : ses caractéristiques, mode de fabrication ainsi que ses caractérisations ;

- ❖ Prélèvement des échantillons sur le site et les amener au laboratoire pour les différents essais ;
- ❖ Modélisation des mêmes modèles dans le logiciel **LIRA-SAPR** ;
- ❖ Analyse et interprétation des résultats.

0.5.Résultats attendus

- Identifier les briques les plus résistantes en compression ;
- Les contraintes issues du dimensionnement doivent être inférieures ou égales aux contraintes après modélisations ;
- Les contraintes dans les briques visées doivent être supérieures aux contraintes d'autres briques ;
- Les déformations ou déplacements dans les murets testés composés par les briques visées doivent être minimes.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE

Pour mieux aborder notre sujet, dans ce chapitre, nous allons développer les principales parties suivantes :

- ✓ Généralités sur les briques cuites ;
- ✓ Mode de fabrication des briques cuites ;
- ✓ Caractérisation des matériaux.

I.1 Généralités sur les briques cuites

La fabrication artisanale de briques d'argiles cuites a fait ces preuves dans la construction. Toutes fois, elle est appelée à se développer. Dans un souci de satisfaire les besoins des consommateurs, la fabrication semi-industrielle est apparue.

Il faut reconnaitre qu'un procédé de fabrication de brique est semi industriel lorsque cette briqueterie utilise des machines, cependant, la mécanisation n'est que partielle et le débit de production est supérieur à la fabrication artisanale.

Une fabrication est qualifiée d'industrielle lorsqu'elle est entièrement ou en grande partie mécanisée par définition. Elle permet de produire une grande quantité qui est supérieure à la fabrication semi-industrielle [2].

Au Burundi, le procédé traditionnel ou artisanal de fabrication de briques en terre cuite est prépondérant et ne fait l'objet d'aucune normalisation. La principale matière première, l'argile est utilisée sans analyse préalable.

Les matières premières

L'argile constitue les bases essentielles de la fabrication des briques. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les matières premières utilisées pour la fabrication des briques cuites.

a. L'argile

Définition

La définition d'une argile dépend souvent des domaines de spécialisation.
De manière générale, trois principaux types de définitions sont utilisés :

- Dans la première définition, on appelle argile, la matière première terreuse susceptible de donner avec l'eau des pâtes plastiques moulables et cuisables pour obtenir des produits en « terre cuite ». Dans cette optique, l'argile peut être constituée de phyllosilicates, de différents autres minéraux tels que les oxydes plus ou moins cristallisés (SiO_2 : quartz, Al_2O_3 : Alumine,

oxyde de fer, oxyde de titane, calcite magnésie, Sulfure de fer,) et de divers résidus organiques, en l'occurrence les déchets végétaux plus ou moins décomposés [2].

- Une deuxième définition stipule que l'argile est purement granulométrique, souvent utilisée par les spécialistes des travaux publics, et elle désigne l'ensemble des fractions inférieures à 2 µm d'un sol [2].
- Enfin, une troisième définition minéralogique utilisée par les géologues, les minéralogistes et les chimistes, définit l'argile comme des silicates en feuillet (phyllosilicates) de différents ions métalliques [2].

Ces définitions peuvent se rejoindre du fait que les particules argileuses dans le sens minéralogique, sont très fines et constituent souvent la majorité des fractions inférieures à 2 µm dans les analyses granulométriques de sol et forment également une grande partie des terres argileuses.

Dans la suite, nous utilisons la première définition de l'argile.

Rôle des différents éléments de l'argile

En ce qui concerne les caractéristiques des produits, ces différents éléments jouent les rôles suivants.

• La silice (SiO_2) existe soit sous forme combinée aux différents silicates d'alumine (argile et micas), soit sous forme libre (quartz). Sous cette dernière forme, elle joue le rôle d'élément dégraissant lorsqu'elle est grossière et constitues-en quelque sorte le squelette des produits.

• L'alumine (Al_2O_3) est généralement liée à la plasticité de l'argile, cette plasticité étant d'autant plus élevée que la teneur en alumine est plus importante. On emploiera de préférence l'argile à haute teneur en alumine pour la fabrication des produits pressés à reliefs importants, tels que les tuiles.

• L'oxyde de fer (Fe_2O_3) agit comme élément fondant au cours de la cuisson. Il communique aux produits leur couleur rouge.

• La chaux (CaO) est un constituant très fréquent des produits de terre cuite, dans lesquels on peut la trouver en quantité importante. Elle joue les rôles de colorant et fondants.

• Les oxydes alcalins (soude et potasse), (Na_2O et K_2O) jouent le rôle de fondants. Associés à d'autres éléments (oxyde de fer, par exemple), ils provoquent, au cours de la cuisson, les réactions de grésage qui confèrent aux produits leurs qualités définitives, et tout particulièrement leur résistance mécanique [8].

b. Les dégraissants

Au cours des procédés de fabrication des produits en terre cuite, il est nécessaire d'ajouter à l'argile des proportions variables de dégraissant qui a pour rôle de modifier la plasticité ainsi que les caractéristiques de séchage et de cuisson de ces produits.

Le principal dégraissant couramment utilisé est le sable, de granulométrie comprise entre 0,3 à 1 mm et exempt de calcaire, mais souvent, les artisans briquetiers utilisent aussi de l'argile latéritique et même des latérites se trouvant sur la couche superficielle de l'argile ou d'argile cuite broyée dite chamotte [8].

c. Autre ressource naturelle

La seule ressource naturelle utilisée pour la fabrication des briques est l'eau. Elle est utilisée pour augmenter la teneur en eau de l'argile et la rendre plastique. Elle provient des eaux souterraines [8].

Composition de l'argile.

L'argile constitue la matière de base utilisée pour la fabrication des briques.

Outre les dégraissants, il est parfois nécessaire d'ajouter aux mélanges des constituants spéciaux susceptibles de modifier l'aptitude des pâtes à la fabrication ou les caractéristiques des produits finis. L'adjonction de bioxyde de manganèse confère aux produits qui, le plus souvent cuisent rouge, une teinte brune.

L'ajout de l'oxyde de Titane permet d'obtenir avec certaine argile, à des doses de 1,5 à 2%, des produits de couleur orangée et l'ajout de carbonate de baryum, de carbonate de calcium finement broyé, de carbonate de sodium, de chaux vive ou éteinte, de chlorure de sodium, de spath fluor (fluorine), de ligno-sulfonate de sodium, qui, à des doses de quelques pour mille [8].

Le tableau ci-dessous nous renseigne sur la composition de l'argile.

Tableau 1: Principaux composants de l'argile

Silice (SiO_2)	35 à 80%
Alumine (Al_2O_3)	8 à 25%
Oxyde de Titane (TiO_2)	0,3 à 2%
Oxyde de Fer (Fe_2O_3)	2 à 10%
Chaux (CaO)	0 à 18%
Magnésie (MgO)	0 à 5%
Soude (Na_2O)	0,1 à 1%
Potasse (K_2O)	0,5 à 4,5%
Anhydride carbonique (CO_2)	0 à 15%
La perte au feu est comprise entre	3à 18%

I.2. Mode de fabrication des briques cuites

Processus de production

La fabrication de briques en terre cuite comprend des différentes étapes. Les plus importantes sont :

- ✓ L'extraction des matières premières dans les argiles ;
- ✓ La préparation du mélange de production ;
- ✓ Le façonnage ;
- ✓ Le séchage ;
- ✓ La cuisson ;
- ✓ L'emballage.

L'image ci-dessous nous montre le processus de production des briques dès la zone d'extraction jusqu'à la livraison [12].

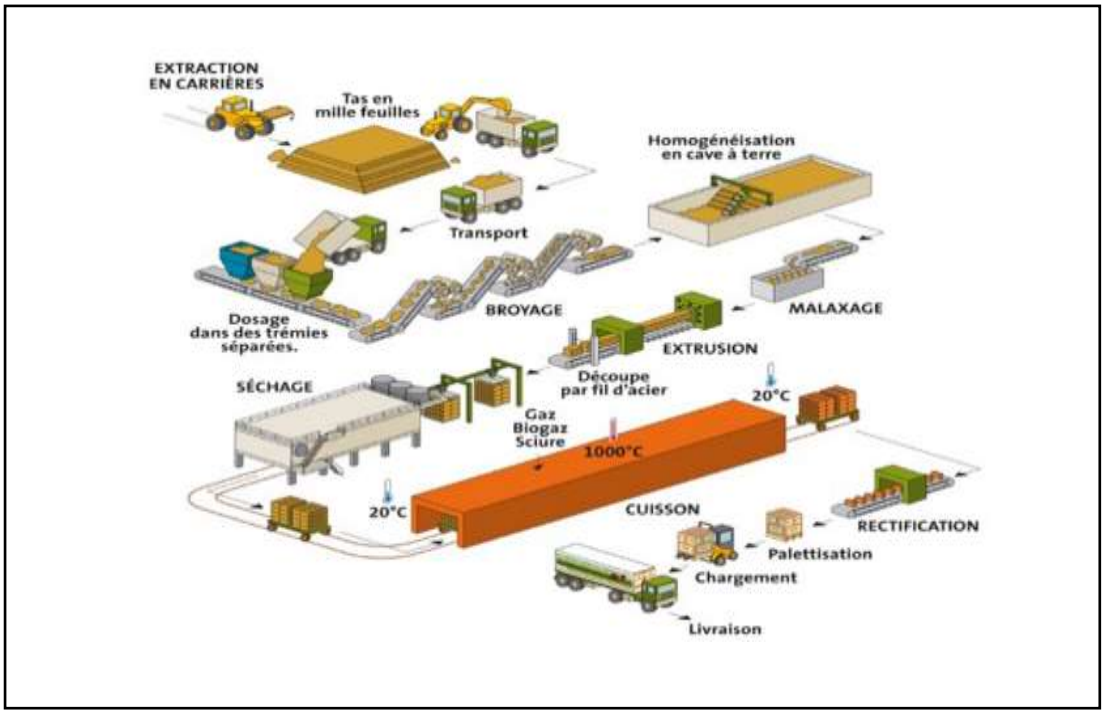


Image : Etapes de fabrication des briques en terre

- ✓ **Extraction**

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile. Il faut entendre 'argile' au sens large et considérer également les terres limoneuses et schisteuses, matières premières de même composition minéralogique que l'argile. L'argile est extraite dans des argilières situées en zone d'extraction. L'argile est omniprésente dans le sous-sol et ses propriétés diffèrent en fonction de l'origine géologique.

- ✓ **Préparation de l'argile**

La préparation comprend deux opérations principales :

Le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.

• Broyage et malaxage

Ces opérations ont pour but de rendre la masse d'argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. Cette opération a également pour but de réduire les inclusions solides éventuellement présentes dans l'argile pouvant influencer négativement la structure du produit en terre cuite.

Cette étape très importante s'effectue dans des broyeurs mécaniques à meules verticales ou à cylindres horizontaux, le broyeur mécanique à meules verticales est très utilisé ; il s'agit d'un appareil en forme de cuve dans lequel tournent deux meules qui pressent l'argile au travers d'un fond perforé formant tamis.

Dans le broyeur horizontal, l'argile est laminée entre deux cylindres. Si l'on utilise du schiste - qui n'est rien d'autre qu'une argile pétrifiée - comme adjuvant, il faut le concasser et le moudre par étapes successives en une fine poudre qui sera gâchée à l'eau

Pour obtenir une pâte (argileuse) présentant la plasticité souhaitée. Enfin, l'argile contient également des débris organiques nuisibles à la qualité du produit fini, et qui ne peuvent être éliminés que par l'action bactériologique. A cette fin, l'argile est stockée quelque temps dans un lieu humide et sombre propice au développement de ces bactéries.

• Dosage et mélange

Aujourd'hui, on ne fabrique plus les briques uniquement à partir des argiles locales, comme c'était le cas auparavant.

Pour obtenir une qualité optimale de la matière première, divers types d'argile sont mélangés, toujours sous un contrôle permanent. On peut ainsi garantir la qualité constante des produits en terre cuite.

Les adjuvants peuvent influencer les propriétés des produits finis. Ainsi, l'ajout de pigments peut en modifier la couleur ; l'ajout de sciure de bois a une influence sur la porosité.

La préparation de la matière première s'accompagne également d'ajout d'eau ou de vapeur. L'ajout d'eau permet de garantir une mise en forme facile de l'argile, tandis que la vapeur augmente la plasticité de l'argile.

Les machines à doser sont constituées de réservoirs contenant les différentes matières premières dont des « nourrices » alimentent régulièrement, et dans les proportions requises, un ou plusieurs mélangeurs [12].



Photo 1: Fabrication des briques étirées (source: photo prise sur le site Buringa)

✓ **Façonnage**

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme :

a. Briques moulées à main

La méthode de moulage la plus ancienne est le façonnage à la main des briques. Le mouleur prend une certaine quantité d'argile, la jette dans un moule en bois préalablement sablé pour éviter que la pâte n'adhère aux parois, presse convenablement la terre pour remplir le moule, arase l'excédent et retourne l'appareil pour démouler la brique crue ou « verte » (= brique non cuite).

Pour faciliter cette opération, l'argile doit être relativement ductile (et humide par conséquent), évitant ainsi au mouleur de devoir exercer un effort trop important. Ceci a pour conséquence que la brique « moulée main » présente une surface irrégulière, caractérisée par des plissures.

Dans l'industrie briqueterie moderne, hautement mécanisée, les briques « moulées à main » ne le sont toutefois plus par la main de l'homme. Toutes les opérations sont restées identiques, mais ce sont des machines qui ont pris la relève. Après avoir servi au façonnage, les moules sont nettoyés à l'eau et réutilisés. L'eau est réutilisée en circuit fermé. L'excès d'argile arasé lors du moulage est quant à lui, réintroduit dans la matière première. Le sablage des moules avec du sable ou de la sciure est aujourd'hui aussi entièrement mécanisé.

Si l'on remplace ce sablage des moules par un rinçage à l'eau, on obtient une brique non sablée qui a la couleur pure de la terre cuite. La partie inférieure du moule comporte généralement un renflement qu'on retrouve dans la brique de terre cuite comme un évidement … on parle de « frog ». Il arrive encore qu'une brique soit réellement moulée à la main mais seulement pour certains formats particuliers non compatibles avec la machine ou en cas d'utilisation d'argiles spéciales.

b. Briques pressées

Les briques moulées à la presse forment une catégorie à part. On introduit dans les moules de l'argile relativement sèche que l'on comprime vigoureusement pour lui donner la cohésion voulue.

Ces produits présentent une surface grenue et une forme géométrique bien marquée.

c. Briques étirées

Enfin, les briques pour maçonnerie ordinaire sont presque exclusivement fabriquées par extrusion. Dans cette machine, la masse d'argile est extrudée sous forme d'une carotte continue à section rectangulaire. Ce « boudin » d'argile est alors coupé à intervalles réguliers.

Chaque élément forme une brique qui présente quatre faces assez lisses suite au coulissement dans la filière, et deux faces de sectionnement plus grossières.

L'étireuse permet une production beaucoup plus rapide que n'importe quel autre procédé, et de plus, elle est parfaitement adaptée au façonnage de briques perforées. Ce mode de fabrication est également utilisé pour produire des briques de parement, mais dans ce cas, l'aspect des faces (deux boutisses et une panneresse en général) sera plus soigné.

- ✓ **Séchage**

Avant d'être cuites, les briques crues doivent encore perdre une grande partie de leur teneur en eau du moins en est-il ainsi pour la plupart des argiles.

Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau.



Photo 2 : Séchage des briques (source : photo prise sur le site Buringa)

Le risque serait en effet de les voir se fendre ou éclater sous la dilatation de la vapeur dans la masse. D'autre part, la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation.

- ✓ **Cuisson**

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est là une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile) ; on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre « courbe de cuisson ».

On peut modifier l'atmosphère du four. La cuisson en oxydation (= avec apport d'oxygène) est la plus fréquente et produit la teinte « normale » qui est, le rouge puisque l'argile est généralement ferrugineuse. Dans une atmosphère réductrice (= sans apport d'oxygène), on obtient des couleurs plus foncées. Une réduction partielle produit, quant à elle, des teintes fortement nuancées.

Dans le passé, on utilisait différents types de fours. On peut facilement classer ces différents fours en deux catégories.

Les photos ci-dessous nous montrent le four continu.





(a)Photo 3 **(b) Photo 4**

Photo 3 : Four continu de type four tunnel(a) **Photo 4: Trou d'alimentation du four tunnel(b)**
(Source : photos prises sur le site Buringa)

Pour les fours à fonctionnement discontinu, le mode opératoire comprend le chargement du four, sa mise à feu, son extinction et refroidissement lorsque la cuisson est terminée.

Dans un four de type continu, le feu ne s'éteint jamais, et c'est le chargement qui est introduit et extrait du four suivant un cycle régulier et ininterrompu.

Aujourd'hui, on utilise un four continu de type four tunnel. Dans celui-ci, le chargement de briques parcourt un tunnel rectiligne sur des wagonnets et passe successivement par les zones de « préchauffage », de « cuisson » et de « refroidissement ».

Dans la zone de préchauffage, les briques sont portées progressivement à température. Cet échauffement se fait grâce aux fumées émanant de la zone de cuisson du four. L'humidité résiduelle des briques est ainsi éliminée.

I.3. Caractérisation des matériaux

I.3.1. Description des matériaux utilisés

a) Briques artisanales

Les briques artisanales sont des briques confectionnées totalement sans intervention de la machine et avec des irrégularités notoires. Elles sont faites en argile en grande partie. La température de cuisson s'élève à 850 à 1200°C.

La photo ci-dessous nous montre les briques cuites artisanales sur lesquelles font objet de notre étude.



Photo 5 : Briques artisanales

b) Briques cuites semi-industrielles

Il faut reconnaitre qu'un procédé de fabrication de brique est semi industriel lorsque cette briqueterie utilise des machines, cependant, la mécanisation n'est que partielle et le débit de production est supérieur à la fabrication artisanale.

Les briques qui font objet de notre étude sont des briques semi-industrielles de deux sortes :

- Les briques semi-industrielles non réfractaires ;
- Les briques semi-industrielles réfractaires

- **Les briques semi-industrielles non réfractaires**

Les briques semi-industrielles non réfractaires sont des briques mécanisées. Leur production est d'autant plus grande que les briques artisanales. La température de cuisson varie de 1000 à 1200°C

Les briques semi-industrielles non réfractaires ci-dessous font objet de notre étude



Photo 6 : Briques semi-industrielles non réfractaires

- **Les briques semi-industrielles réfractaires**

Les briques semi-industrielles réfractaires sont des briques qui conservent ses propriétés mécaniques à très haute température. Elles peuvent résister aussi aux efforts de compression. La température de cuisson varie de 1540 à 1700°C.

Leur composition est en grande partie faite par l'argile (60%), chamotte (10%) qui est tamisée et broyée ainsi que du kaolin (30%).

Les briques semi-industrielles réfractaires qui font objet de notre étude sont indiquées dans la photo ci-dessous :



Photo 7 : Briques semi-industrielles réfractaires

Les photos ci-dessous nous montrent certaines composantes



Photo 8 : Poudre en kaolin



Photo 9 : Poudre en chamotte

I.3.2. Description des essais réalisés

Les essais réalisés dans notre projet sont les suivants :

- ✓ Contrôle des dimensions ;
- ✓ La capacité d'absorption de l'eau ;
- ✓ La masse volumique ;

L'essai de résistance à la compression. Ces essais ont été exécutés selon la norme belge NBN 118 sur les briques pleines et perforées pour maçonnerie. Néanmoins ; quelques modifications ont été apportées pour adapter cette norme à l'équipement disponible au laboratoire du Génie Civil de l'Université du Burundi.

Le prélèvement des échantillons pour les différents essais se fait après chaque cuisson et est d'au moins 3briques représentatives. Les briques sont prises dans les parties différentes du four.

Une en haut, une autre au milieu et l'autre dans la zone inférieure.

Toute brique manifestement exceptionnelle doit être exclue de cet échantillonnage.

Contrôle de dimensions

Chaque lot de 3briques est soumis au contrôle de dimensions et ensuite les briques sont réparties pour les divers essais à exécuter au laboratoire.

En général, on accepte une tolérance de l'ordre de 4mm sur la longueur alors que pour la largeur et l'épaisseur, la tolérance est de 2mm.

Avant l'exécution des essais de laboratoire proprement dits, une étude macroscopique des échantillons permet de décrire l'aspect général des briques.

Essai d'absorption d'eau

L'essai est réalisé suivant la norme NBN 118.51 sur 3briques, en les émergeant entièrement dans l'eau pendant 48 heures. Cet essai permet d'évaluer la perméabilité de la brique.

Les démarches à suivre sont les suivantes :

- ✓ Mettre l'échantillon (Pe) dans un fur à 105°C pendant 48h au moins jusqu'au poids constant ;
- ✓ Peser l'échantillon (Pe) ;
- ✓ Immerger l'échantillon dans l'eau pendant 96 heures, à température ambiante (28°c) ;
- ✓ Peser de nouveau l'échantillon (P) ;
- ✓ Faire la différence pour trouver P_0=(P-Pe) ;
- ✓ Calculer le degré de porosité P_0=[(P-Pe) /Pe] *100.

Masse volumique

La masse volumique est une grandeur physique qui définit la quantité de matière (masse) rencontrée dans un espace (une unité de volume) donné ; c'est-à-dire la masse par unité de volume. Elle est exprimée en kg/m^3.

Essai de résistance à la compression.

a) Essai de compression des briques cuites

Une brique d'argile se caractérise par trois dimensions :

- La longueur L_b, la plus grande des trois dimensions de la brique ;
- L'épaisseur ou la largeur e_b, la dimension horizontale la plus petite lorsque la brique est posée sur la surface la plus grande ;
- La hauteur h_b, la dimension verticale lorsque la brique est posée sur sa surface la plus grande. C'est aussi sa dimension la plus petite.

Ainsi, une brique présente trois différentes surfaces. Par ordre décroissant de superficie, on peut noter :

- ✓ La face : la surface la plus grande d'une brique : C'est généralement la surface d'appui de la brique. Elle est délimitée par L_b et e_b ;
- ✓ La tranche, le chant ou la longue rive : surface délimitée par L_b et h_b ;
- ✓ Le bout ou la petite extrémité : surface délimitée par e_b et h_b.

Le schéma ci-dessous nous renseigne sur les différentes désignations d'une brique cuite [11].

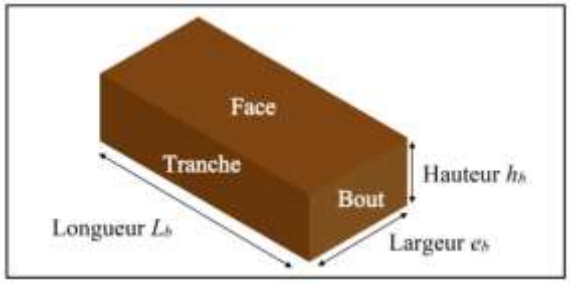


Figure 1 : Schéma d'une brique d'argile avec les différentes désignations.

Avec **« résistance à la compression » ou « résistance à la rupture »,** on entend, pour les matériaux de construction, la pression qu'il faut exercer pour faire casser un matériau.

L'essai est réalisé à l'aide d'une presse, généralement hydraulique. La force nécessaire pour faire casser la brique, divisée par la surface (brute) de la brique donne la résistance à la rupture.

Les tests de détermination de la résistance à la compression ne sont bien évidemment jamais réalisés sur une seule brique mais sur un échantillon qui permet toute une série de tests individuels. De ces résultats individuels, on calcule la résistance moyenne à la compression f_{bm}. Cependant, la résistance moyenne (calculée) à la compression n'est pas le seul élément important : la répartition des résultats joue également un rôle dans l'évaluation des performances.

Des petites différences individuelles par rapport à la moyenne sont le signe d'une qualité régulière (donc excellente) de la brique : ce qui garantit une maçonnerie homogène.

Des grandes différences individuelles par rapport à la même moyenne peuvent être le signe d'une qualité irrégulière (donc moindre) de la brique : ce qui mènera à une maçonnerie au sein de laquelle des points faibles pourront se former [5].

