



**HAL**  
open science

# Modélisation thermomécanique de la paroi des greniers de stockage de céréales en banco

Clément Labintan

► **To cite this version:**

Clément Labintan. Modélisation thermomécanique de la paroi des greniers de stockage de céréales en banco. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2018. Français. NNT : 2018LORR0060 . tel-01920643

**HAL Id: tel-01920643**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01920643>**

Submitted on 1 Jul 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Université d'Abomey-Calavi  
École Doctorale des Sciences  
de l'Ingénieur



Université de Lorraine  
École Doctorale Ressources Procédés  
Produits Environnement

Thèse de Doctorat

# MODELISATION THERMOMECHANIQUE DE LA PAROI DES GRENIERS DE STOCKAGE DE CEREALES EN BANCO

Présentée et soutenue par

**Clément LABINTAN**

Le 28 juin 2018 pour l'obtention du

Doctorat délivré conjointement par l'Université d'Abomey-Calavi et L'Université de  
Lorraine

Spécialités : Mécanique - Génie Civil

## Jury

Rapporteurs	Comlan Aristide HOUNGAN Maître de Conférences, Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques - Bénin MOHAMMED LACHI Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne – France
Examineurs	Hamid ZAHROUNI Professeur, Université de Lorraine – France Norbert HOUNKONNOU Professeur, Université d'Abomey-Calavi - Bénin Victor GBAGUIDI Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi - Bénin
Directeurs de thèse	Riad BENELMIR Professeur, Université de Lorraine – France Mohamed GIBIGAYE Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi - Bénin André DONNOT Maître de Conférences, Université de Lorraine – France
Invité	Mahdia HATTAB Professeur, Université de Lorraine – France







# DÉDICACE

À Ma famille



# REMERCIEMENTS

« *Modélisation thermomécanique de la paroi des greniers de stockage de céréales en banco* », comme tous les sujets de thèse, le mien était à la fois attirant et intrigant. C'est grâce à ce sujet que j'ai pu découvrir le monde des composites et de la thermique.

Trois années de travail acharné, d'engagement et d'aventure, au cours desquelles j'ai pu découvrir cet univers mystérieux. Ce manuscrit de thèse est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois de l'Université de Lorraine (UL), et le Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquée de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC). Cette thèse a été financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique du Bénin et l'Ambassade de France au Bénin.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude à :

- Monsieur Mohamed GIBIGAYE, Professeur à l'UAC, directeur de cette thèse, pour son soutien, ses conseils et la confiance qu'il m'a accordés tout au long de cette recherche. Son expérience et son sens critique m'ont permis d'aller plus loin dans la modélisation des structures et de découvrir les matériaux composites à base de fibres végétales.
- Messieurs Riad BENELMIR et André DONNOT, Professeurs à l'UL, co-directeurs de cette thèse pour leur encadrement efficace.

J'adresse mes remerciements aux professeurs Comlan Aristide HOUNGAN et Mohammed LACHI pour avoir supporté la lourde tâche de rapporteur de cette thèse. Merci d'avoir lu de façon très détaillée mon mémoire. Je remercie également les professeurs Hamid ZAHROUNI, Mahdia HATTAB, Victor GBAGUIDI et Norbert HOUNKONNOU pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à l'endroit du Professeur André LECOMTE pour m'avoir aidé pour les essais de laboratoire à l'IUT Nancy-Brabois.

Je remercie les docteurs Valéry K. DOKO, Edem CHABI et Jonathan GUIDIGO pour les conseils, l'assistance et l'entière disponibilité.

Je tiens à remercier le professeur Antoine VIANOU, directeur de l'ED Sciences de l'ingénieur, le professeur Stéphane DESOBRY, directeur de l'ED RP2E et le professeur Philippe GERARDIN, directeur du LERMAB.

Je remercie l'ensemble du personnel du laboratoire, en particulier : Corinne COURTEHOUX et Emmanuel MARTIN.

Je n'oublie pas les amis, thésards : Gladys, Gildas, Crespin, Ali, Chéissou, Daniel et Christian.

Le dernier et non le moindre des mercis, je le dis à Jean-Claude et Anne-Marie HEMERYCK.  
Merci pour votre soutien et pour tous ces bons moments à Nancy.

# RÉSUMÉ

Depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs projets se sont intéressés à la question de l'amélioration du système de stockage des récoltes en zone rurale dans la stratégie de lutte contre l'insécurité alimentaire au Bénin. La nécessité de stocker les céréales procède de plusieurs facteurs, dont le principal est l'étalement, dans l'année, de la consommation de denrées récoltées ponctuellement. S'y ajoutent de nombreux facteurs socio-économiques dont l'importance pour le revenu des paysans est énorme. Le stockage des céréales se fait en milieu rural au nord du Bénin dans des greniers (silo) en terre qui ont une contenance limitée. Les nombreuses tentatives d'introduction de magasins modernes ont essuyé le rejet des populations. Ce qui pose le problème d'acceptabilité des solutions.

Le présent travail a pour but d'étudier la possibilité d'augmenter le volume de stockage du grenier de type Yom sans changer ni sa forme architecturale, ni le composite argile-paillettes végétales- décoction de néré.

La caractérisation expérimentale du comportement mécanique du banco, matériau de construction de ces greniers a permis de définir le meilleur dosage pour des caractéristiques maximales. En faisant varier la proportion de paille et de décoction de néré, l'influence sur la terre crue de la paille et de la décoction est mise en évidence. La paille de riz utilisée dans cette étude joue le rôle d'armature dans le banco. Elle améliore la résistance en traction mais aussi celle en compression du composite jusqu'à un seuil de 2% de proportion massique. Autrefois utilisée pour l'étanchéité des constructions en terre, la décoction des graines de néré améliore les résistances à la compression du composite jusqu'à un seuil de 6% de proportion massique.