La résistance minimale recommandée au moment de la compression pour les briques cuites agissant dans les murs porteurs doit atteindre une valeur de 12Mpa [11].

b) Essai de compression des murets en briques cuites

Ce travail de recherche s'intéresse uniquement à la maçonnerie non armée de briques de trois catégories : Briques artisanales, semi-industrielles (réfractaires et non réfractaires).

On peut la définir comme étant un assemblage de briques d'argiles liée entre elles par du mortier de ciment.

C'est donc un matériau hétérogène et anisotrope.

Utilisée principalement pour la réalisation de murs, cette maçonnerie est présente dans de nombreux bâtiments dans lesquels elle peut être structurelle [11].

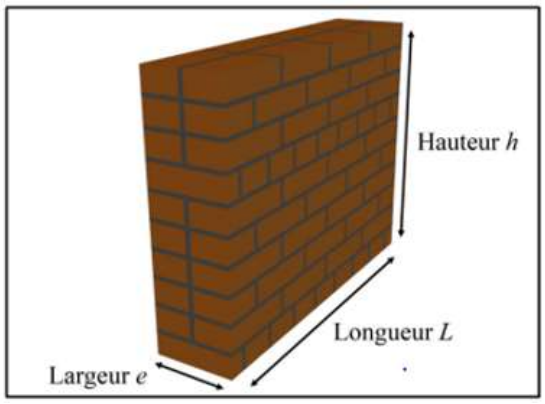


Figure 2 : Schéma d'un mur de maçonnerie non armée de briques et désignations des dimensions

Résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie f_k

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie dépend du couple **« éléments+ mortier ».** Cette résistance que l'on notera f_k, correspond à la résistance à la compression d'un muret **(en général 1x1m^2)** de maçonnerie. Elle sera ensuite utilisée pour déterminer la résistance des murs ou plus généralement des ouvrages de maçonnerie et nécessitera pour cela la prise en compte des facteurs complémentaires comme l'**excentricité** du chargement, l'**élancemen**t du mur.

La figure ci-dessous nous montre la résistance caractéristique à la compression d'une maçonnerie

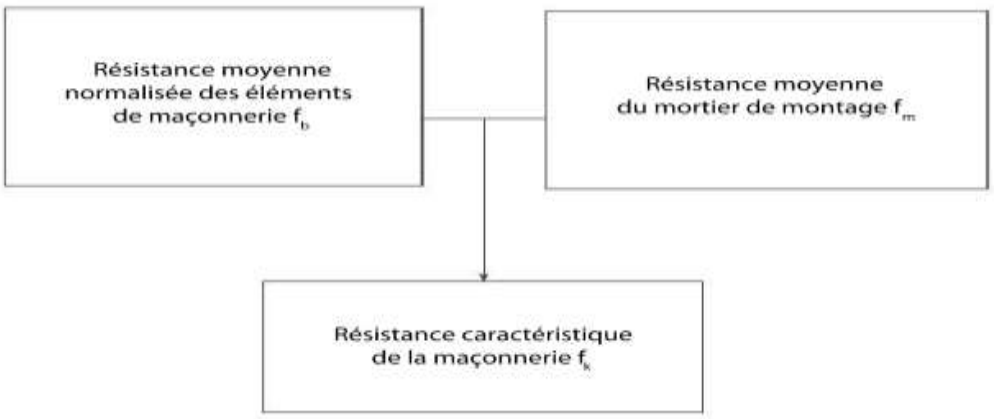


Figure 3 : Définition de la résistance caractéristique à la compression d'une maçonnerie

La valeur de f_k peut être obtenue soit à partir d'essais réalisés selon la norme NF EN 1052-1, soit à partir des valeurs calculées :

- $f_k=Kxf_b^{0,\ 7xfm0,3}$, cas du montage au mortier courant ou au mortier allégé(joints épais) ;
- $f_k=Kxf_b^{0,\ 85}$, cas du montage à joints minces de 1 à 3mm;
- $f_k=Kxf_b^{0,7}$, cas du montage à joints minces de 1 à 3mm (éléments de terre cuite de groupe 2 et 3).

Valeurs limites de calcul de f_b et f_m :

- f_b est limitée à 75N/mm^2 ;
- f_m est limitée à 20N/mm^2 et $2f_b$ pour le mortier d'usage courant ;
- f_m est limitée à 10N/mm^2 pour le mortier allégé.

Avec f_b : résistance moyenne normalisée de l'élément ;

f_m : résistance à la compression du mortier de montage ;

K : coefficient qui dépend du groupe.

Le tableau ci-dessous nous montre les valeurs de K pour le calcul de la résistance caractéristique à la compression.

Ouvrage de maçonnerie		Mortier d'usage courant	Mortier de joints minces (joint d'assise de 1à 3mm)	Mortier allégé de masse volumique	
				$600 \leq \rho \leq 800 kg/m^3$	$800 \leq \rho \leq 1300 kg/m^3$
Terre cuite	Groupe 1	0,55	0,75	0,30	0,40
	Groupe 2	0,45	0,70	0,25	0,30
	Groupe 3	0,35	0,50	0,20	0,25
	Groupe 4	0,35	0,35	0,20	0,25

Tableau 2: Valeurs de K pour le calcul de la résistance caractéristique à la compression

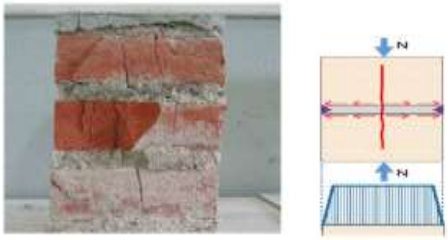
L'ouvrage de maçonnerie qui fait objet de notre travail est l'ouvrage de maçonnerie en terre cuite monté avec des joints courants.

Notre étude se focalise sur l'étude des trois cas des briques : Les briques traditionnelles, semi-industrielles (réfractaires et non réfractaires).

Les murs en briques cuites dans les murs porteurs présentent des avantages et des inconvénients [w.tec-ing.fr/…terre-cuite] :

- Avantage :
  - Façonnage facile ;
  - Une bonne isolation ;
  - Matériau naturel ;
  - Matériaux esthétique.
- Inconvénients :
  - Limitation de portée dans la conception ;
  - Modification du bâtiment quasi-impossible ;

Les essais montrent qu'une bande périphérique de mortier n'est pas confiné, elle tombe dès le début de l'essai [7]



Contrainte normale

Figure 4 : Effet de bord

- **Proposition d'un critère de rupture par fendage de la maçonnerie.**

Dans ce paragraphe, nous présentons un modèle simplifié de calcul de la résistance de la maçonnerie, à partir de celle des briques d'une part et celles des joints du mortier d'autre part, sous charges centrées et excentrées, et des caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux constitutifs.

Hypothèse :

- Les briques et les joints sont considérés isotropes et homogènes ;
- Nous considérons un contact parfait entre les briques et le mortier ;
- Les différents matériaux constitutifs du mur ont un comportement mécanique élastique non linéaire.

Sous l'action de la charge verticale N, le mortier et les briques se déforment.

En considérant que les briques sont plus rigides que le mortier, le mortier des joints horizontaux « H » tend à se déformer latéralement plus que les briques.

Avec ces déformations latérales, le joint vertical « V » est soumis à des forces horizontales qui tendent à se séparer des briques alors que le joint horizontal « H » est confiné. Il en résulte alors des contraintes de traction entre les briques et les joints de mortier verticaux et des contraintes de traction dans le bloc.

La figure ci-dessous nous montre le schéma du mur maçonné [11].

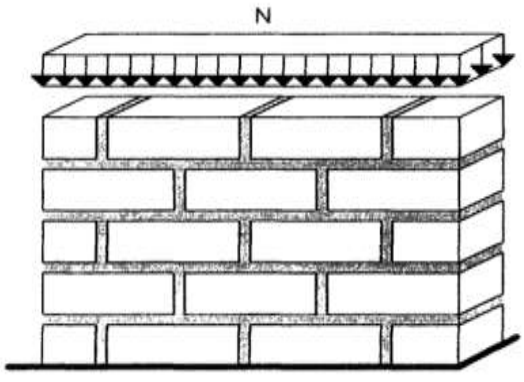


Figure 5 : Schéma du mur en maçonnerie

La difficulté majeure dans cette approche de la caractérisation de la maçonnerie est que le comportement réel des matériaux constitutifs et en particulier du mortier n'est pas élastique, linéaire jusqu'à la rupture.

La difficulté est la détermination des caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. Mais la prise en compte du module tangent dans le modèle permet d'approcher le comportement réel des matériaux, le coefficient de poisson pouvant être considéré constant.

I.3.3. Influence des joints sur la résistance des murs

Les joints ont une grande influence sur la résistance des murs maçonnés. Cela provient de la composition du mortier (sable, ciment et eau).

La figure ci-dessous nous montre l'influence des joints sur la résistance des murs maçonnés [5].

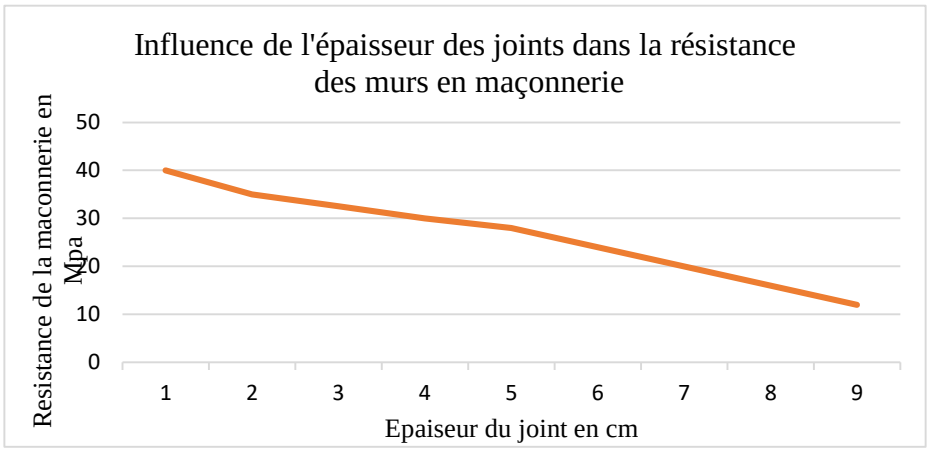


Figure 6 : Influence de l'épaisseur des joints dans la résistance des murs en maçonnerie.

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE

Comme on l'a stipulé précédemment, les essais faits pendant ce projet de mémoire sont les suivants :

- ✓ L'essai de contrôle des dimensions ;
- ✓ La mesure d'absorption de l'eau ;
- ✓ La masse volumique ;
- ✓ L'essai de résistance à la compression.

II.1 Essai de contrôle de dimensions

Après avoir contrôlé les dimensions des briques faisant objet de l'étude, on a constaté que les dimensions sont variables les unes des autres.

Les photos ci-dessous nous montrent le contrôle des dimensions suivant les trois directions



Photo 10 : Dimensions en X



Photo 11 : Dimensions en Y



Photo 12 : Dimensions en Z

Voici les résultats trouvés pour chaque type de briques testées. Ils se trouvent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3: Valeurs de dimensions des briques testées

Briques artisanales			**Briques semi-industrielles non non réfractaires**			**Briques semi-industrielles réfractaires**		
X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	X(cm)	Z(cm)	Y(cm)	X(cm)	Z(cm)	Y(cm)
19	9	5	20	5	10	21,5	6,5	10,02
19,20	8,15	5,10	20,1	5,05	10,15	21,48	6,45	10,06
19,10	8,10	5,15	20,15	5,10	10,12	21,52	6,48	10,03

Après analyse des résultats, les briques semi-industrielles réfractaires occupent la 1ère place en termes de dimensions (volume) par rapport aux briques semi-industrielles non réfractaires et artisanales.

II.2. Capacité d'absorption de l'eau

Essais sur la capacité d'absorption d'eau par les briques

La capacité d'absorption d'eau fait référence à la capacité d'un matériau à absorber l'eau lorsqu'il y est immergé et est représentée par la capacité d'absorption d'eau.

La capacité d'absorption d'eau est définie comme le rapport du poids d'eau absorbée par un matériau à l'état saturé sur le poids du matériau sec.

P_0=[(P-Pe) /Pe] *100 ;

Avec P_0 : Capacité d'absorption d'eau ;

P : Poids de l'échantillon après immersion (Poids humide) ;

Pe : Poids de l'échantillon avant l'immersion (Poids sec).

Les résultats trouvés sont à titre indicatif dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4: Valeurs moyennes issues des essais de l'absorption d'eau sur les briques testées

Briques artisanales			Briques semi industrielles non réfractaires			Briques réfractaires		
Pe(poids de la brique après étuvage) en kg	P(poids de la brique testée après immersion dans l'eau) en kg	M (masse : Qté d'eau absorbée) en %	M_i(masse avant immersion dans l'eau) en kg	M_f(masse après immersion dans l'eau après 48h) en kg	M (masse : Qté d'eau absorbée) en %	M_i(masse avant immersion dans l'eau) en kg	M_f(masse après immersion dans l'eau après 48h) en kg	M (masse : Qté d'eau absorbée) en %
1,63	1,84	12,88	2,01	2,12	5,47	2,83	3,10	9,54
1,58	1,75	10,76	2,04	2,11	3,43	2,84	3,12	9,86
1,68	1,86	10,71	2,03	2,15	5,91	2,77	3,05	10,1
Moyenne		**11,45**	**Moyenne**		**4,94**	**Moyenne**		**9,83**

Voici les graphiques montrant la comparaison des degrés d'absorption en fonction du type des briques

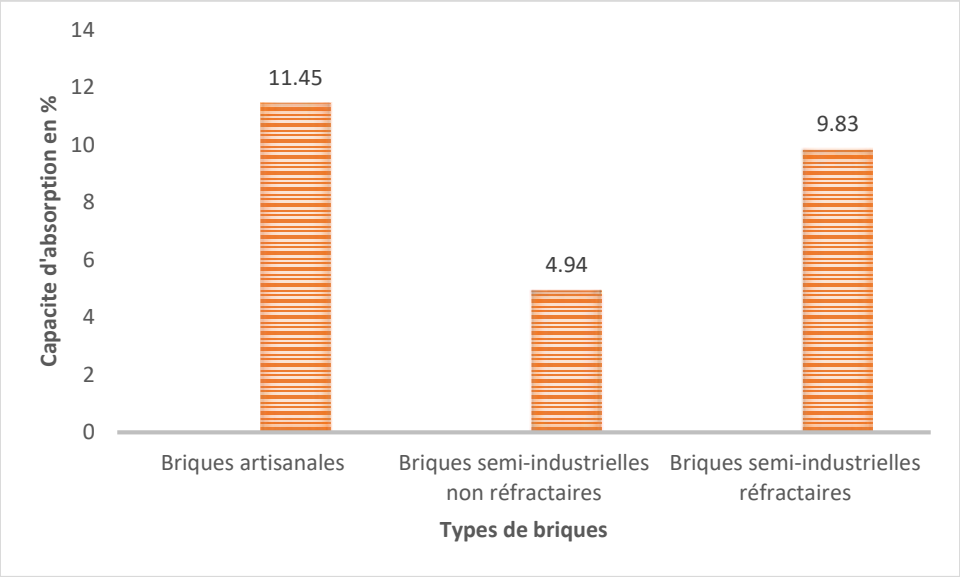


Figure 7 : Variation de la capacité d'absorption d'eau en fonction des types de briques

Après analyse des résultats obtenus, les briques artisanales absorbent de l'eau en quantité supérieure (d'une moyenne de 11,45%), ce qui rend moins résistant ce type de matériaux par rapport aux deux autres variétés (briques semi-industrielles non réfractaires et réfractaires) qui ont respectivement une moyenne de 4,94 et 9,83%.

Parmi les trois types de matériaux, ils peuvent être classés de la manière suivante en terme de résistance compte tenu de ses capacités d'absorption de l'eau :

- En première lieu, les brique les plus résistantes est celle qui ont une capacité d'absorption plus faible, en récurrence les briques semi-industrielles non réfractaires avec la capacité d'absorption moyenne de 4,94% ;
- En second lieu, ce sont les briques semi-industrielles réfractaires, avec la capacité d'absorption moyenne de 9,83% ;
- Et en troisième position, ce sont des briques artisanales ou traditionnelles avec la capacité d'absorption moyenne de 11,45%. [2]

II.3. Masse volumique

La masse volumique d'un solide est la masse de matériau par unité de volume.

Voici les masses volumiques des briques testées par catégories

Tableau 5: Masse volumique des briques testées

	Briques artisanales			**Briques semi-industrielles non réfractaires**			**Briques semi-industrielles réfractaires**		
Types	**Masse(g)**	**Volume (cm^3)**	**Masse volumique (g/cm^3)**	**Masse(g)**	**Volume (cm^3)**	**Masse volumique (g/cm^3)**	**Masse (g)**	**Volume (cm^3)**	**Masse volumique (g/cm^3)**
Type1	1630	19x9x5	1,906	2010	20x10x5	2,010	2830	21,5X10,02x6,5	2,021
Type2	1840	19,2x8,15x5,10	2,305	2017	20,1x10,15x5,05	1,957	2840	21,48x10,06x6,45	2,037
Type3	1750	19,10x8,10x5,15	2,196	2016	20,15x10,12x5,10	1,9384	2770	21,52x10,03x6,48	1,980
Moyenne			**2,135**	**Moyenne**		**2,95**	**Moyenne**		**2,0126**

Voici le graphique montrant la comparaison des masses volumiques en fonction du type des briques

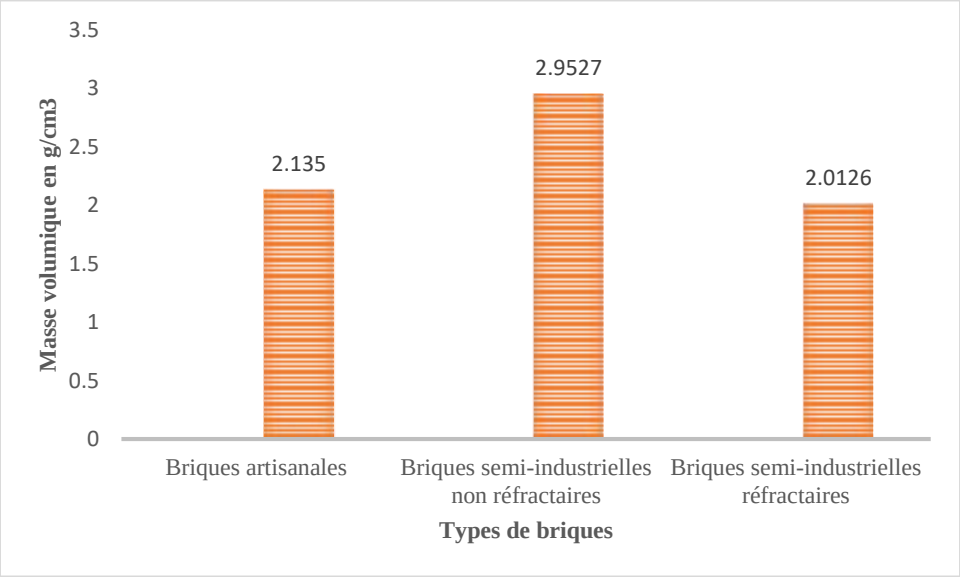


Figure 8 : Comparaison des masses volumiques en fonction des types de briques

Les masses volumiques des briques testées varient différemment. Cela est dû à la façon dont elles ont été confectionnées et des composantes. Ces valeurs nous montrent la compacité du matériau.

Les briques semi-industrielles non réfractaires sont très compactes avec une moyenne de 2,9527g/cm^3, d'où elles sont très résistantes par rapport aux deux autres variétés (briques artisanales et semi-industrielles réfractaires) qui ont respectivement la moyenne de 2,135 et 2,0126g/cm^3.

II.4. Essais de compression

II.4.1. Essais de compression sur les briques

L'essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique. La force nécessaire pour faire casser la brique, divisée par la surface (brute) de la brique donne la résistance à la rupture. Les photos ci-dessous nous montrent les essais réalisés :



(a)

Photo13 : Réglage de la surface d'assise



(b)

Photo14 : Brique en cours de compression



(c)

Photo15 : Brique rompue

Voici le tableau récapitulatif des valeurs trouvées après les essais.

Tableau 6 : Variation des contraintes en fonction des types de briques testées

N°	Briques artisanales			Briques semi-industrielles non réfractaires			Briques semi-industrielles réfractaires		
	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa
1	60000	190x90	3,5	300000	200x100	15	127000	215X100,2	5,9
2	58000	192x81,5	3,7	275000	201x101,5	13,5	121000	214,8x100,6	5,6
3	62000	191x81	4,0	288000	201,5x101,2	14,1	128000	215,2x100,3	5,9
Moyenne			**3,73**	**Moyenne**		**14,2**	**Moyenne**		**5,8**

Voici le graphique montrant la comparaison des contraintes en fonction du type des briques

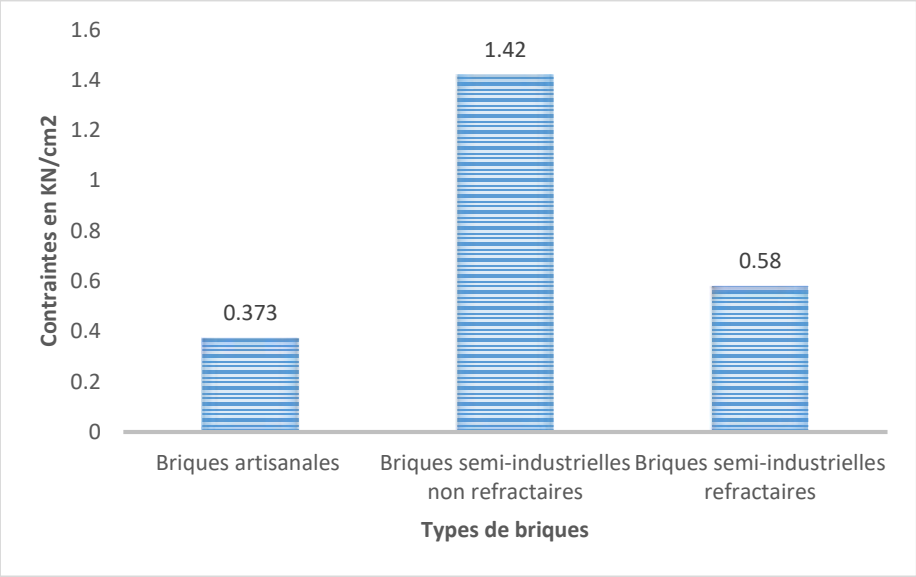


Figure 9 : Variation des contraintes pour les briques artisanales

Après analyse des résultats, on constate que les briques semi-industrielles non réfractaires avec une valeur maximale moyenne de 14,2Mpa sont très résistantes par rapport aux briques artisanales et briques semi-industrielles réfractaires, respectivement avec une moyenne de 3,73Mpa et 5,8Mpa.

II.4.2. Essais de compression sur les murs testés

L'essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique. Les murs ont été confectionnés avec du mortier dosé à 333,33kg/cm^3 (225ml d'eau et C/S=1/3). La force nécessaire pour faire casser le mur, divisée par la surface de contact donne la résistance à la rupture du mur. Les images ci-dessous nous montrent les essais réalisés :



(a)

Photo 16 : Confection des murets



(b)

Photo 17 : Réglage de la Surface d'assise



(c)

Photo 18 : Muret en cours de compression

Le calcul s'est fait sur des bandes maçonnées échantillonnées adaptées dans le laboratoire du Campus KIRIRI de l'Université du Burundi, malgré que les normes prévoient un modèle ayant les dimensions de **(1x1) m^2.**

Le tableau ci-bas nous montre les valeurs trouvées :

Tableau 7: Variation des contraintes dans les murets de dimensions et de nature différentes

Modèle	Muret en en briques artisanales						Muret en briques semi-industrielles non-réfractaires					
	L(mm)	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**	**L(mm)**	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**
Modèle 1	300	200	240	60000	330000	5,5	300	200	300	60000	800000	13,3
Modèle 2	300	300	300	90000	370000	4,11	300	300	240	90000	750000	8,3
Modèle 3	400	300	300	120000	400000	3,33	400	300	300	120000	1020000	8,5

modèle	Muret en briques semi-industrielles réfractaires					
	L(mm)	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**
Modèle 1	200	200	240	40000	390000	9,75
Modèle 2	300	300	300	90000	550000	6,11
Modèle 3	400	200	300	80000	580000	7,25

CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DES MURS PORTEURS MACONNES SOUMIS AUX EFFORTS DE COMPRESSION.

III.1 Introduction générale

Dans le précédent chapitre, nous avons abordé de façon générale, les différents essais dans l'étude expérimentale, leurs techniques de mise en œuvre et interprétations des résultants trouvés selon la norme Eurocode 6.

Nous penchons cette fois-ci sur la façon d'obtenir la valeur de calcul(N_{Rd}) de la résistance verticale d'un mur en maçonnerie pour ensuite pouvoir vérifier ce mur soumis aux charges verticales.

Pour obtenir la résistance à la compression f_d d'un mur en maçonnerie, il faut d'abord déterminer les propriétés du matériau. A ce sujet, il est important de préciser que les calculs de l'Eurocode 6 considèrent que le mur de maçonnerie qui satisfont aux normes de produits de la série NBN EN 771 et pour lesquels la résistance à la compression est déterminée selon la méthode d'essais pour les éléments de maçonnerie.

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie f_k est une propriété du « matériau composé » qu'une maçonnerie. Selon la NBN EN 1996-1-1(+ANB), cette résistance caractéristique peut être déterminée de deux manières [3] :

- ✓ La méthode directe en réalisant des essais de compression sur murets ;
- ✓ La méthode indirecte appliquant des formules dans lesquelles on introduit la résistance des matériaux composants : **briques** et **mortier.**
  C'est cette dernière méthode que nous allons développer dans ce présent chapitre.

III.1.1. Résistance à la compression de briques de maçonnerie : f_b

Dans le cadre du marquage CE, le fabricant de briques de maçonnerie doit déclarer la résistance moyenne f_{mean}, ainsi que la catégorie à laquelle appartiennent les briques.

La norme de produit NBN EN 771-1 distingue deux catégories de briques :

- ➢ Briques de catégories I : sont des briques pour lesquelles le fabricant déclare la résistance à la compression avec un niveau de confiance de 95% ;
- ➢ Briques de catégorie II : sont des briques qui ne satisfont pas aux exigences de confiance ci-dessus en ce qui concerne la résistance à la compression.

La résistance d'une brique est déterminée en réalisant des essais de compression selon la NBN EN 772-1.

En tenant compte du niveau de confiance déclare, ces résultats servent de base au calcul de la valeur moyenne.

Si les briques sont destinées à être utilisées pour une maçonnerie portante calculée, la résistance normalisée f_b sera également donnée ou le lien vers les informations utiles pour la calculer sera renseigné.

Le facteur de forme par lequel f_{mean} doit être multiplie est défini dans le tableau ci-dessous.

Le calcul de la résistance moyenne normalisée à la compression des briques de maçonneries se fait en utilisant la formule suivante :

$$\mathbf{f_b = f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c}$$

Où f_b est la résistance moyenne normalisée à la compression ;

f_{mean} est la résistance moyenne déclarée par le fabricant (ici résistance moyenne trouvée) ;

δ est le facteur de forme tel que défini dans la NBN EN 772-1 et comme on peut le retrouver dans le tableau 3.1 de la NBN 1996-1-1 en fonction des dimensions de la brique.

δ_c est le facteur de conditionnement et vaut à 1 pour les échantillons séchés à l'air.

N.B : Les calculs se font sur un muret d'une bande de 1m de hauteur et de longueur.

Tableau 8 : Valeurs de δ en fonction des dimensions de la brique

Hauteur (mm)	Plus petite dimension horizontale (mm)				
	50	100	150	200	≥250
40	0.80	0.70	-	-	-
50	0.85	0.75	0.70	-	-
65	0.95	0.85	0.75	0.70	0.65
100	1.15	1.00	0.90	0.80	0.75
150	1.30	1.20	1.10	1.00	0.95
200	1.45	1.35	1.25	1.15	1.10
≥250	1.55	1.45	1.35	1.25	1.15

III.1.2. Résistance à la compression du mortier : f_m

Le mortier doit satisfaire aux exigences décrites dans la norme produit NBN EN 998-2. La résistance à la compression du mortier est déterminée au moyen de la NBN EN 1015-11. On retrouve la valeur de cette résistance dans la dénomination du mortier. Un mortier Mx (M20, M12, M8, M5, M2.5) a une résistance moyenne à la compression de xN/mm^2.

Tableau 9 : Information non-normative quant aux différents mortiers et à l'adéquation de la résistance des briques à la résistance du mortier

Mortier		Eléments de maçonnerie
Dénomination	Résistance moyenne à la compression f_m(N/mm^2)	Résistance moyenne normalisée à la compression (N/mm^2)
M_{20}	20	>20
M_{12}	12	$12 \leq f_b \leq 48$
M_8	8	$8 \leq f_b \leq 32$
M_5	5	$5 \leq f_b \leq 20$
$M_{2.5}$	2.5	$2.5 \leq f_b \leq 10$

III.1.3. Résistance de la maçonnerie : f_k

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$f_k = K.f_b^{\alpha} f_m^{\beta}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

α et β : exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, β vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, α=0.65 et 0.25 pour β.

Un aperçu des valeurs de K, α et β est repris dans le tableau 3.3.

III.1.4. Résistance à la compression de la maçonnerie--valeur de calcul : f_d

La résistance à la compression de la maçonnerie est donnée par la formule suivante :

$$f_d = \frac{fk}{\gamma m}$$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau (coefficient de sécurité)

Tableau 10 : Facteurs ᵅ, ᵝ et K dépendant du type de mortier et du groupe

Eléments de maçonnerie K		Mortier d'usage courant			Mortier-colle (joint d'assise ≥0.5mm et ≤3mm)		
		ɑ	β	K	ɑ	β	K
Terre cuite	Groupe 1	0.50	0.65	0.25	-	-	-

Le tableau ci-dessous reprend les valeurs pour γ_m. Il opère une distinction selon la nature et le degré de contrôle des produits et de la mise en œuvre sur chantier.

Pour le contrôle d'exécution, on distingue :

- ✓ Contrôle standard > classe d'exécution N (normal) ;
- ✓ Bureau de contrôle externe > classe d'exécution S (spécial).
  La surveillance normale est étendue à un contrôle régulier et fréquent par du personnel qualifié indépendant de l'entreprise qui exécute les travaux.

Tableau 11 : Coefficients de sécurité du matériau

Matériau		γ_m	
		Classe	
Code	Maçonnerie constituée de :	S	N
A	Eléments de catégorie I avec certification produit Mortier performanciel avec certification produit	2,0	2,5
B	Eléments de catégorie I Tout mortier	2,3	2,8
C	Eléments de catégorie II (*) Tout mortier	3,0	3,5

(*) si une garantie peut être donnée quant au fait que le coefficient de variation de la résistance à la compression de l'élément ne dépasse pas 25%, les valeurs à assigner à γ_m sont respectivement 2,5 et 3,0 pour les classes S et N.

III.2 Dimensionnement proprement dit

Le dimensionnement des murs en maçonnerie consiste à déterminer la section nécessaire que l'on peut adopter lors de la construction, compte tenu de la nature des matériaux utilisés (briques, sable, ciment et eau). Ainsi, la vérification de la tenue de la structure est nécessaire.

Dans notre étude, les sections des éléments en maçonnerie (murets testés) sont connues. Ce n'est que des vérifications pour savoir si les modèles pris en compte sont compatibles pour supporter les charges qui lui sont appliquées.

Voici les modèles des briques et murets testés, leurs dimensions ainsi que leurs charges de rupture.

Tableau 12 : Modèles des briques testées

N°	Briques artisanales			Briques semi-industrielles non réfractaires			Briques semi-industrielles réfractaires		
	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa	Charges de rupture en N	Surface de contact en mm^2	Contrainte max. Correspondante en Mpa
1	60000	190x90	3,5	300000	200x100	15	127000	215X100,2	5,9
2	58000	192x81,5	3,7	275000	201x101,5	13,5	121000	214,8x100,6	5,6
3	62000	191x81	4,0	288000	201,5x101,2	14,1	128000	215,2x100,3	5,9
Moyenne			**3,73**	**Moyenne**		**14,2**	**Moyenne**		**5,8**

Tableau 13 : Modèles des murets testés dans le laboratoire

Modèle	Muret en en briques artisanales						Muret en briques semi-industrielles non-réfractaires					
	L(mm)	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**	**L(mm)**	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**
Modèle 1	300	200	240	60000	330000	5,5	300	200	300	60000	800000	13,3
Modèle 2	300	300	300	90000	370000	4,11	300	300	240	90000	750000	8,3
Modèle 3	400	300	300	120000	400000	3,33	400	300	300	120000	1020000	8,5

modèle	Muret en briques semi-industrielles réfractaires					
	L(mm)	**l(mm)**	**H(mm)**	**S(mm^2)**	**Q(N)**	**σ(Mpa)**
Modèle 1	200	200	240	40000	390000	9,75
Modèle 2	300	300	300	90000	550000	6,11
Modèle 3	400	200	300	80000	580000	7,25

III.2.1. Dimensionnement des murs en briques artisanales

Méthode numérique

Le dimensionnement et vérification de l'élément s'articulent sur les trois modèles testés. Il s'agit entre autres :

- ✓ Modèle 1 : briques de dimensions suivantes : L=19cm, l=9cm et h=5cm.
- ✓ Modèle 2 : briques de dimensions suivantes : L=19,20cm, l=8,15cm et H=5,10cm.
- ✓ Modèle 3 : briques de dimensions suivantes : L=19,10cm, l=8,10cm et h=5,15cm.

Les charges de rupture à l'état limite ultime sont multipliées par 1,35 pour les trois modèles de briques et sont respectivement de 81KN ; 78,3KN et 83,7KN, celles-ci vont représenter **N_{Ed}.**

a) Modèle 1

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 0,373KN/cm^2, soit 3,73N/mm^2.

Pour le modèle 1, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 19x9x5cm^3(cela veut dire que L=19cm, l=9cm et h=5cm).

Le facteur de forme δ est de 0,83 après interpolation suivant le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=3,73N/mm^2.
- f_b=3,0959N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- f_m=2x3, 0959N/mm^2
- f_m=6,1918N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2 ;

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

f_k=0,25x3,0959$^{0.50}$x6,1918^{0,65}

f_k=1,44N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau (coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{1,44N/mm2}{2,5}$
- **f_d=0,576N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ 81.10^{3}N<1x6.10^{4}mm^2 x0,576N/mm^2
- ✓ 81.10^3 N>34,56.10^{3}N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

- Prenons un mur de 50cm d'épaisseur

✓ Dans ce cas, la section devient 150.000mm^2 au lieu de 60.000mm^2. Cela implique que : 81.10^{3}N<1x15.10^{4}mm^2 x0,576N/mm^2
81.10^{3}N<86,4.10^{3}N **(la condition est vérifiée)**

b) Modèle 2

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 0,373KN/cm^2, soit 3,73N/mm^2.

Pour le modèle 2, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 19x9x5cm^3(cela veut dire que L=19,20cm, l=8,15cm et H=5,10cm.

Le facteur de forme δ est de 0,83 après interpolation suivant le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=3,73N/mm^2.
- f_b=3,0959N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- f_m=2x3,0959N/mm^2
- f_m=6,1918N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

f_k=0,25x3,0959$^{0.50}$x6,1918^{0,65}

f_k=1,44N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau (coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{1,44N/mm2}{2,5}$
- **f_d=0,576N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ 78,3.10^{3}N<1x6.10^{4}mm^2 x0,576N/mm^2
- ✓ 78,3.10^3 N>34,56.10^{3}N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 50cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 150.000mm^2 au lieu de 90.000mm^2. Cela implique que : 78,3.10^{3}N<1x15.10^{4}mm^2 x0,576N/mm^2
  78,3.10^{3}N<86,4.10^{3}N **(la condition est vérifiée).**

c) Modèle 3

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 0,373KN/cm^2, soit 3,73N/mm^2.

Pour le modèle 3, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 19x9x5cm^3(cela veut dire que L=19,10cm, l=8,10cm et h=5,15cm.

Le facteur de forme δ est de 0,83 après interpolation suivant le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=3,73N/mm^2.
- f_b=3,0959N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à f_m=2f_b.

- f_m=2x3,0959N/mm^2
- f_m=6,1918N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

f_k=0,25x3,0959$^{0.50}$x6,1918^{0,65}

f_k=1,44N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau(coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{1,44N/mm2}{2,5}$
- **f_d=0,576N/mm²**

Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ $83,7.10^3N<1x6.10^4mm^2$ x0,576N/mm²
- ✓ $83.7.10^3$ N>$34,56.10^3$N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**
  - Prenons un mur de 37,5cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 150.000mm² au lieu de 120.000mm². Cela implique que : $83,7.10^3N<1x15.10^4mm^2$ x0,576N/mm²
  $83,7.10^3N<86,4.10^3N$ **(la condition est vérifiée).**

Conclusion : Pour que les murs en briques cuites artisanales soumis aux efforts de compression puissent résister sans défaillance, il faut avoir au minimum une épaisseur de 37,5 à 50cm.

III.2.2. Dimensionnement des murs en briques semi-industrielles non réfractaires

Le dimensionnement et vérification de l'élément s'articulent sur les trois modèles testés. Il s'agit entre autres :

- ✓ Modèle 1 : briques de dimensions suivantes : L=20cm, l=10cm et h=5cm.
- ✓ Modèle 2 : briques de dimensions suivantes : L=20,10cm, l=10,15cm et H=5cm.
- ✓ Modèle 3 : briques de dimensions suivantes : L=20,15cm, l=10,12cm et h=5,10cm.

Les charges de rupture à l'état limite ultime sont multipliées pour les trois modèles de briques par 1,35 et sont respectivement de 405KN ; 371,25KN et 388,8KN, celles-ci vont représenter **N_{Ed}**.

d) Modèle 1

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 1,42KN/cm^2, soit 14,2N/mm^2.

Pour le modèle 1, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 20x10x5cm^3(cela veut dire que L=20cm, l=10cm et h=5cm).

Le facteur de forme δ est de 0,75 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=14,2N/mm^2.
- f_b=10,65N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à f_m=2f_b.

- f_m=2x10,65N/mm^2
- f_m=21,3N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

f_k=0,25x10,65$^{0.50}$x21,3^{0,65}

f_k=5,95N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau (coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{5,95N/mm2}{2,5}$
- **f_d=2,38N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ 405.10^{3}N<1x6.10^{4}mm^2 x2,38N/mm^2
- ✓ 405.10^3 N<142,8.10^{3}N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 60cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 180.000mm^2 au lieu de 60.000mm^2. Cela implique que : 405.10^{3}N<1x18.10^{4}mm^2 x2,38N/mm^2
  405.10^{3}N<428,4.10^{3}N **(la condition est vérifiée).**

e) Modèle 2

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 1,42KN/cm^2, soit 14,2N/mm^2.

Pour le modèle 2, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 20,1x10, 15x5, 05cm3(cela veut dire que L=20,10cm, l=10,15cm et h=5,05cm).

Le facteur de forme δ est de 0,75 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=14,2N/mm^2.
- f_b=10,65N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- $f_m=2x10,65N/mm^2$
- $f_m=21,3N/mm^2$

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

α et β : exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, β vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, α=0.50 ; 0.65 pour β et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, α et β est repris dans le tableau 3.3.

$f_k=0,25x10,65^{0.50}x21,3^{0,65}$

$f_k=5,95N/mm^2$

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau(coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{5,95N/mm2}{2,5}$

- **f_d=2,38N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ 371,25.10^{3}N<1x6.10^{4}mm^2 x2,38N/mm^2
- ✓ 371,25.10^3 N>142,8.10^{3}N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 54cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 162.000mm^2 au lieu de 90.000mm^2. Cela implique que : 371,25.10^{3}N<1x16,2.10^{4}mm^2 x2,38N/mm^2
  371,25.10^{3}N<385,56.10^{3}N **(la condition est vérifiée).**

f) Modèle 3

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 1,42KN/cm^2, soit 14,2N/mm^2.

Pour le modèle 3, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 20,15x10,12x5,10cm^3(cela veut dire que L=20,15cm, l=10,12cm et h=5,10cm).

Le facteur de forme δ est de 0,75 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=14,2N/mm^2.
- f_b=10,65N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- f_m=2x10,65N/mm^2
- f_m=21,3N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$\mathbf{f_k = K.f_b^{\alpha} f_m^{\beta}}$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

f_k=0,25x10, 650.50x21, 30,65

f_k=5,95N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d = \frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau(coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d = \frac{5,95N/mm2}{2,5}$
- **f_d=2,38N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$\mathbf{N_{Ed} \leq N_{Rd} = \phi.A.\ f_d}$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ $388{,}8.10^3N<1x6.10^4mm^2$ x2,38N/mm^2
- ✓ $388{,}8.10^3$ N>$142{,}8.10^3$N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 41,25cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient $165.000mm^2$ au lieu de $120.000mm^2$. Cela implique que : $388{,}8.10^3N<1x16{,}5.10^4mm^2$ x2,38N/mm^2
  $388{,}8.10^3N<392{,}7.10^3N$ **(la condition est vérifiée).**

Conclusion : Pour que les murs en briques cuites non réfractaires soumis aux efforts de compression puissent résister sans défaillance, il faut au minimum avoir une épaisseur allant de 41,25 à 60cm.

III.2.3. Dimensionnement des murs en briques semi-industrielles réfractaires

Le dimensionnement et vérification de l'élément s'articulent sur les trois modèles testés. Il s'agit entre autres :

- ✓ Modèle 1 : briques de dimensions suivantes : L=21,5cm, l=10,02cm et h=6,5cm.
- ✓ Modèle 2 : briques de dimensions suivantes : L=21,48cm, l=10,06cm et H=6,4cm.
- ✓ Modèle 3 : briques de dimensions suivantes : L=21,52cm, l=10,03cm et h=6,40cm.

Les charges de rupture à l'état limite ultime sont multipliées par 1,35 pour les trois modèles de briques et sont respectivement de 171,45KN ; 163,35KN et 172,8KN, celles-ci vont représenter $\mathbf{N_{Ed}}$.

g) Modèle 1

- ➢ $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de $0{,}58KN/cm^2$, soit $5{,}8N/mm^2$.

Pour le modèle 1, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : $21{,}5x10{,}02x6{,}5cm^3$(cela veut dire que L=21,5cm, l=10,02cm et h=6,5cm).

Le facteur de forme δ est de 0,85 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- ➢ $F_{mean}=5{,}8N/mm^2$.
- ➢ $f_b=4{,}93N/mm^2$

La résistance moyenne du mortier est limitée à $20N/mm^2$ et $2f_b$ pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- ➢ $f_m=2x4{,}93N/mm^2$
- ➢ $f_m=9{,}86N/mm^2$

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

α et β : exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, β vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, α=0.50 ; 0.65 pour β et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, α et β est repris dans le tableau 3.3.

$f_k=0,25x4,93^{0.50}x9,86^{0,65}$

$f_k=2,46N/mm^2$

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau(coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{2,46N/mm2}{2,5}$
- **f_d=0,984N/mm^2**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$\mathbf{N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.\ f_d}$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ $171,45.10^3N<1x4.10^4mm^2$ x0,984N/mm^2
- ✓ $171,45.10^3$ N>$39,36.10^3$N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 90cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 180.000mm^2 au lieu de 40.000mm^2. Cela implique que : $171,45.10^3N<1x18.10^4mm^2$ x0,984N/mm^2
  $171,45.10^3N<177,120.10^3N$ **(la condition est vérifiée).**

h) Modèle 2

- ➢ $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 0,58KN/cm^2, soit 5,8N/mm^2.

Pour le modèle 1, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : $21,5x10,02x6,5cm^3$(cela veut dire que L=21,48cm, l=10,06cm et h=6,40cm).

Le facteur de forme δ est de 0,85 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- ➢ $F_{mean}=5,8N/mm^2$.
- ➢ $f_b=4,93N/mm^2$

La résistance moyenne du mortier est limitée à $20N/mm^2$ et $2f_b$ pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- ➢ $f_m=2x4,93N/mm^2$
- ➢ $f_m=9,86N/mm^2$

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

$^{\alpha}$ et $^{\beta}$: exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, $^{\beta}$ vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, $^{\alpha}$=0.50 ; 0.65 pour $^{\beta}$ et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, $^{\alpha}$ et $^{\beta}$ est repris dans le tableau 3.3.

$f_k=0,25x4,93^{0.50}x9,86^{0,65}$

$f_k=2,46N/mm^2$

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau(coefficient de sécurité). Ici, on va prendre $\gamma_m=2,5$

- $f_d=\frac{2,46N/mm2}{2,5}$
- **$f_d=0,984N/mm^2$**

<u>Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3</u>

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ $163,35.10^3N<1x9.10^4mm^2$ x0,984N/mm^2
- ✓ $163,35.10^3$ $N>88,56.10^3N$ **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**
  - Prenons un mur de 60cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient $180.000mm^2$ au lieu de $90.000mm^2$. Cela implique que : $163,35.10^3N<1x18.10^4mm^2$ x0,984N/mm^2
  $163,35.10^3N<177,120.10^3N$ **(la condition est vérifiée).**

i) Modèle 3

- $f_b=f_{mean}.\ \delta.\ \delta_c$

La résistance moyenne f_{mean} pour les trois types de briques artisanales est de 0,58KN/cm^2, soit 5,8N/mm^2.

Pour le modèle 1, nous avons les briques ayant les dimensions suivantes : 21,5x10,02x6,5cm^3(cela veut dire que L=21,52cm, l=10,03cm et h=6,40cm).

Le facteur de forme δ est de 0,85 d'après le tableau 3.1. Et δ_c est égal à 1 car les échantillons sont séchés à l'air.

- F_{mean}=5,8N/mm^2.
- f_b=4,93N/mm^2

La résistance moyenne du mortier est limitée à 20N/mm^2 et 2f_b pour le mortier d'usage courant.

On est en présence du mortier à usage courant et cela nous donne la résistance moyenne du mortier équivalente à $f_m=2f_b$.

- f_m=2x4,93N/mm^2
- f_m=9,86N/mm^2

La résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie est sa capacité à pouvoir supporter les charges qui lui sont appliquées.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{f_k=K.f_b^{\alpha}f_m^{\beta}}$$

Avec :

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie en N/mm^2

f_m : résistance moyenne du mortier en N/mm^2 ;

K : constante qui dépend du type d'élément de maçonnerie et son appartenance à un groupe ainsi que du type de mortier.

On espère une distinction entre « mortier d'usage courant » et « mortier-colle ». Le mortier-colle est utilisé pour un joint d'assise d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 3mm.

α et β : exposants qui ne dépendent que du type de mortier.

Pour un mortier-colle, β vaut toujours 0(la résistance du mortier-colle n'influence pas la résistance de la maçonnerie).

Pour un mortier d'usage courant, α=0.50 ; 0.65 pour β et K=0,25

Un aperçu des valeurs de K, α et β est repris dans le tableau 3.3.

$f_k=0,25x4,93^{0.50}x9,86^{0,65}$

f_k=2,46N/mm^2

La résistance de calcul de la maçonnerie f_d est donnée par la formule suivante :

$f_d=\frac{fk}{\gamma m}$

Avec :

f_d : résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

f_k : résistance caractéristique à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2

γ_m : coefficient du matériau (coefficient de sécurité). Ici, on va prendre γ_m=2,5

- $f_d=\frac{2,46N/mm2}{2,5}$
- **f_d=0,984N/mm^2**

Vérification selon la méthode simplifiée de NBN EN 1996-3

La vérification se fait à l'état limite ultime :

$N_{Ed} \leq N_{Rd}=\phi.A.f_d$

Avec : N_{Ed} qui est la valeur de calcul de la charge verticale ;

N_{Rd} qui est la valeur de calcul de la résistance aux charges verticales ;

A qui est la section horizontale brute chargée du mur ;

$f_{d\ qui}$ est la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie, en N/mm^2 .

- ✓ 172,8.10^{3}N<1x6.10^{4}mm^2 x0,984N/mm^2
- ✓ 172,8.10^3 N>59,040.10^{3}N **(la condition n'est pas vérifiée. Il faut augmenter la section du mur).**

  - Prenons un mur de 45cm d'épaisseur
- ✓ Dans ce cas, la section devient 180.000mm^2 au lieu de 80.000mm^2. Cela implique que : 172,8.10^{3}N<1x18.10^{4}mm^2 x0,984N/mm^2
  172,8.10^{3}N<177,120.10^{3}N **(la condition est vérifiée).**

Conclusion : Pour que les murs en briques cuites réfractaires, soumis aux efforts de compression puissent résister sans défaillance, il faut au minimum avoir une épaisseur allant de 45 à 90cm.

Tableau 14 : Récapitulatif des valeurs après dimensionnement

	Briques artisanales								
Modèle	Dimensions			$f_{mean}(N/mm^2)$	$f_b(N/mm^2)$	$f_m(N/mm^2)$	$f_k(N/mm^2)$	f_d(N/mm2)	Ep. Adoptée (cm)
	L(mm)	l(mm)	H(mm)						
Modèle 1	190	90	50	3,73	3,0959	6,1918	1,44	0,576	50
Modèle 2	192	81,5	51		3,0959	6,1918	1,44	0,576	50
Modèle 3	191	81,0	51,5		3,0959	6,1918	1,44	0,576	50
	Briques semi-industrielles non réfractaires								
Modèle	Dimensions			$f_{mean}(N/mm^2)$	$f_b(N/mm^2)$	$f_m(N/mm^2)$	$f_k(N/mm^2)$	f_d(N/mm2)	Ep. Adoptée (cm)
	L(mm)	L(mm)	H(mm)						
Modèle 1	200	100	50	14,2	10,65	21,3	5,95	2,38	60
Modèle 2	201	101,5	50,5		10,65	21,3	5,95	2,38	54
Modèle 3	201,5	101,2	51,0		10,65	21,3	5,95	2,38	55
	Briques semi-industrielles réfractaires								
Modèle	Dimensions			$f_{mean}(N/mm^2)$	$f_b(N/mm^2)$	$f_m(N/mm^2)$	$f_k(N/mm^2)$	f_d(N/mm2)	Ep. Adoptée(cm)
	L(cm)	L(cm)	H(cm)						
Modèle 1	21,5	10,02	6,5	5,8	4,93	9,86	2,46	0,984	60
Modèle 2	21,48	10,06	6,45		4,93	9,86	2,46	0,984	60
Modèle 3	21,52	10,03	6,48		4,93	9,86	2,46	0,984	60

III.3 Comparaison des contraintes

La méthode consiste à comparer la résistance aux charges verticales du mur dimensionné par rapport à la résistance du mur modélisé compte tenu des charges verticales (suivant l'axe Z).

Condition :

- La résistance du mur modélisé doit être inférieure à la résistance du mur dimensionné.

1) Modèle sur briques artisanales

Ici, la charge de résistance du mur dimensionné est de $86{,}4.10^3$N. La surface de contact prise en compte est de (0,50x1) m^2.

La résistance aux charges verticales du mur dimensionné vaut dans ce cas 172,8Kpa

Pendant la modélisation, la charge qu'il faut appliquer doit être inférieure ou égale à 47,8KN, avec la charge unitaire de 0,71KN (cfr annexe 1 page 73). La résistance du mur modélisé vaut 170Kpa < 172,8Kpa du mur dimensionné (condition vérifiée).

2) Modèle sur briques semi-industrielles non réfractaires

Ici, la charge de résistance du mur dimensionné est de $428{,}4.10^3$N. La surface de contact prise en compte est de (0,60x1) m^2.

La résistance aux charges verticales du mur dimensionné vaut dans ce cas 714Kpa.

Pendant la modélisation, la charge qu'il faut appliquer doit être inférieure ou égale à 233KN, avec la charge unitaire de 3.02KN (cfr annexe 2 page 74). La résistance du mur modélisé vaut 714Kpa=714Kpa du mur dimensionné (condition vérifiée).

3) Modèle sur briques semi-industrielles réfractaires

Ici, la charge de résistance du mur dimensionné est de $177{,}120.10^3$N. La surface de contact prise en compte est de (0,60x1) m^2.

La résistance aux charges verticales du mur dimensionné vaut dans ce cas 295,20Kpa.

Pendant la modélisation, la charge qu'il faut appliquer doit être inférieure ou égale à 95KN, avec la charge unitaire de 1.23KN (cfr annexe 2 page 75). La résistance du mur modélisé vaut 291Kpa<295.20Kpa du mur dimensionné (condition vérifiée).

CHAPITRE IV : MODELISATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS DES MURETS TESTES AU LABORATOIRE.

Le présent chapitre a pour l'objectif de faire une analyse comparative des contraintes et les déformations qui se manifestent dans les blocs soumis aux efforts de compression verticaux (murs maçonnés) à partir des modèles testés au niveau du laboratoire du Campus KIRIRI, pour lesquelles, les mêmes modèles avec les mêmes charges.

IV.1. Description du logiciel utilisé dans la modélisation

Le logiciel utilisé est un logiciel **« LIRA-SAPR »** qui nous renseigne principalement sur les sollicitations (effort normal, effort tranchant, moment fléchissant, contraintes et déplacements) de l'élément suivant les trois axes (X, Y et Z).

IV.2. Paramètres d'entrée

Les paramètres d'entrée pour modéliser les murets sont les suivants :

- Résistance des briques (cas non linéaire) ;
- Déformations des briques (cas non linéaire) ;
- Module d'élasticité($E=24.106KN/m^2$) ;
- Coefficient de Poisson ($\upsilon=0,2$) ;
- Poids volumiques des briques (variables).

IV.3. Principe de modélisation utilisé

Le principe de modélisation utilisé est la méthode des éléments finis (de type volume) : linéaire.

Les liaisons utilisées sont des liaisons d'encastrement.

IV.4. Critère de rupture choisi

Le critère de rupture choisi est le suivant :

Les contraintes données par le modèle doivent être inférieures ou égales aux contraintes admissibles des briques.

IV.5. Etape et processus de modélisation

Le processus de modélisation du bloc se fait suivant les étapes suivantes :

- ✓ Fixation des degrés de liberté ;
- ✓ Mise en place des coordonnées de l'élément ;
- ✓ Duplication de l'élément suivant les trois axes ;
- ✓ Mise en place des appuis avec fixation du degré de liberté ;
- ✓ Définir les propriétés du matériau ;
- ✓ Chargement de l'élément ;
- ✓ Analyse complète et interprétation des résultats.

IV.6. Modélisations des murets testés dans le laboratoire

Les murets qui font objet de notre projet de fin d'études sont décrits dans le chapitre II. Les briques utilisées pour ces murets sont des briques de trois types avec des dimensions différentes.

Tableau 15 : Contraintes des différents modèles des briques artisanales

Modèle	Muret en en briques artisanales					
	L (cm)	**l(cm)**	**H (cm)**	**S (cm^2)**	**Q(KN)**	**σ(Mpa)**
Modèle 1	30	20	24	600	330	5,5
Modèle 2	30	30	30	900	370	4,11
Modèle 3	40	30	30	1200	400	3,33

Tableau 16 : Contraintes des différents modèles des briques semi-industrielles non réfractaires

Modèle	Muret en briques semi-industrielles non-réfractaires					
	L (cm)	**l (cm)**	**H (cm)**	**S (cm^2)**	**Q(KN)**	**σ (KN/cm^2)**
Modèle 1	30	20	30	600	800	1,33
Modèle 2	30	30	24	900	750	0,83
Modèle 3	40	30	30	1200	1020	0,85

Tableau 17 : Contraintes des différents modèles des briques semi-industrielles réfractaires

modèle	Muret en briques semi-industrielles réfractaires					
	L(cm)	**L(cm)**	**H(cm)**	**S(cm^2)**	**Q(KN)**	**σ(KN/cm^2)**
Modèle 1	20	20	24	400	390	0,975
Modèle 2	30	30	30	900	550	0,611
Modèle 3	40	20	30	800	580	0,725

Toutes les modélisations sont en annexe

IV.7. Récapitulatif des valeurs après modélisation

a) Briques artisanales

Tableau 18 : Contraintes et déplacements pour les briques artisanales

	Contraintes normales σ(N/mm^2)			Contraintes tangentielles Ƭ(N/mm^2)			Déplacement en mm		
	σx	σy	σz	Ƭxy	Ƭxz	Ƭyz	X	Y	Z
Modèle 1	1,060	9,350	1,050	1,100	0,345	1,100	0,0134	0,0104	0,0688
Modèle 2	0,277	2,430	1,770	0,285	0,0894	0,285	0,00341	0,00341	0,0207
Modèle 3	0,230	1,950	1,230	0,229	0,0719	0,229	0,0033	0,00274	0,0168

b) Briques semi-industrielles non réfractaires

Tableau 19 : Contraintes et déplacements pour les briques semi-industrielles non réfractaires

	Contraintes normales σ(N/mm^2)			Contraintes tangentielles Ƭ(N/mm^2)			Déplacement en mm		
	σx	σy	σz	Ƭxy	Ƭxz	Ƭyz	X	Y	Z
Modèle 1	3,670	3,280	3,660	3,860	1,210	3,850	0,0463	0,0362	0,281
Modèle 2	1,380	2,2700	2,510	0,504	0,528	2,420	0,0408	0,105	0,192
Modèle 3	2,120	18,000	2,660	2,110	0,663	2,110	0,0304	0,0304	0,155

c) Briques semi-industrielles réfractaires

Tableau 20 : Contraintes et déplacements pour les briques semi-industrielles réfractaires

	Contraintes normales $\sigma(N/mm^2)$			Contraintes tangentielles $\tau(N/mm^2)$			Déplacement en mm		
	σx	σy	σz	τxy	τxz	τyz	X	Y	Z
Modèle 1	2,090	19,100	2,190	2,240	0,706	1,340	0,0211	0 ,0211	0,139
Modèle 2	1,450	12,700	1,450	1,490	0,469	1,490	0,0179	0,0179	0,109
Modèle 3	1,720	14,900	1,680	1,750	0,548	1,740	0,0254	0,0164	0,128

IV.8. Comparaison des contraintes (Celles du dimensionnement et celles après modélisation)

Le tableau ci-dessous nous montre l'écart entre les contraintes du dimensionnement et celles trouvées après modélisation.

Tableau 21 : Comparaison des contraintes du dimensionnement et celles après modélisation

		DIMENSIONNEMENT	MODELISATION	$f_d \leq (\sigma$ max)
		Résistance de calcul à la compression(f_d) en N/mm^2	Résistance maximale à la compression(σ max) en N/mm^2	
Briques artisanales	MODELE 1	0,576	1,050	OK
	MODELE 2	0,576	1,77	OK
	MODELE 3	0,576	1,23	OK
Briques semi-industrielles non réfractaires	MODELE 1	2,38	3,66	OK
	MODELE 2	2,38	2,51	OK
	MODELE 3	2,38	2,660	OK
Briques semi-industrielles réfractaires	MODELE 1	0,984	2,190	OK
	MODELE 2	0,984	1,450	OK
	MODELE 3	0,984	1,680	OK

Les briques semi-industrielles non réfractaires se comportent bien en compression par rapport aux briques semi-industrielles réfractaires et artisanales.

IV.9. Courbes contraintes-déformations

La déformation d'un matériau est sa capacité à perdre sa forme initiale, en diminuant ou en augmentant de volume.

Elle dépend de trois éléments à savoir :

- La forme de la pièce ;
- La nature du matériau ;
- Des processus de fabrication ou mode de fabrication : traitement thermique, traitement de la surface etc.

La relation qui relie la contrainte et la déformation est la suivante :

$\sigma=E.\varepsilon$, avec σ : Contrainte normale dans le matériau ;

E : Module d'élasticité longitudinale ;

ε : Déformation longitudinale du matériau.

Voici le résultat des courbes contraintes-déformations pour les trois types de briques testées.

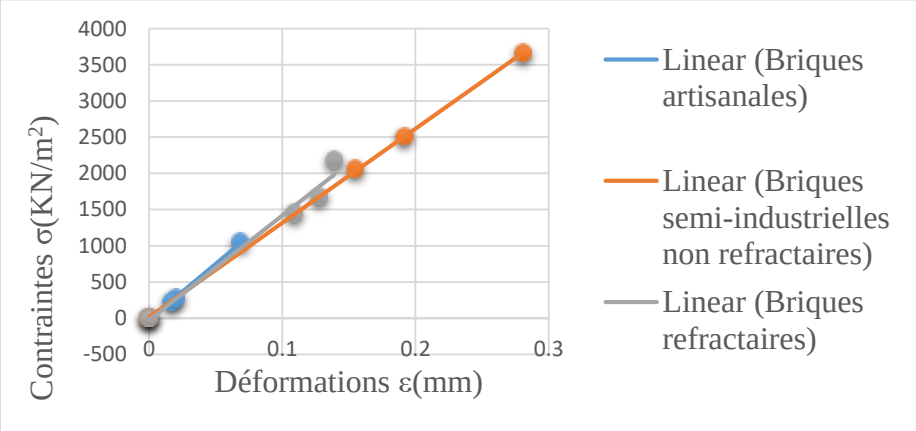


Figure 10 : Courbe contrainte-déformation de trois types de briques testées.

Les briques semi-industrielles non réfractaires montrent une grande résistance en compression car la contrainte maximale atteint une valeur de 3,66Mpa alors que les briques artisanales sont moins résistantes avec une contrainte maximale de 1,77Mpa.

Concernant les déformations, on peut dire que les briques semi-industrielles non réfractaires se déforment moins par rapport aux briques artisanales compte tenu des charges proportionnellement appliquées.

L'étude comparative des trois types de briques nous montre que les briques semi-industrielles non réfractaires présentent des caractéristiques spécifiques par rapport aux deux autres types de briques en termes d'éléments suivants :

- ✓ Dans la compression, la résistance de ces briques est très élevée > au contrainte recommandée ;
- ✓ La déformation suivant les trois axes est minime.

Après avoir combiné tous ces éléments, on peut affirmer que les briques semi-industrielles non réfractaires sont très résistantes en compression par rapport aux deux autres variétés (les briques semi-industrielles réfractaires et artisanales), avec une moyenne de 14,2Mpa pour les briques semi-industrielles non réfractaires et respectivement avec une résistance moyenne de 5,8 et 3,73Mpa.

CONCLUSION GENERALE

Vu que les matériaux locaux notamment l'argile est en abondance sur le territoire national du Burundi ; vu que le dimensionnement des ouvrages en B.A peuvent avoir les lacunes en sous dimensionnant la structure ; les briques locales bien ciblées peuvent jouer le rôle remarquable dans les murs porteurs.

Les objectifs spécifiques pour ce travail étaient :

- Identification des paramètres de résistance pour chaque type de briques (capacité d'absorption, masse volumique, contraintes et déformations) ;
- Modélisation et interprétation des résultats des modèles testés.

Pour aboutir à ces différents objectifs, on a commencé par la revue de la littérature sur le chapitre I, étude expérimentale sur le chapitre II et la modélisation et interprétation des résultats à l'aide du logiciel LIRA au niveau du chapitre III ainsi que la conclusion générale.

Dans l'étude expérimentale, tous les essais qui ont été faits montrent que les briques semi-industrielles non réfractaires présentent de bon comportement avec une résistance moyenne de 14,2Mpa comparativement aux briques semi-industrielles réfractaires et artisanales respectives de 5,8 et 3,73Mpa.

Ainsi, la modélisation montre le même cas compte tenu des contraintes et des déformations obtenues malgré que les contraintes dans les murets sont inférieures aux contraintes dans les briques testées à part. Cela est dû à l'influence du mortier.

RECOMMANDATIONS

Après avoir rencontré les contraintes liées à la documentation dans ce parcours de rédaction de ce projet de fin d'études, nous adressons les recommandations aux personnes et aux institutions suivantes :

- Au gouvernement :

✓ De mettre un centre de recherche perfectionné et équipé dans la recherche des matériaux locaux notamment les briques cuites ;

- A l'Université du Burundi :

✓ D'enrichir les bibliothèques de l'université surtout les littératures concernant la maçonnerie, le comportement et les structures en maçonnerie et améliorer les conditions d'accès à la documentation dans les bibliothèques ;

✓ Réparer les appareils dans les laboratoires et les équiper de façon moderne ;

✓ Augmenter le temps pour les travaux de fin d'études.

- Aux étudiants :

✓ De continuer des recherches sur les briques cuites locales.

BIBLIOGRAPHIE

[1] EN 1996 1-1, « Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie-Partie 1-1 : Règles communes pour ouvrages en maçonnerie armée et non armé », avril 2004.

[2] M. Lateb, « Calcul de la capacité portante des murs en maçonnerie de petits sous charges verticales » Mécanique des structures [physics.class-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.Francais. Pastel-0059146.

[3] Terre cuite et Constructions, quarante et deuxième année 2011.

[4] E. Allen and J. lano, Fundamentals of building construction materials and methods.2003. Cité par BOLDIREFF.

[5] P.M.J. KABORE, « Etudes expérimentales du comportement mécanique sous charge verticales des maçonneries en blocs de latérite taillée (blt) de la province de Dano ». Mémoire master, Institut International d'Ingénierie, Burkina Faso, 2018.

[6] Projet brique cuite(Rwanda) (CRDI 3-P-89-1007).

[7] Site internet https://WWW.GCAlgerie.com/

[8] Gonzalez-Vinas, W. & Mancini, HL (2004). Une introduction à la science des matériaux. Presse universitaire de Princeton. ISBN 978-0-691-07097-1.

[9] Jacques LACHNITT, Les matériaux réfractaires, Que sais-je ? Presses Universitaires de France, Paris, 1983.

[10] Eurocode. (2005a). Eurocode 6-Design of Masonry Structures. Brussels : European committee for standardization.

[11] Jonathan TOURAILLE, « caractérisation expérimentale de la résistance latérale des murs de briques traditionnelle pour l'analyse de la fragilité ». Mémoire Master, Ecole de Technologie Supérieur, Montréal 2019.

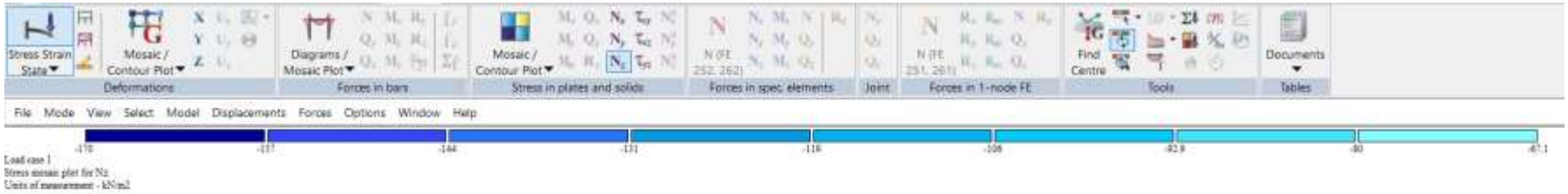
[12] M. Ahmed Sridi, « Modélisation thermomécanique et numérique du comportement de maçonneries en briques alvéolées en terre cuite sous chargements mécaniques et thermiques sévères. » Thèse doctorale, UNIVERSITE PARIS-SACLAY PREPAREE A CENTRALESUPELEC, Gif-sur-Yvette, Avril 2018.

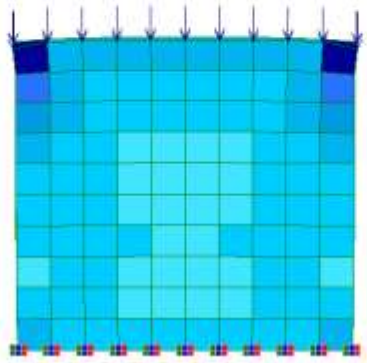
[13] https://www.researchgate.net/publication/48270685.

ANNEXES

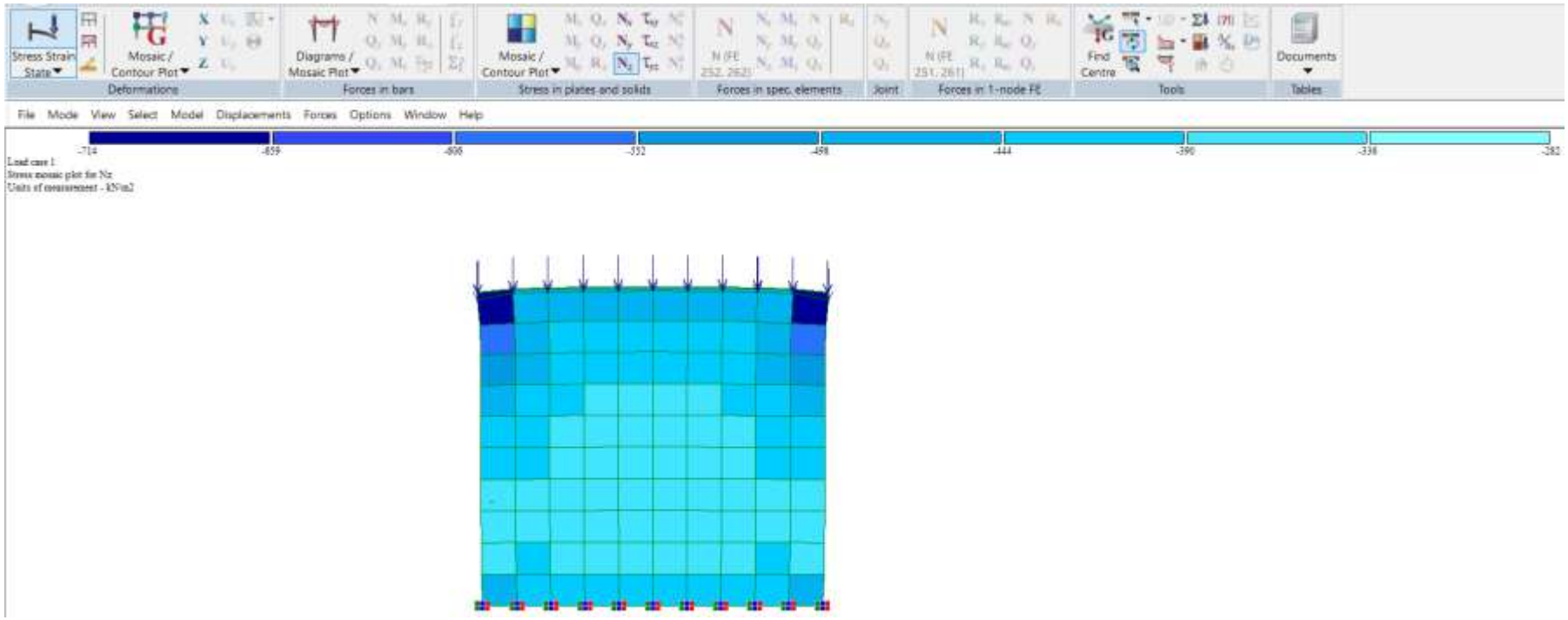
Comparaison des contraintes des murs dimensionnés

Annexe 1 : Briques artisanales

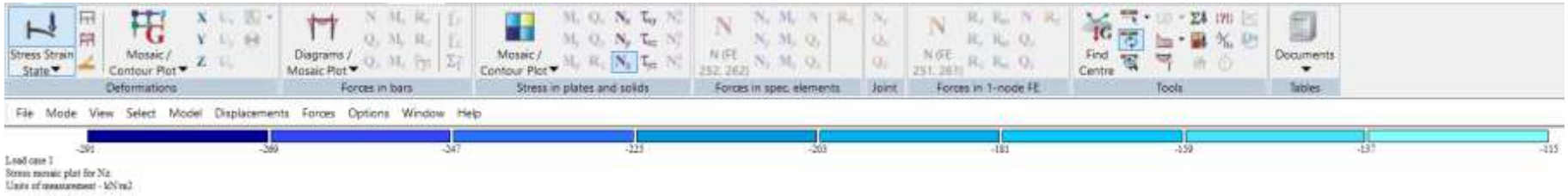


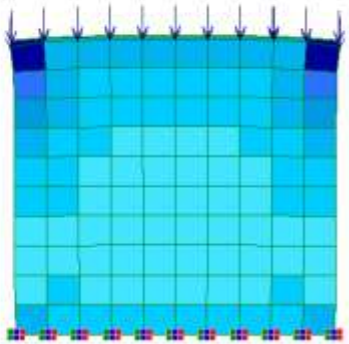


Annexe 2 : Briques semi-industrielles non réfractaires



Annexe 3 : Briques semi-industrielles réfractaires

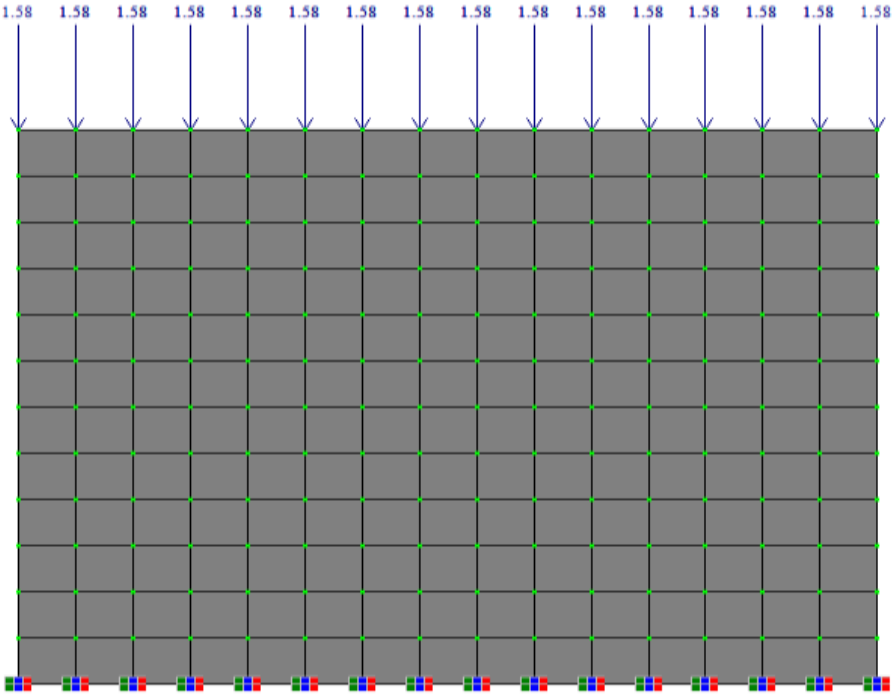




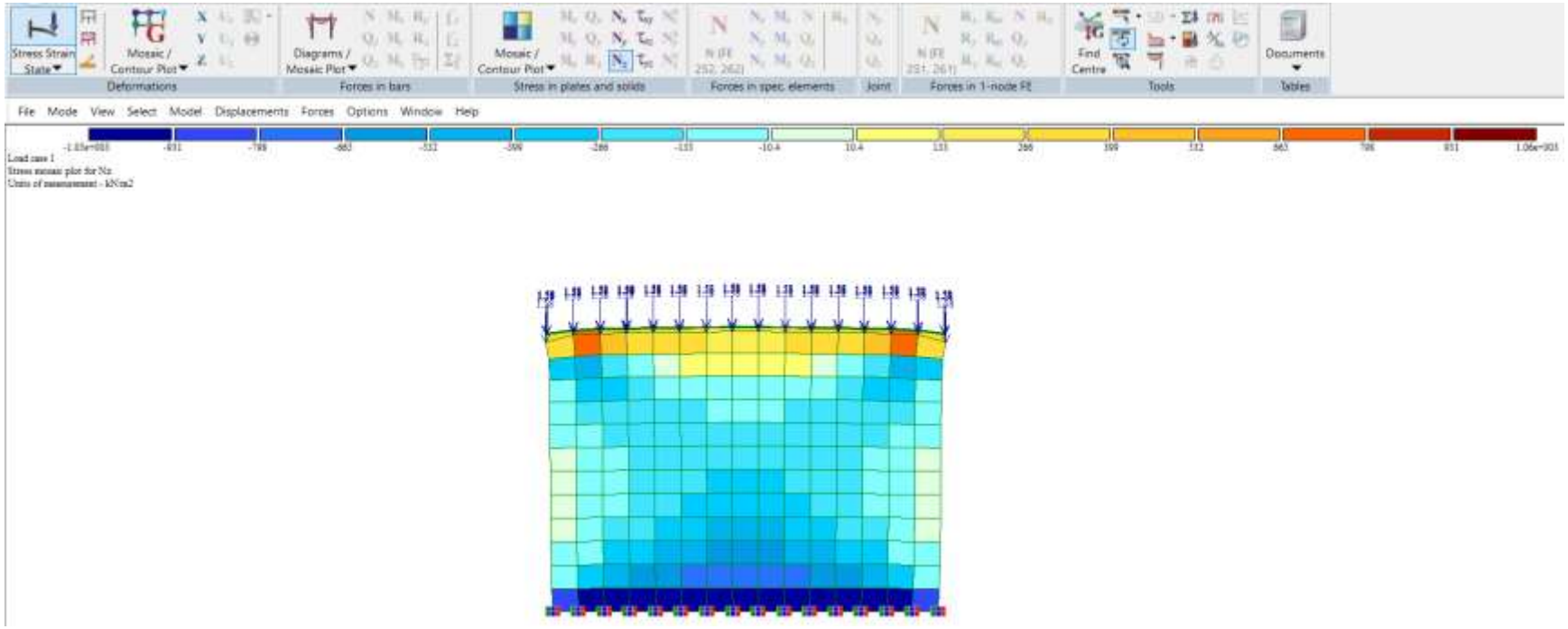
Modélisations des murets maçonnés

a) Briques artisanales

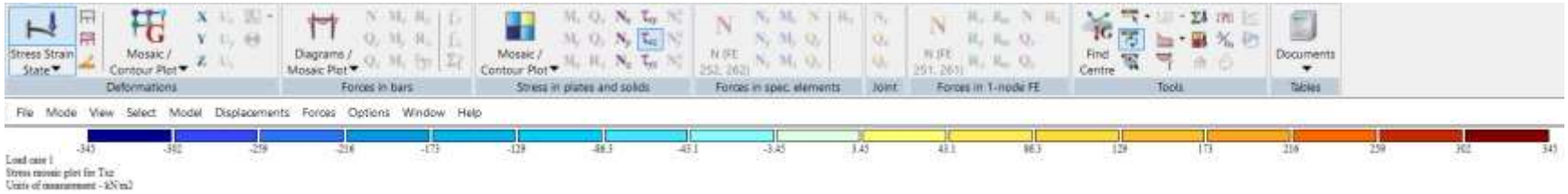
Annexe 4 : Modèle 1 avant déformation

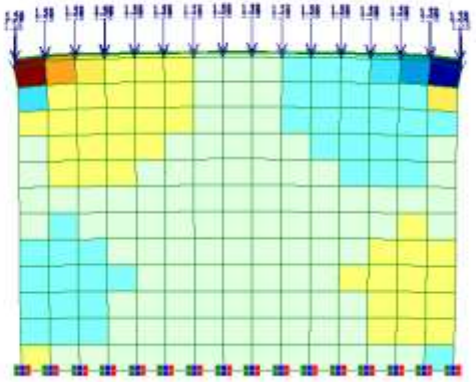


Annexe 5 : Contrainte normale maximale suivant Z

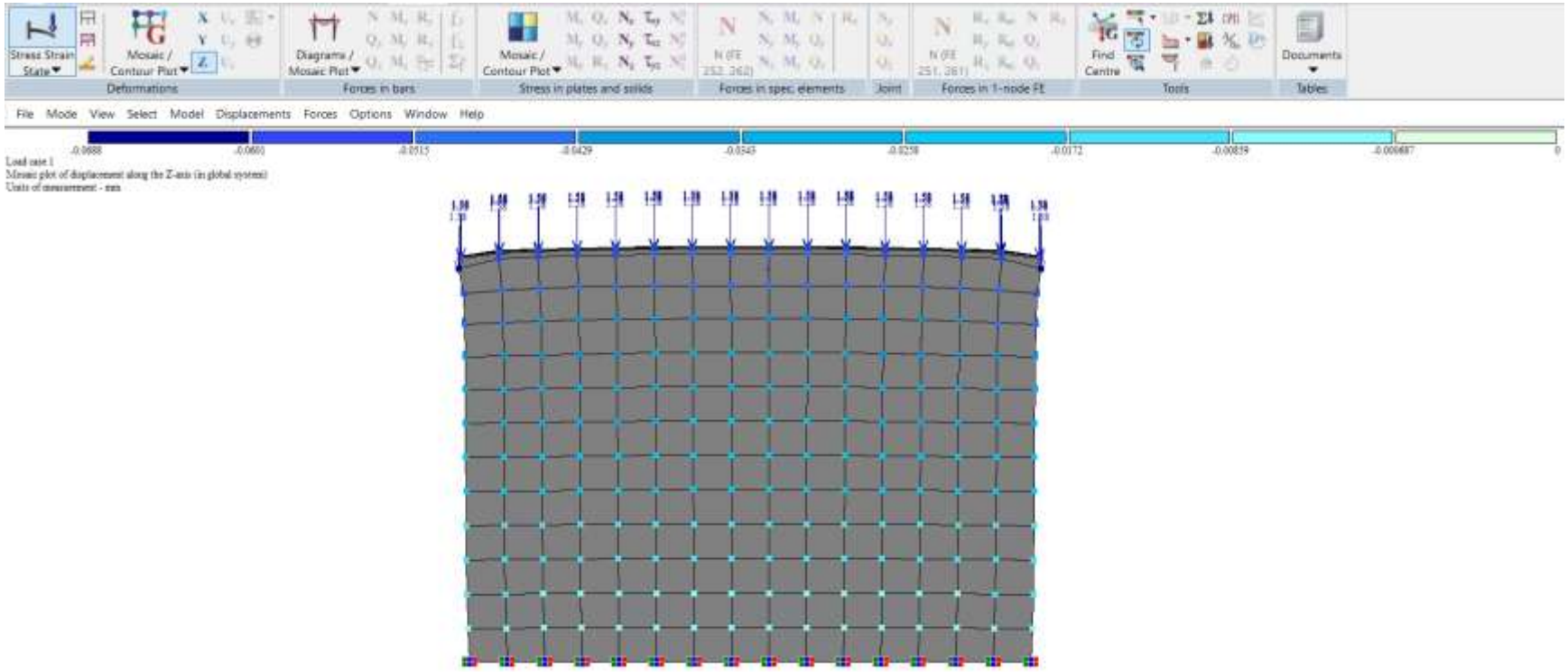


Annexe 6 : Contrainte tangentielle maximale XZ

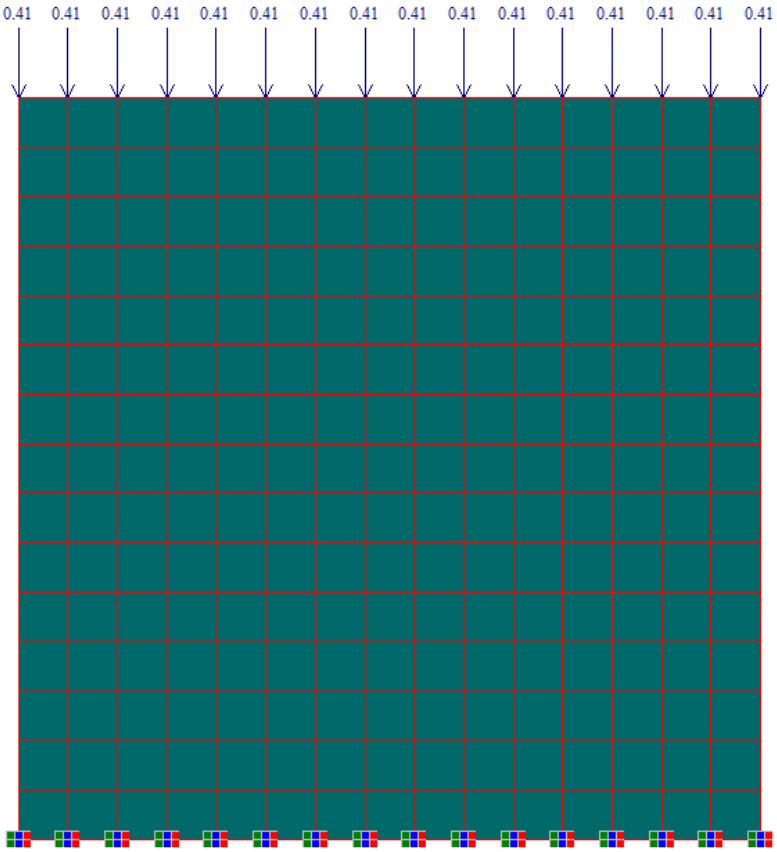




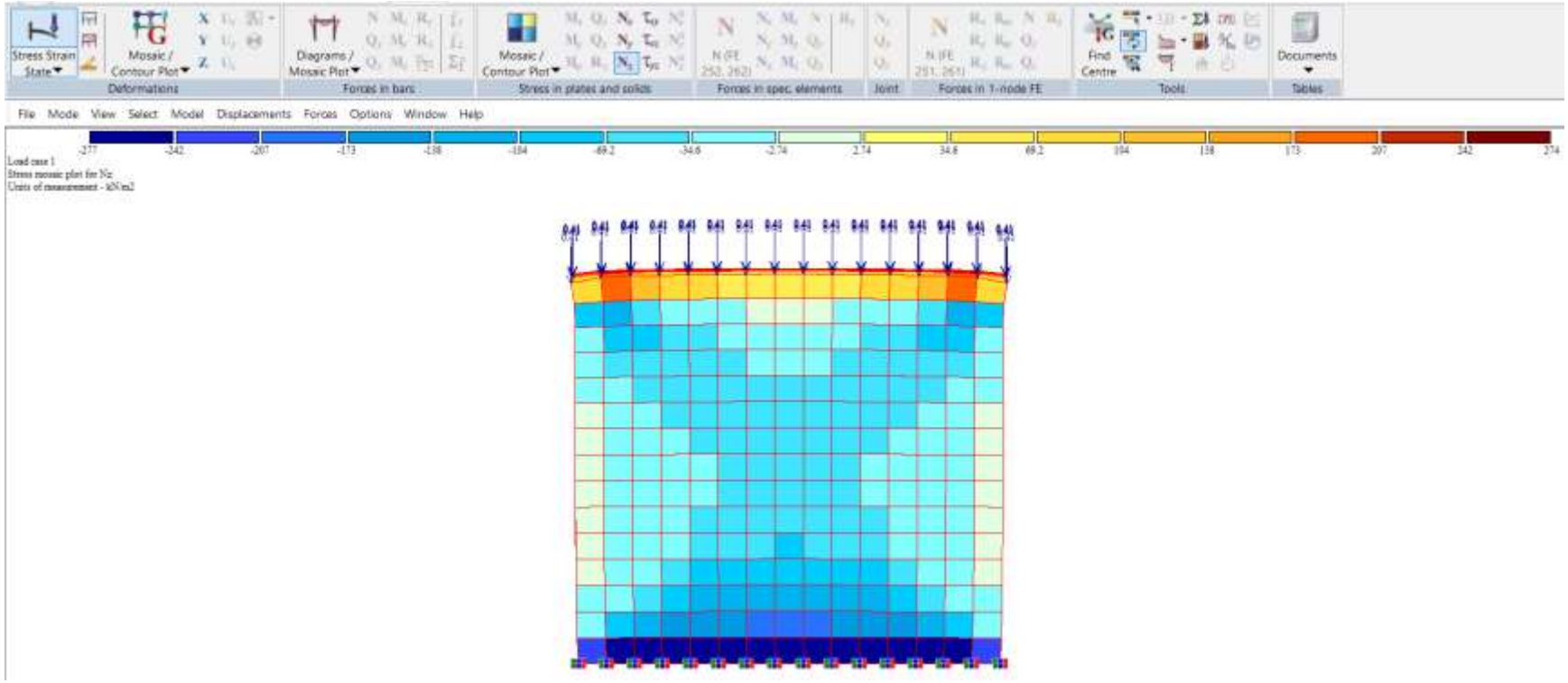
Annexe 7 : Déplacement maximal suivant Z



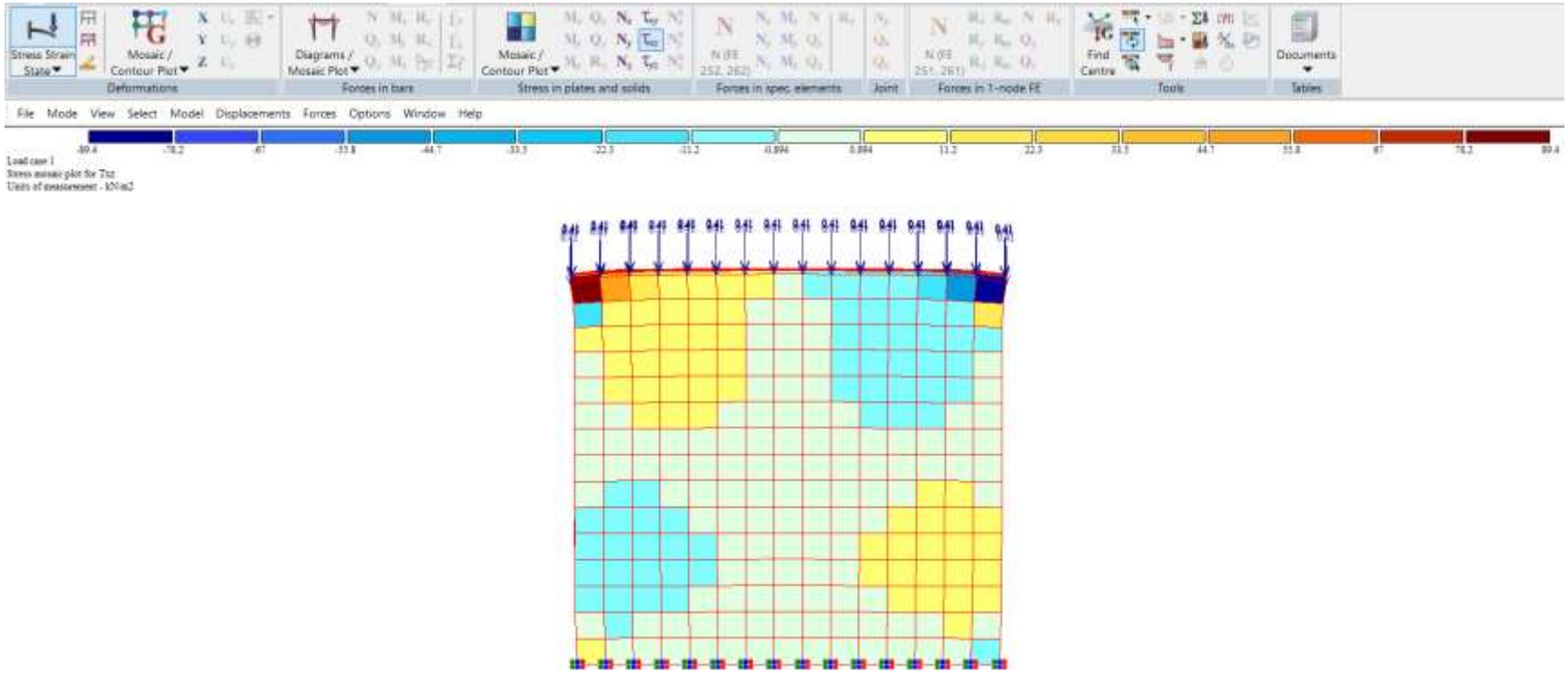
Annexe 8 : Modèle 2 avant déformation



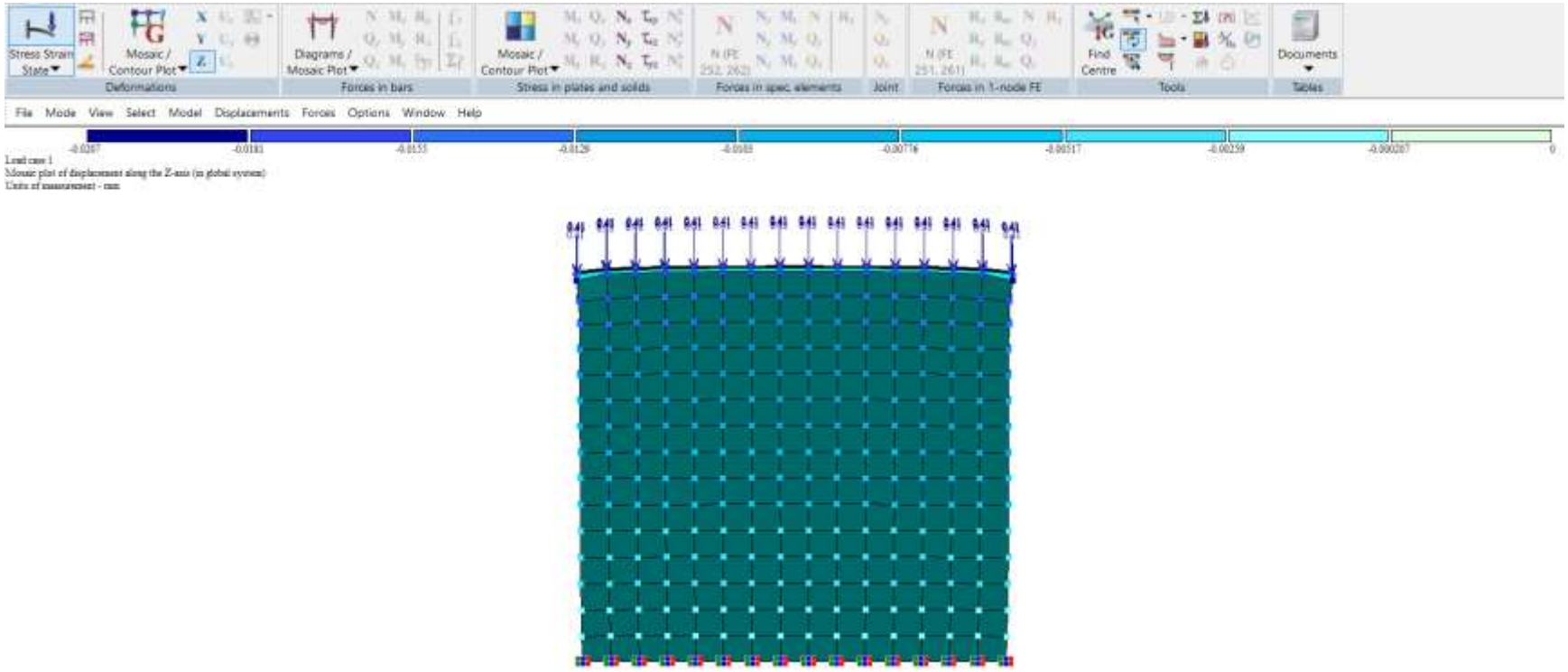
Annexe 9 : Contrainte normale maximale suivant Z



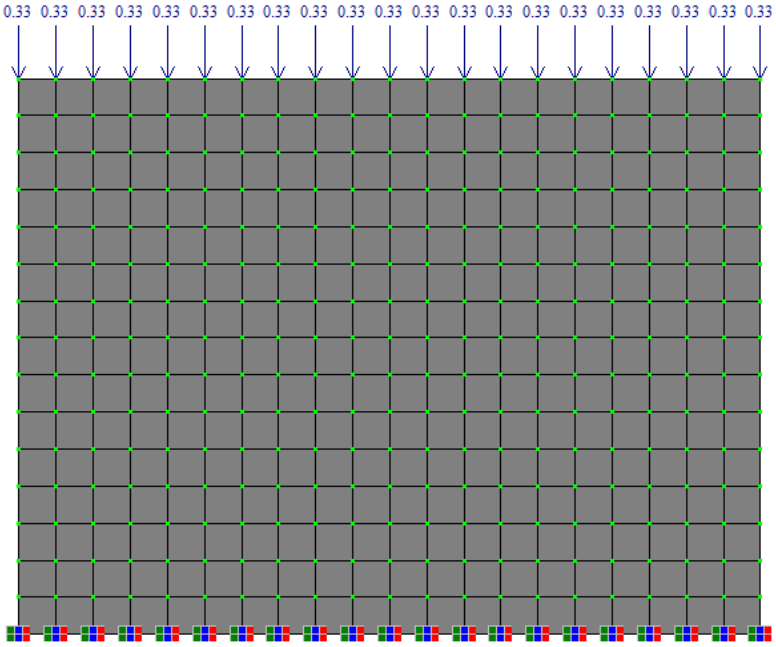
Annexe 10 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



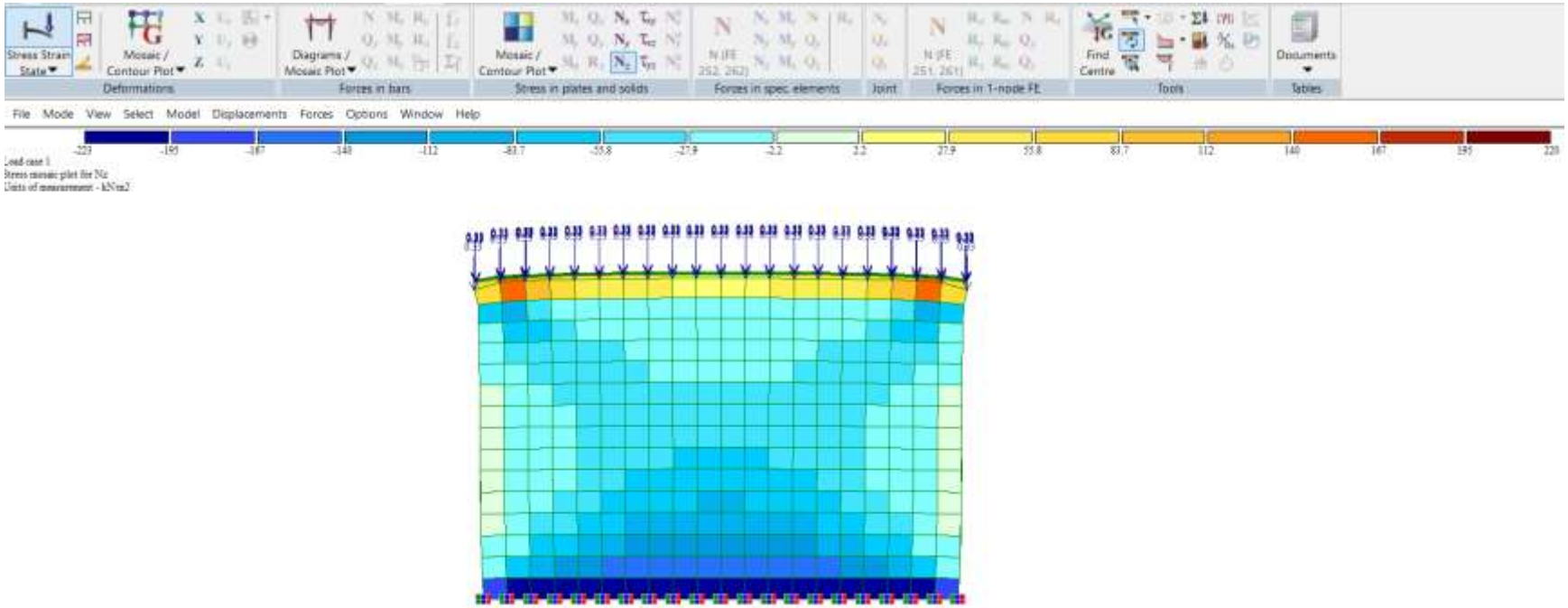
Annexe 11 : Déplacement maximal suivant Z



Annexe 12 : Modèle 3 avant déformation

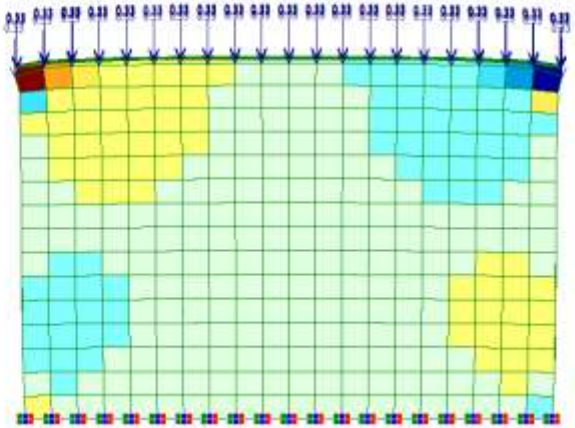


Annexe 13 : Contrainte normale maximale suivant Z

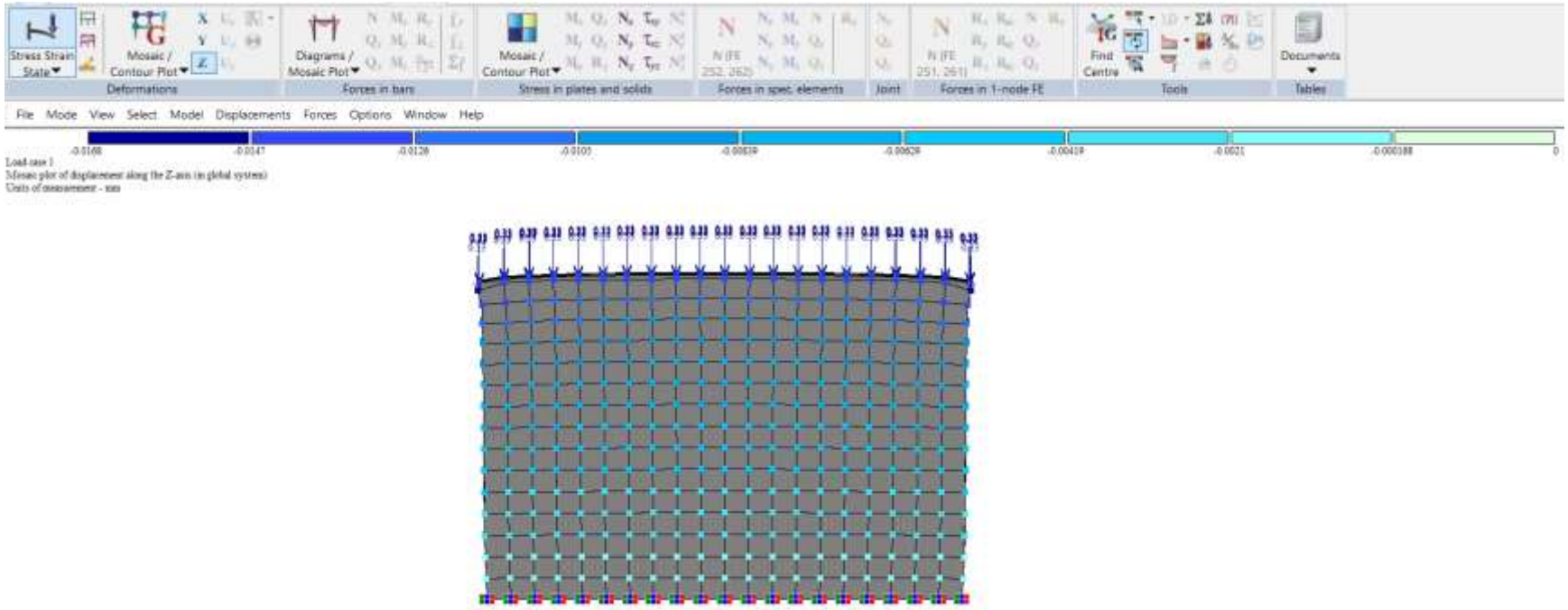


Annexe 14 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



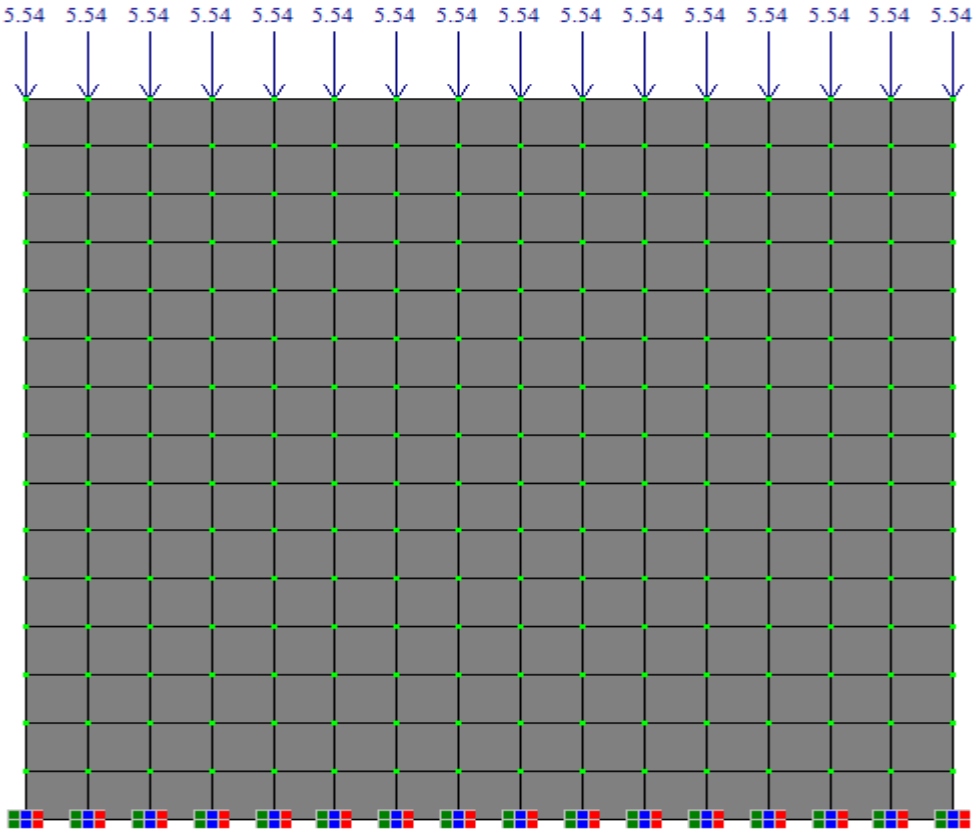


Annexe 15 : Déplacement maximal suivant Z

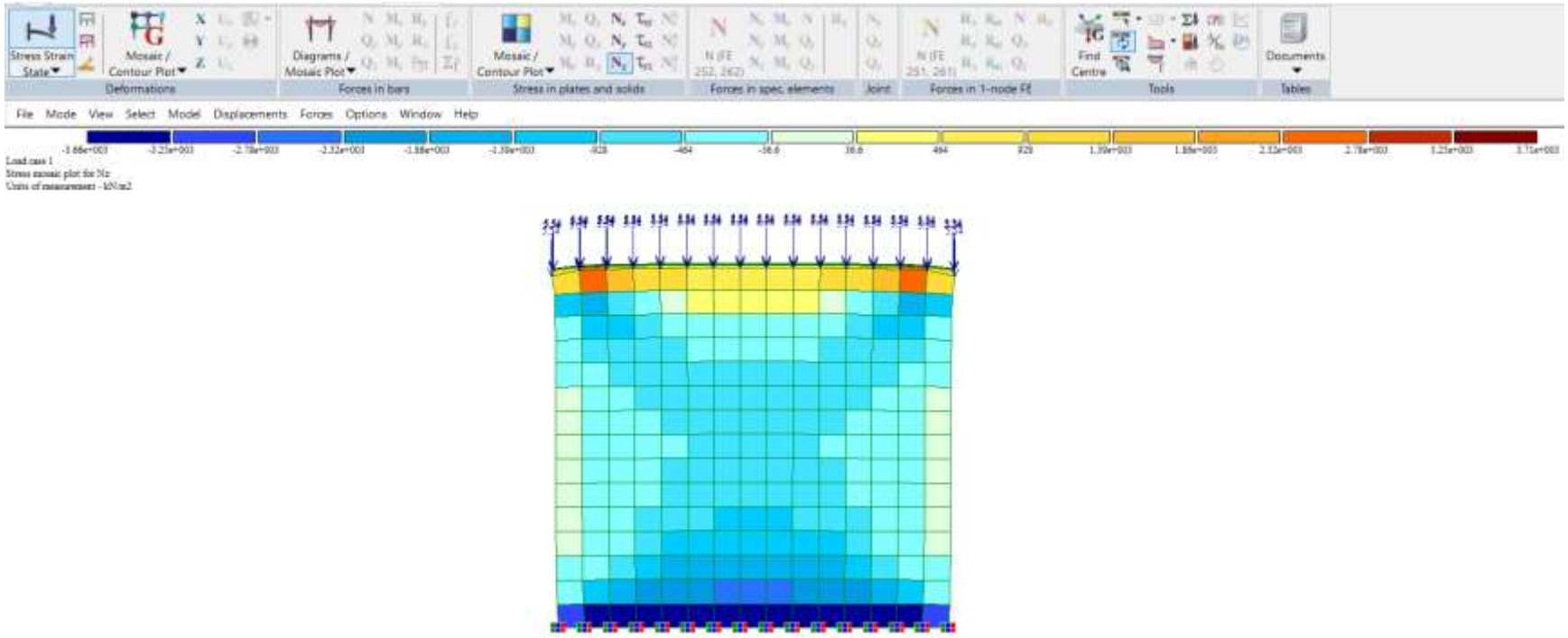


b) Briques semi-industrielles non réfractaires

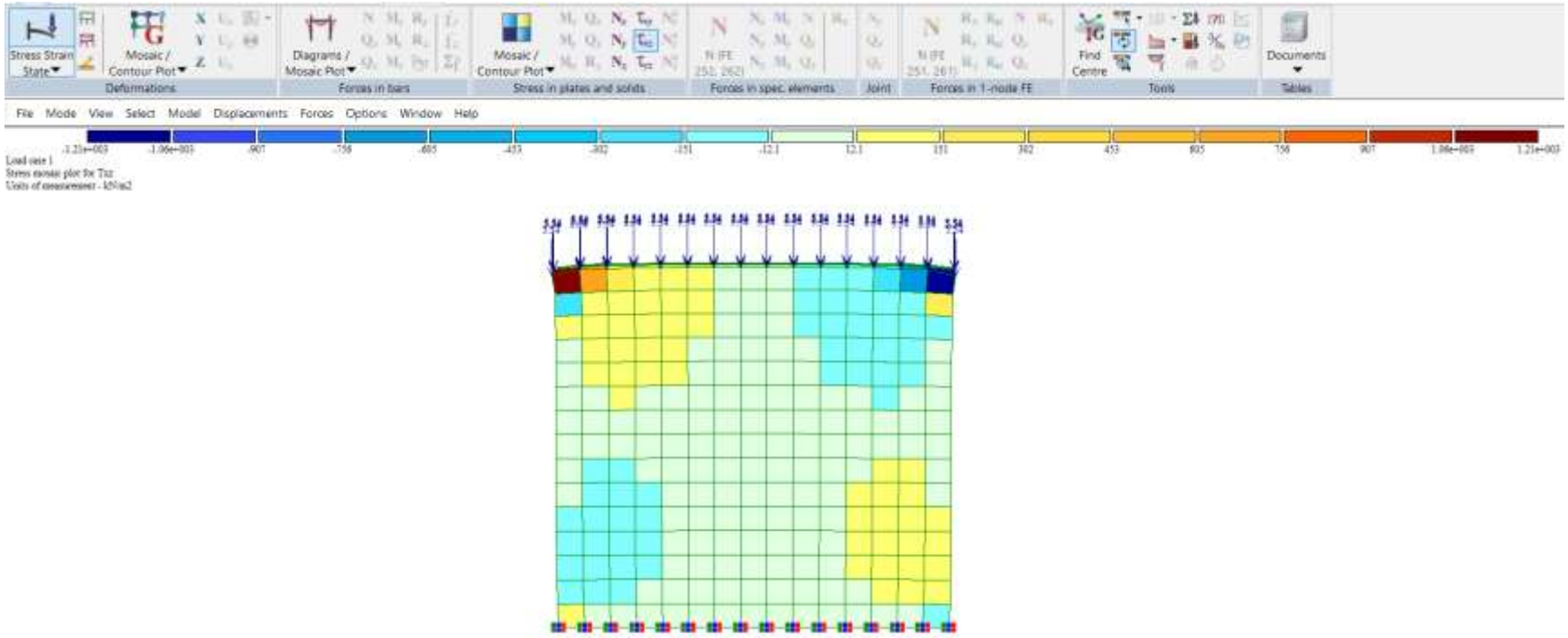
Annexe 16 : Modèle 1 avant déformation



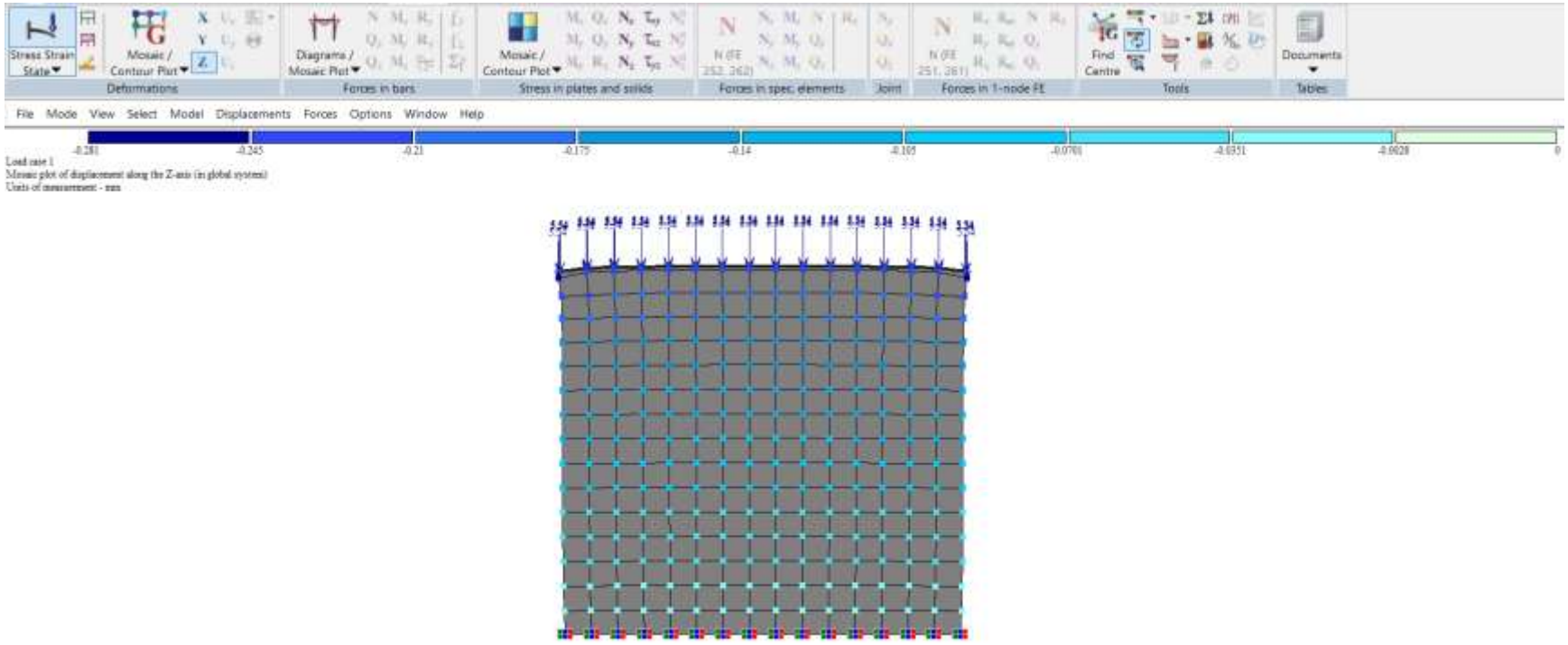
Annexe 17 : Contrainte normale suivant Z



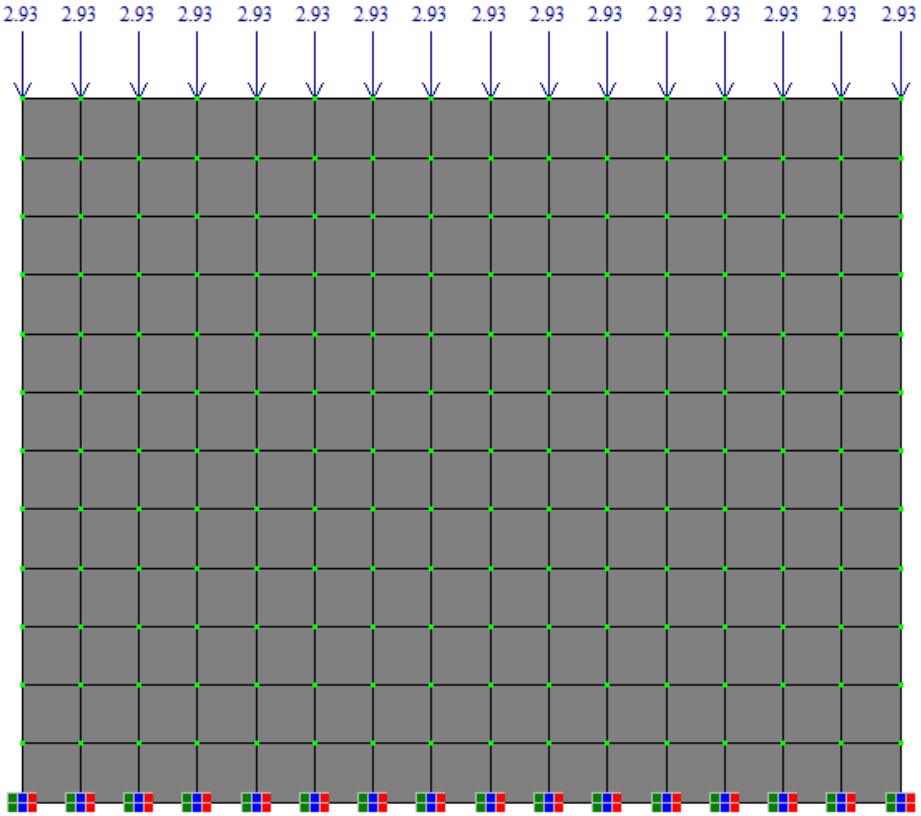
Annexe 18 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



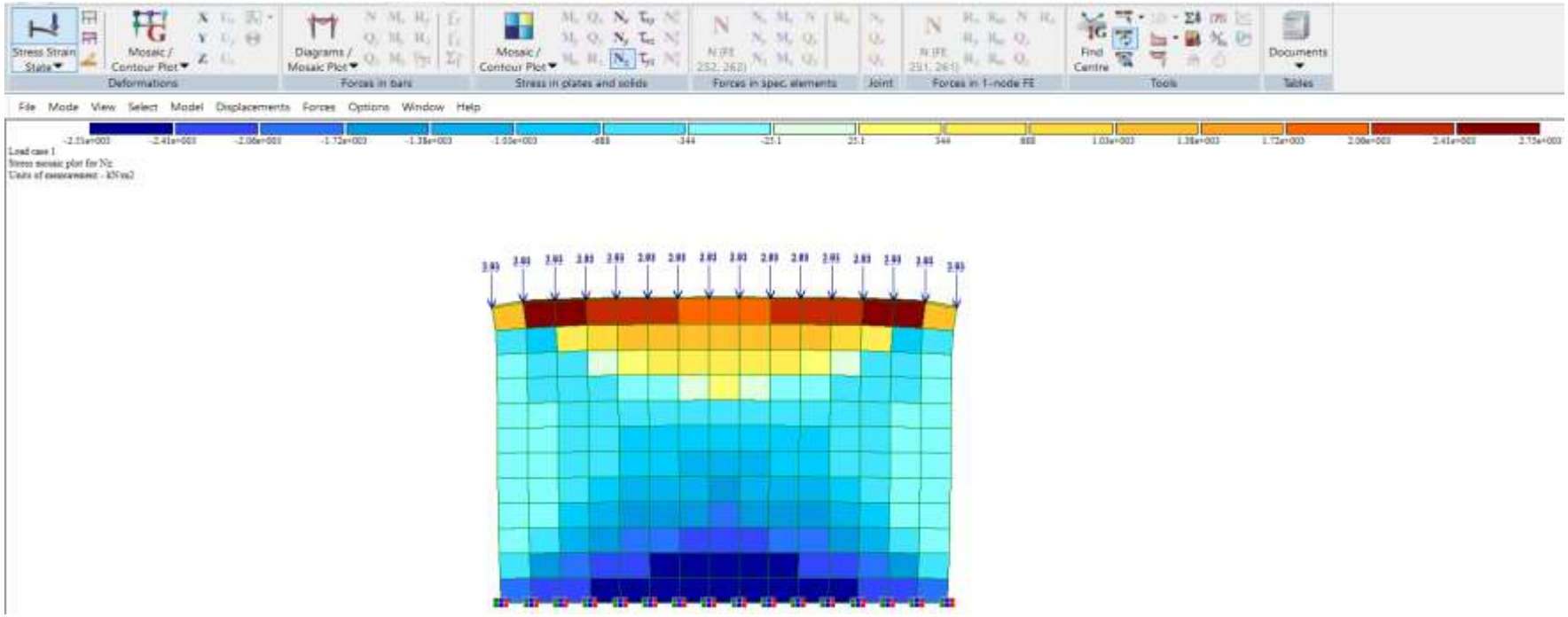
Annexe 19 : Déplacement maximal suivant Z



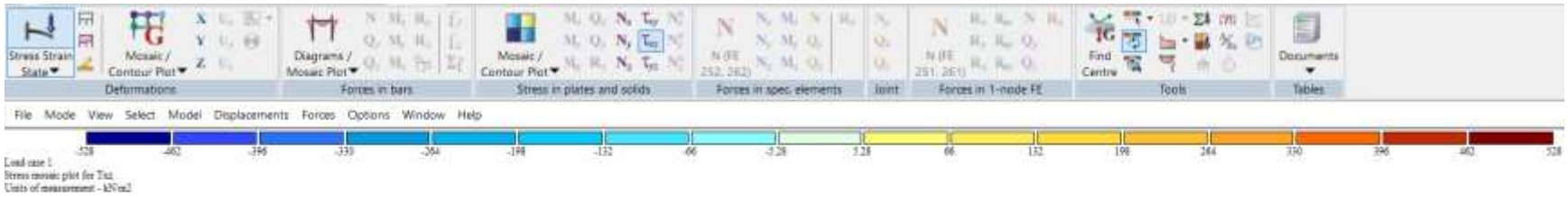
Annexe 20 : Modèle 2 avant déformation

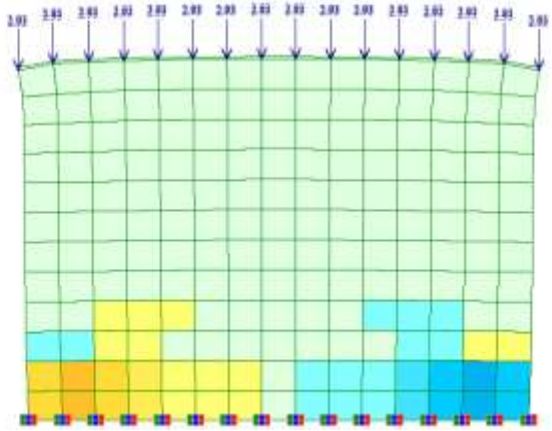


Annexe 21 : Contrainte normale maximale suivant Z

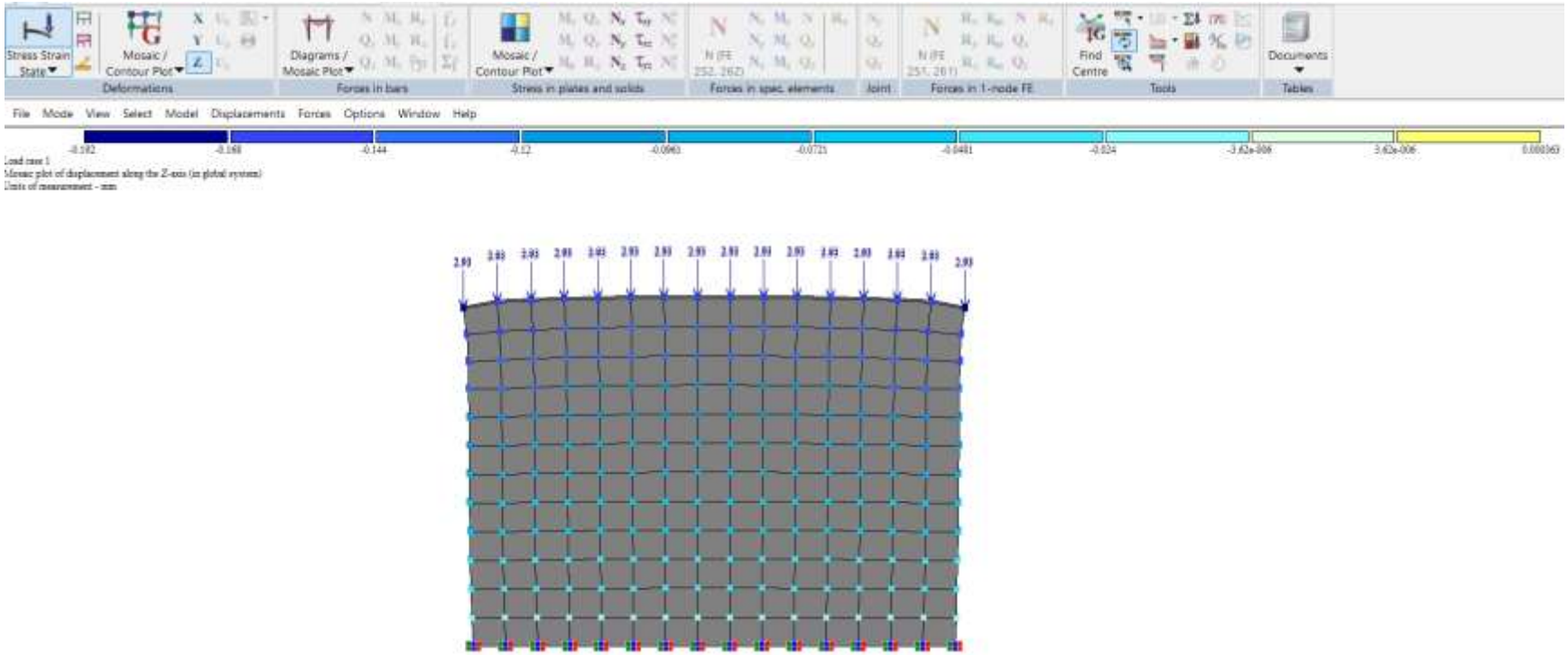


Annexe 22 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ

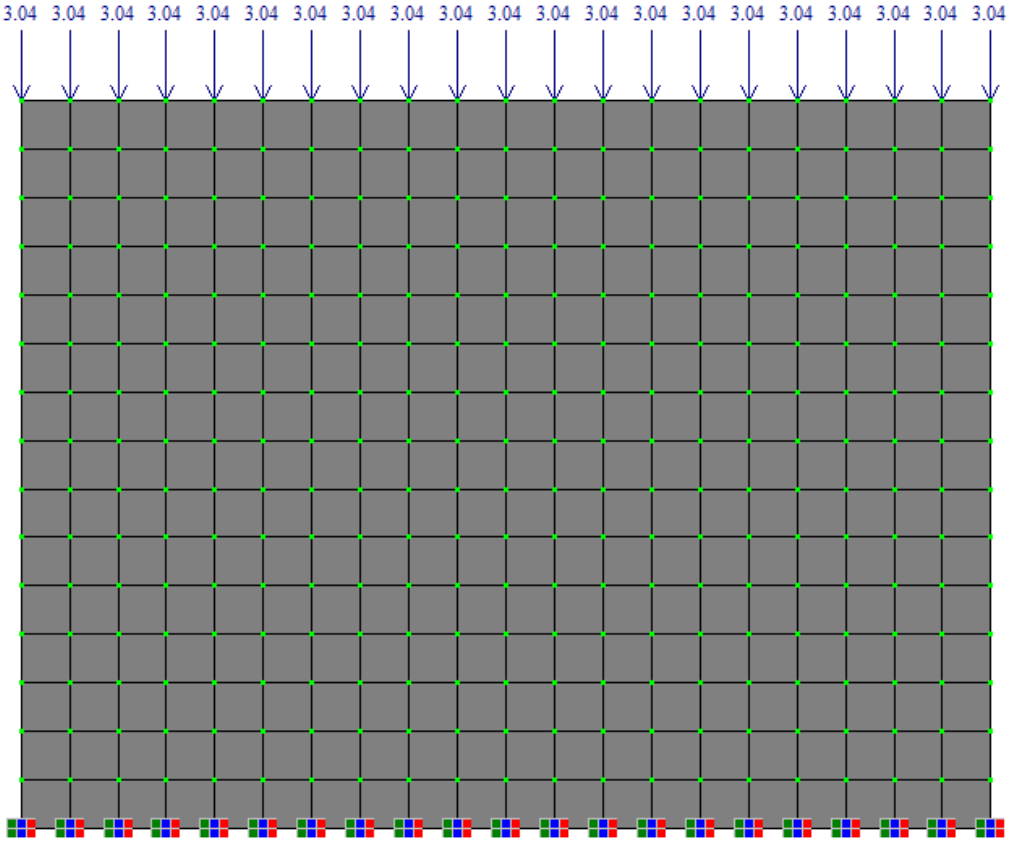




Annexe 23 : Déplacement maximal suivant Z

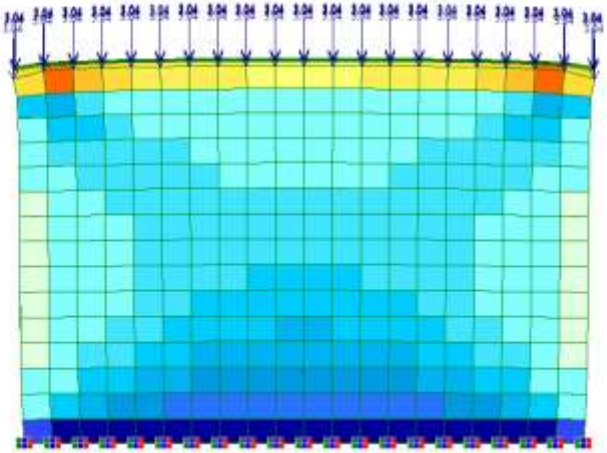


Annexe 24 : Modèle 3 avant déformation

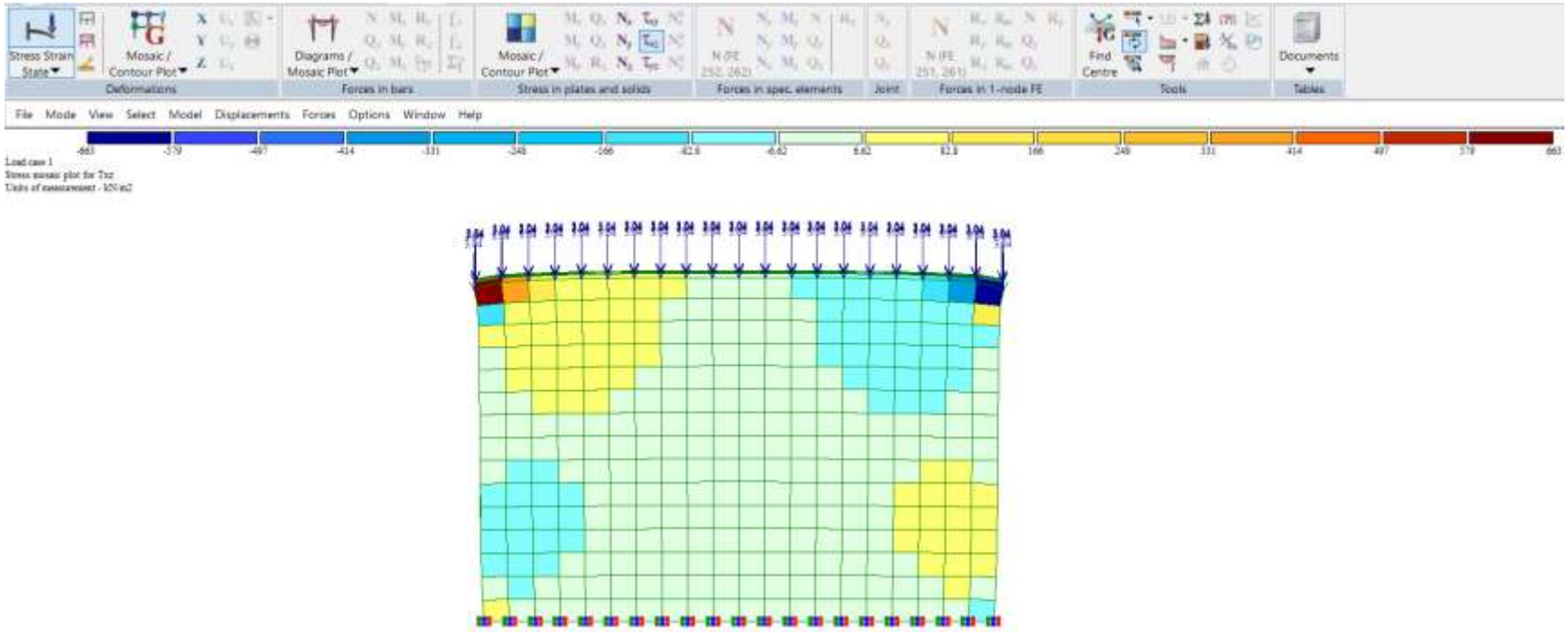


Annexe 25 : Contrainte normale maximale suivant Z

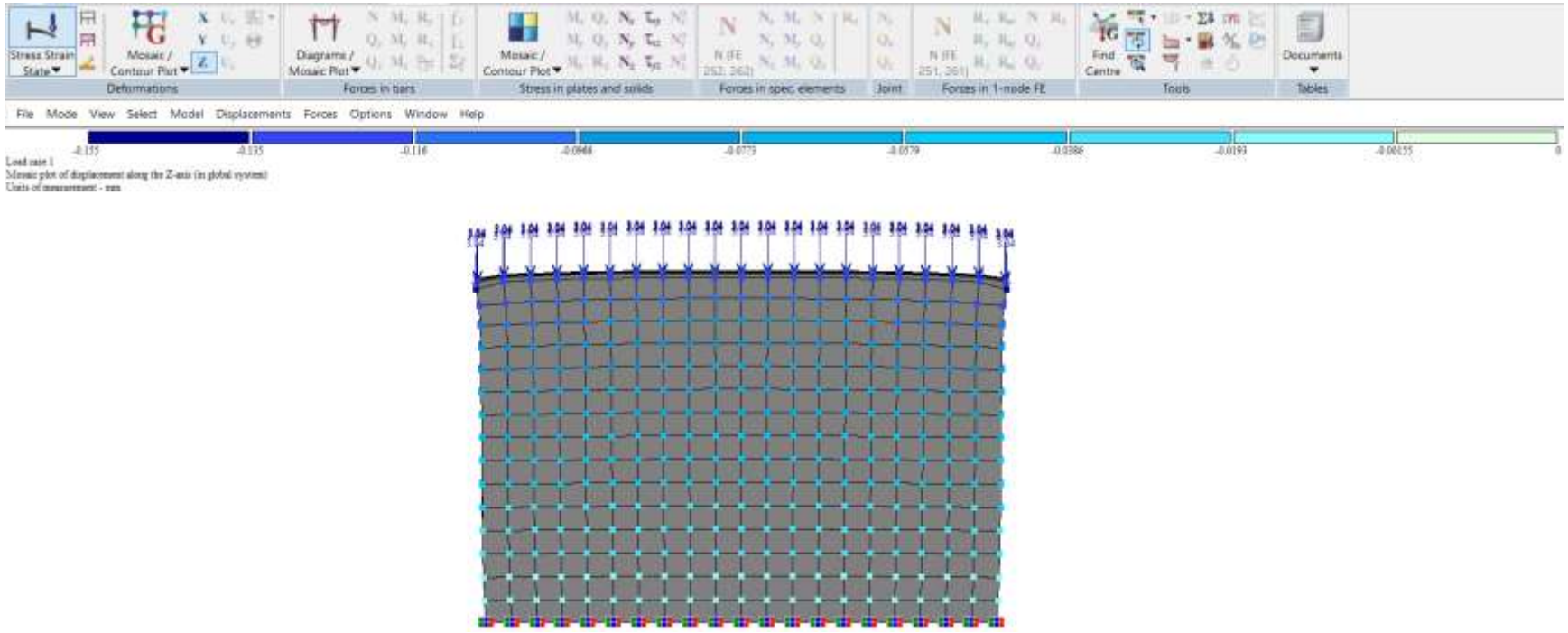




Annexe 26 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ

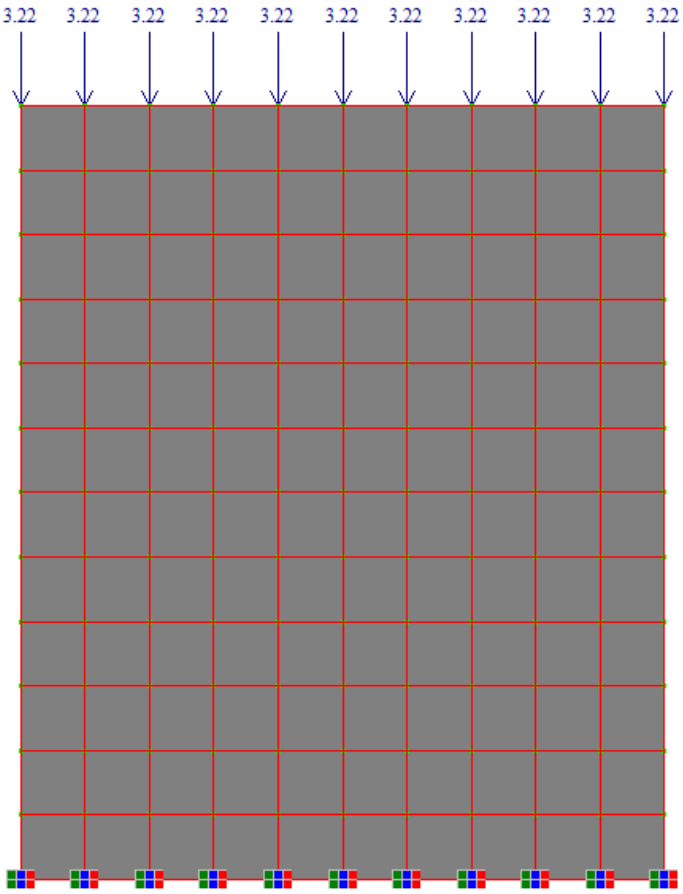


Annexe 27 : Déplacement maximal suivant Z

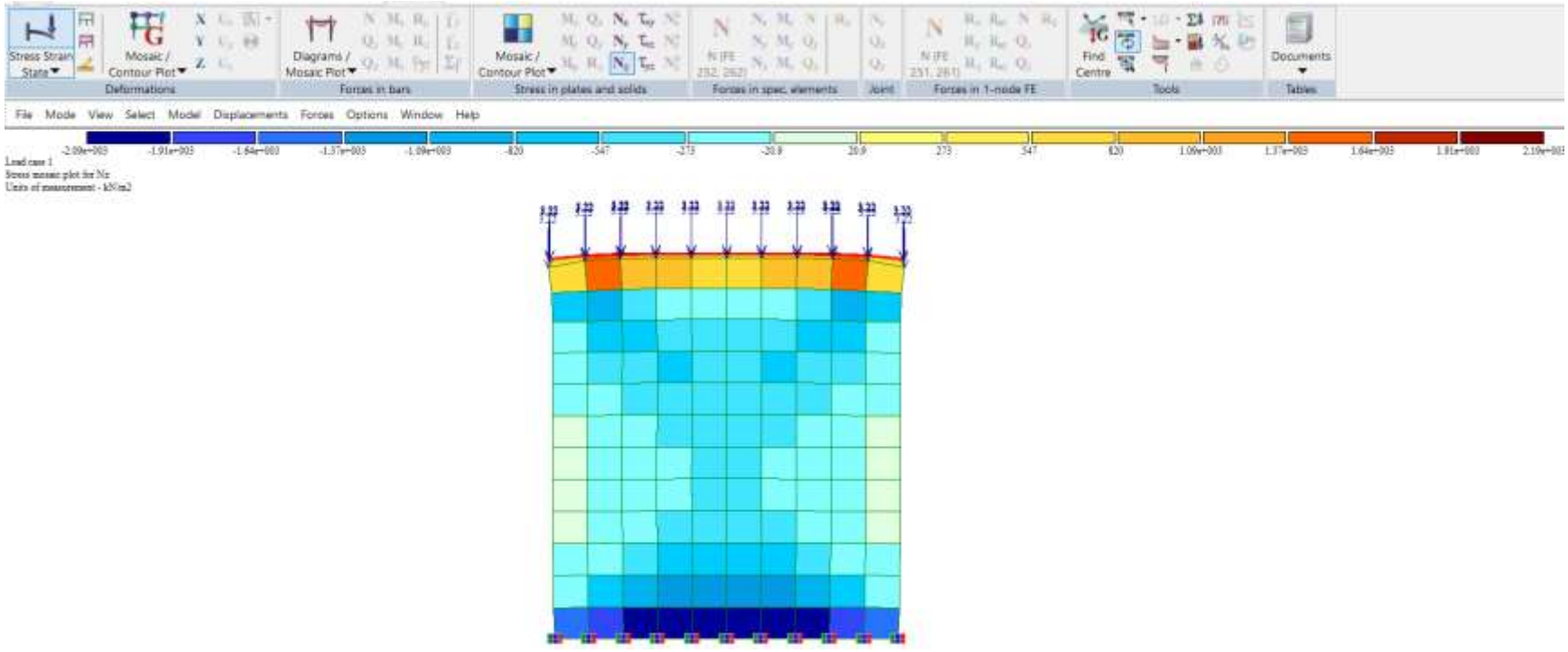


c) Briques semi-industrielles réfractaires

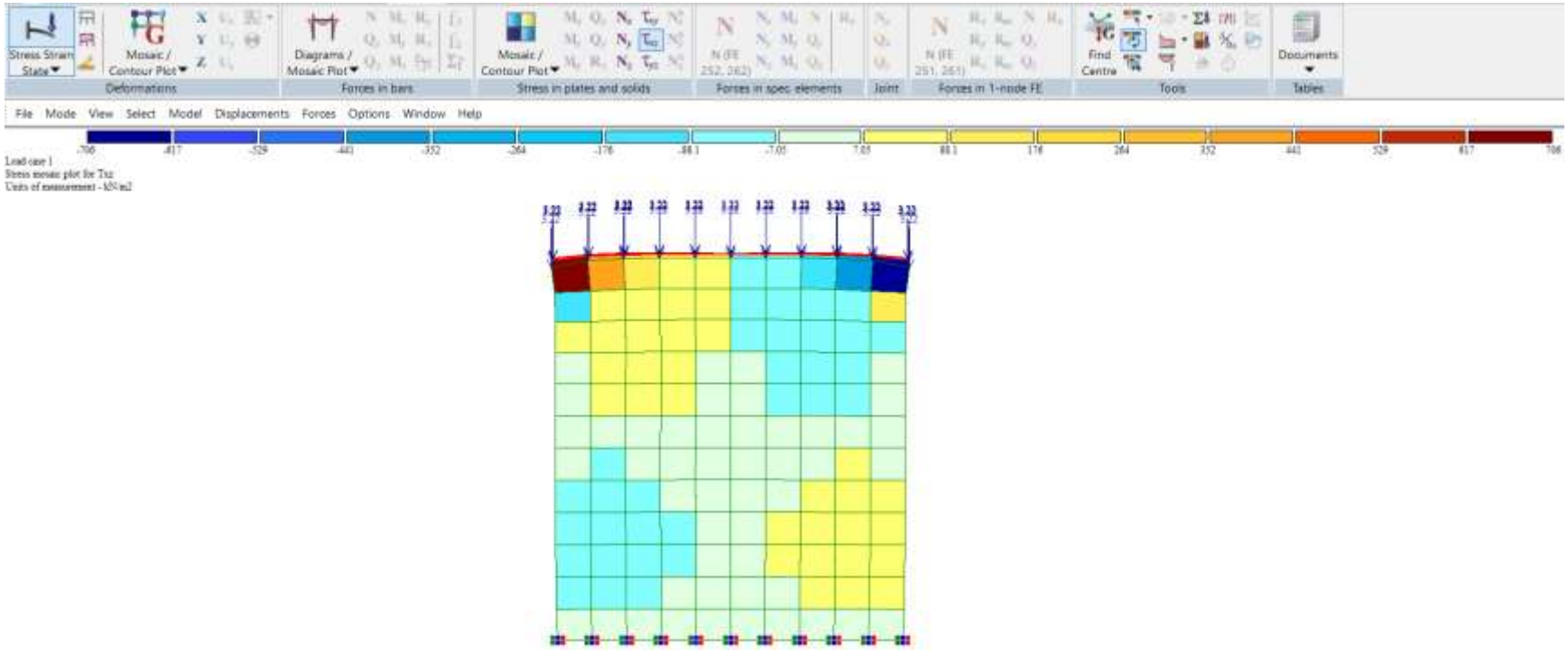
Annexe 28 : Modèle 1 avant déformation



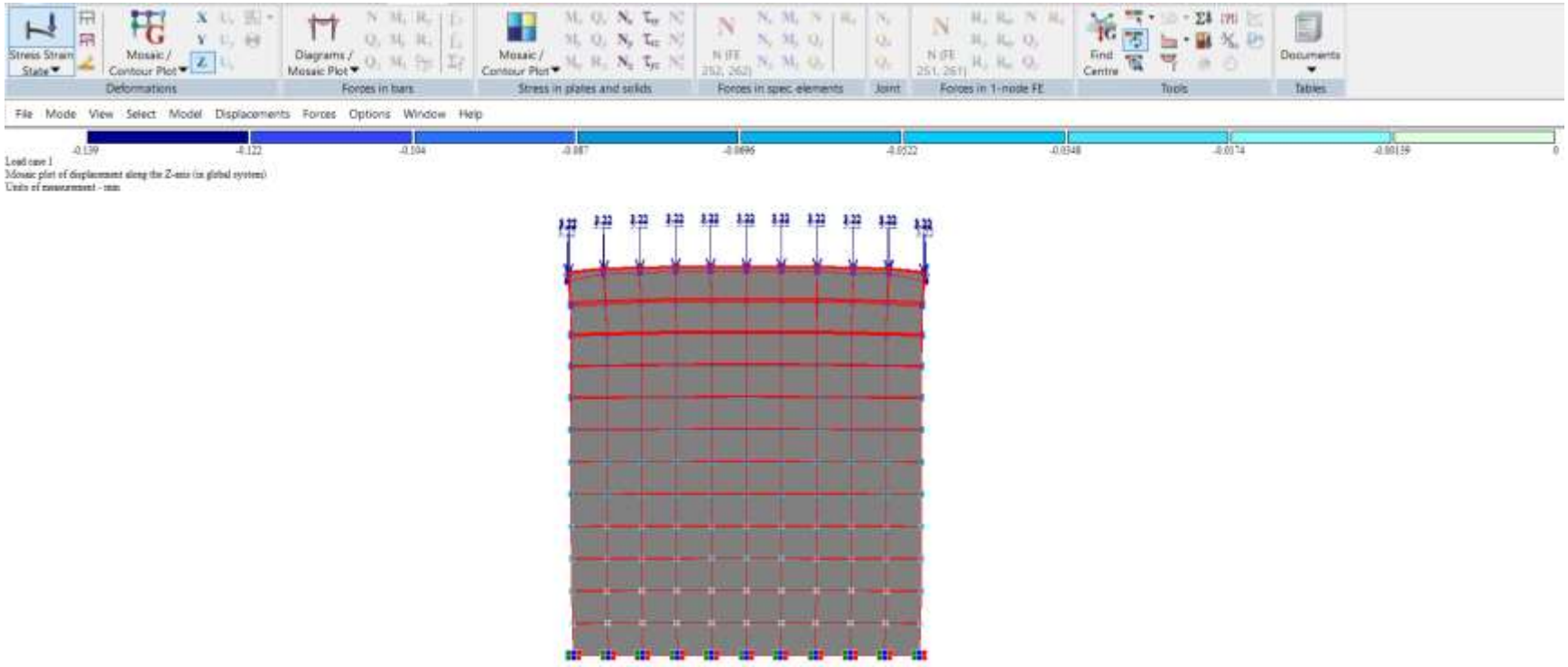
Annexe 29 : Contrainte normale maximale suivant Z



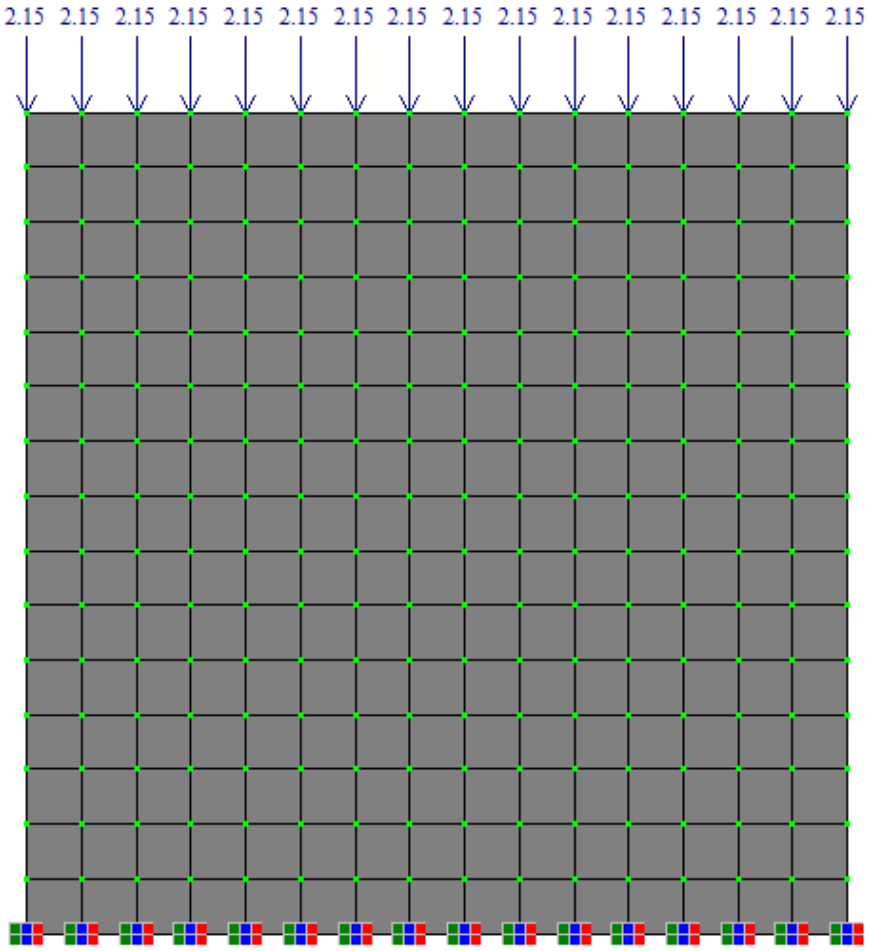
Annexe 30 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



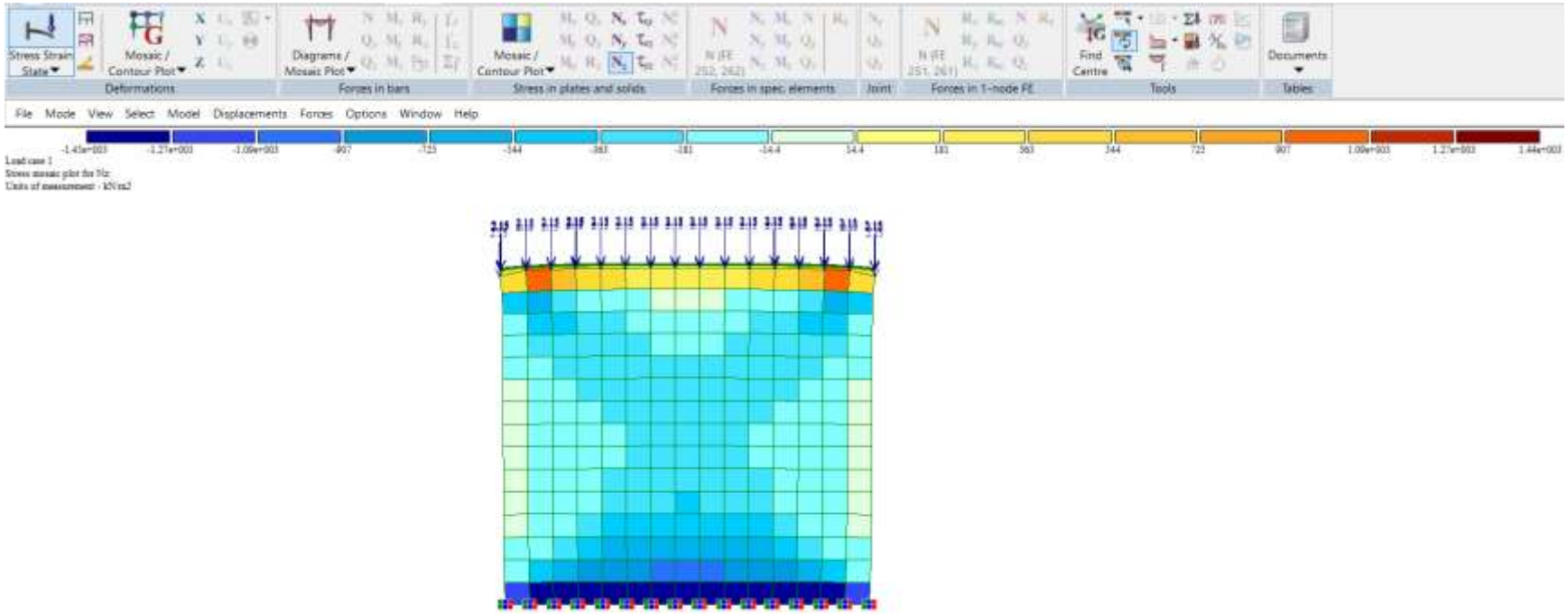
Annexe 31 : Déplacement maximal suivant Z



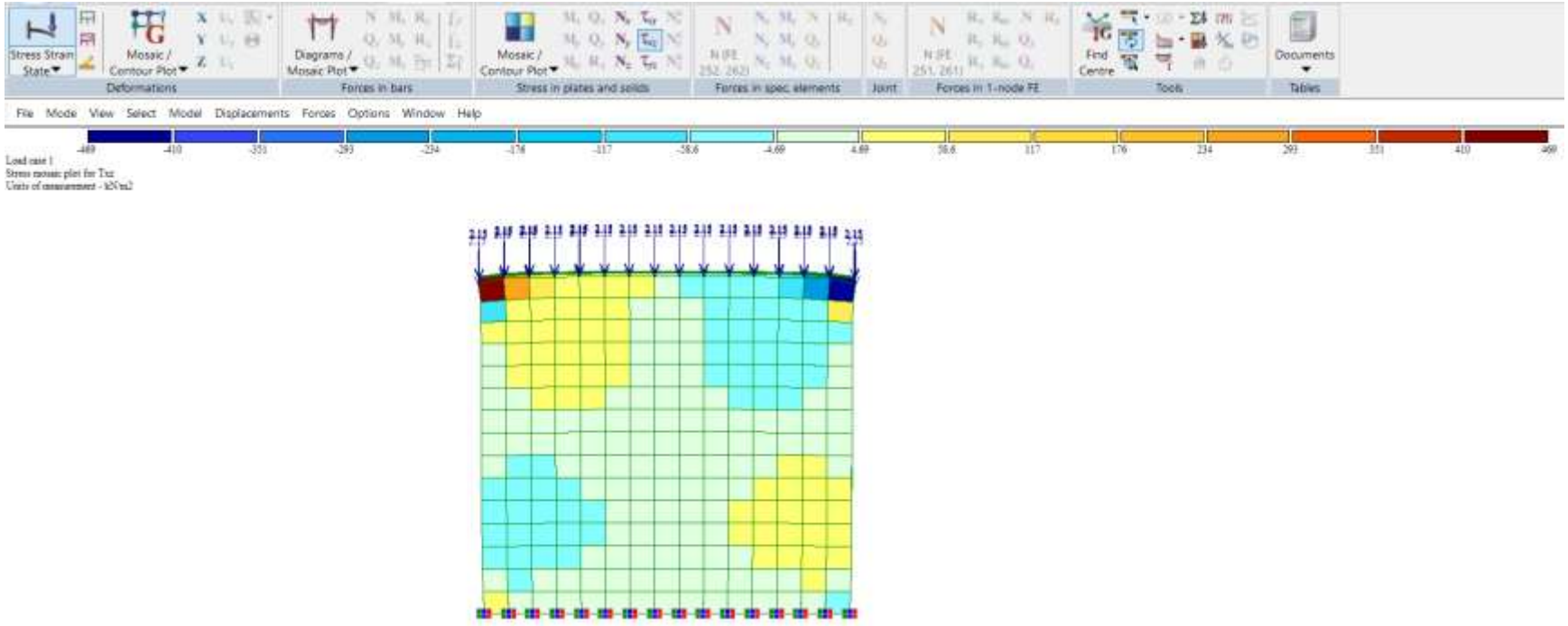
Annexe 32 : Modèle 2 avant déformation



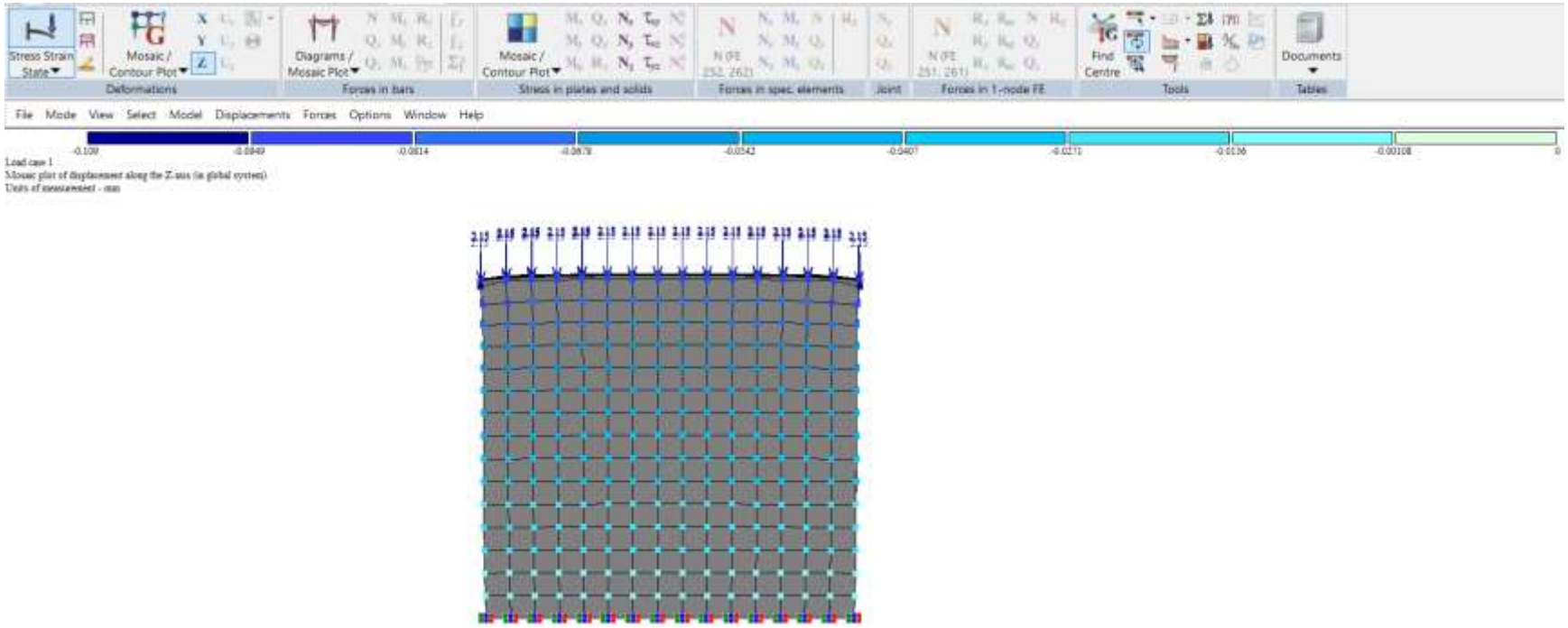
Annexe 33 : Contrainte normale maximale suivant Z



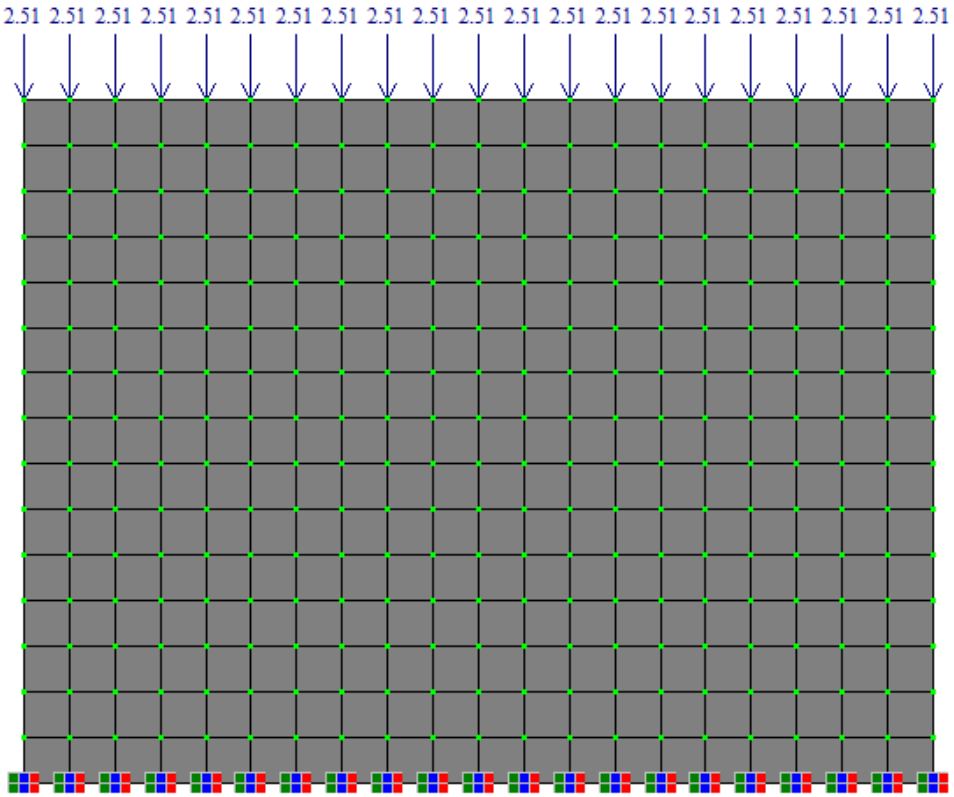
Annexe 34 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



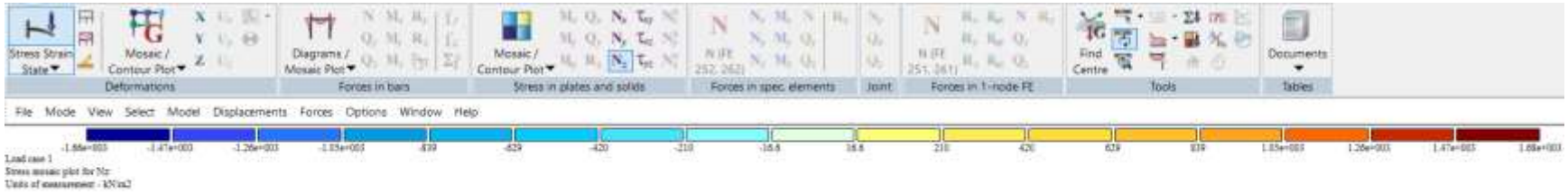
Annexe 35 : Déplacement maximal suivant Z

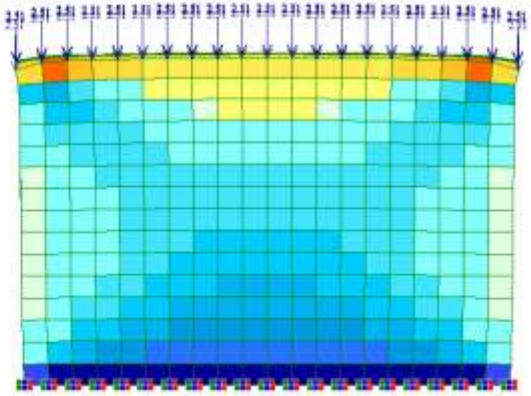


Annexe 36 : Modèle 3 avant déformation

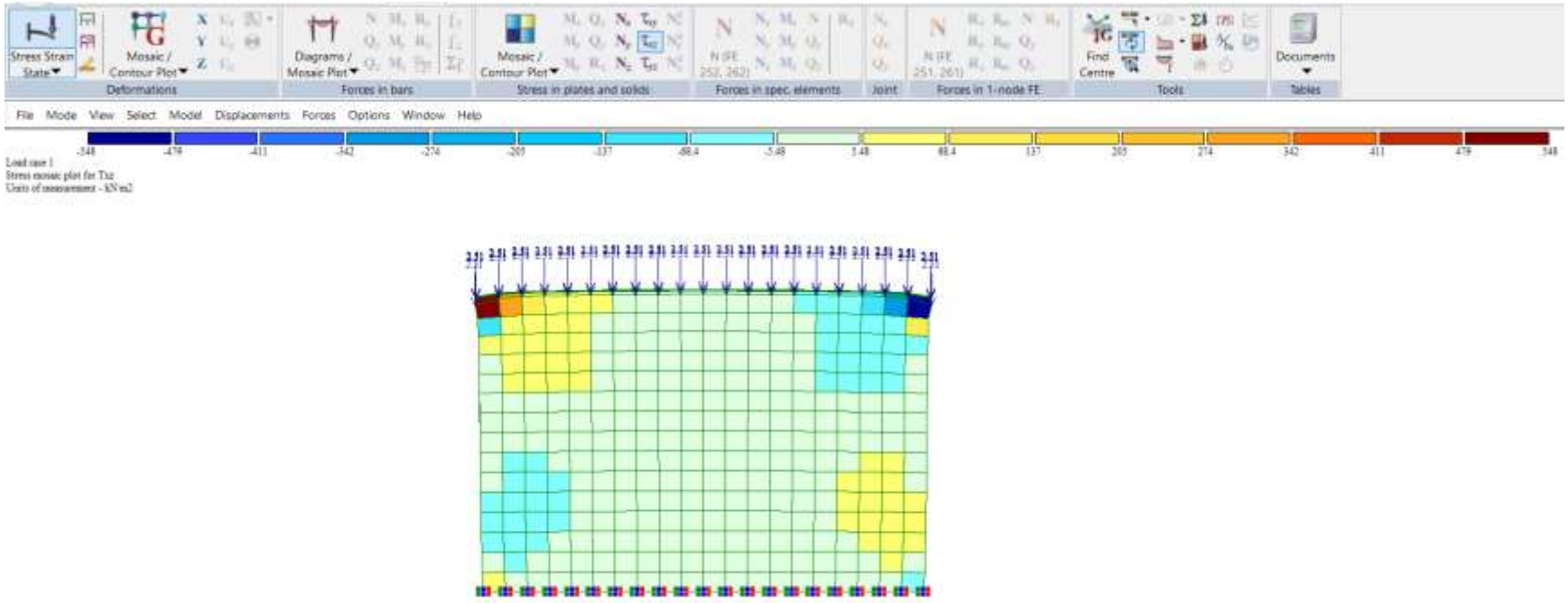


Annexe 37 : Contrainte normale maximale suivant Z





Annexe 38 : Contrainte tangentielle maximale suivant XZ



Annexe 39 : Déplacement maximal suivant Z