La simulation de l'action des grains, à la vidange et au remplissage sur la paroi du grenier et l'analyse des déformations induites en lien avec les performances du matériau montrent qu'il y a possibilité de construire des greniers de plus grande taille. Une optimisation paramétrique des dimensions a été faite.

L'effet des échauffements successifs sur la paroi du grenier a été pris en compte à travers la modélisation des transferts thermiques. La modélisation des profils de température dans diverses coupes orientées du silo montre que le flux est bien amorti et les conditions d'ambiance dans le grenier garantissent une bonne conservation. Les variations de température de la paroi n'affectent pas la stabilité des silos en banco.

Il est donc possible de construire des greniers de grande capacité de stockage qui serviraient de greniers communautaires ou banques de céréales à disposition des coopératives villageoises. Cette solution règlerait le problème de l'insécurité alimentaire au niveau du monde rural.

Mots clés: Grenier en terre ; banco ; grain ; méthode des éléments finis ; contrainte mécanique ; contrainte thermique

# ABSTRACT

For more than twenty years, several projects have addressed the question of improving the system of storage of crops in rural areas in the strategy to combat food insecurity in Benin. The need to store cereals stems from several factors, the most important of which is the staggering, in the year, of the consumption of goods harvested from time to time. In addition, there are many socio-economic factors whose importance for farmers' income is enormous. Cereal storage is done in rural areas of northern Benin in earth silos with limited capacity. The many attempts to introduce modern silos have been rejected by the population. This raises the problem of acceptability of solutions.

The present work aims to study the possibility of increasing the storage volume of Yom type silo without changing its architectural form, nor the banco composite.

The experimental characterization of the mechanical behaviour of the banco, the construction material of these granaries made it possible to define the best dosage for maximum characteristics. By varying the proportion of straw and decoction of nere (locust bean), the influence on the raw earth of the straw and the decoction is highlighted. The rice straw used in this study plays the role of reinforcement in the banco. It improves the tensile strength but also that in compression of the composite up to a threshold of 2% mass proportion. Formerly used for the waterproofing of earthen constructions, the decoction of seeds of "nééré" improves the compressive strengths of the composite up to a threshold of 6% of mass proportion.

Simulation of grain action, emptying and filling on the attic wall and analysis of induced deformations in relation to the performance of the material shows that it is possible to build larger granaries. A parametric optimization of the dimensions was made.

The effect of successive heating on the attic wall has been considered by modelling heat transfer. The modelling of the temperature profiles in various silo-oriented sections shows

that the flow is well damped and the ambient conditions in the attic guarantee good conservation. Changes in wall temperature do not affect the stability of the earth silos.

It is therefore possible to build granaries with large storage capacity that could be used as community granaries or cereal banks for village cooperatives. This solution would solve the problem of food insecurity in rural areas.

Key words: earth silo; banco; grain; finite element analysis; mechanical stress; thermal stress

# SOMMAIRE

Introduction générale .....	1
Étude bibliographique .....	5
Comportement mécanique du composite argile-paille .....	31
Modélisation mécanique de la paroi du silo en banco .....	53
Simulation des transferts de chaleur dans la paroi du grenier .....	79
Conclusion générale et perspectives .....	109
Bibliographie .....	113
Table des matières .....	137



## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Calendrier de variation des stocks vivriers [23] .....	7
Figure 2 : Enduit ciment sur le corps du grenier [13].....	9
Figure 3 : grenier en terre tombé en ruine .....	9
Figure 4 : Grenier en terre du nord-Bénin .....	11
Figure 5 : principaux types de grenier en terre [24] .....	11
Figure 6: tata somba .....	12
Figure 7 : termitière (nord-bénin).....	14
Figure 8 : néré : de l'arbre à la décoction .....	16
Figure 9 : Chromatogramme de l'extrait de néré [46] .....	17
Figure 10 : Spectre infrarouge de la décoction de néré sec [46] .....	17
Figure 11 : Courbes de comportement en compression [46] .....	18
figure 12: variation du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau lors d'une opération de compactage [47] .....	19
Figure 13 : Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression de briques crues [259] .....	21
Figure 14 : la paille de riz hachée.....	33
Figure 15 : cinétique d'absorption d'eau de la paille de riz .....	33
Figure 16 : courbe contrainte-déformation en traction directe --- paille de riz (Zinvié) ...	34
Figure 17 : distribution granulométrique des particules .....	35
Figure 18 : diagramme de plasticité (XP P 13-901) .....	36
Figure 19 : soil texture triangle .....	37
Figure 20 : dispositif de moulage et démoulage.....	39
Figure 21 : combinaison des mélanges.....	40

Figure 22 : variation de la masse volumique et du taux de retrait en fonction de la teneur massique en paille .....	41
Figure 23 : dispositifs d'essais de flexion et de compression.....	43
Figure 24 : courbe contrainte-déformation des différents mélanges « terre » et « terre + paille » .....	43
Figure 25 : variation de la contrainte de compression et traction par fendage en fonction de la teneur en paille des éprouvettes cylindriques .....	44
Figure 26 : variation de la contrainte de compression et flexion 3 points en fonction de la teneur en paille des éprouvettes prismatiques.....	44
Figure 27 : variation de la contrainte en fonction du pourcentage de décoction de néré du mélange à 2% de paille.....	47
Figure 28 : comportement typique du banco en compression.....	48
Figure 29 : Géométrie du grenier.....	55
Figure 30 : Coupe 3D grenier en terre (YOM) .....	56
Figure 31 : Coupole inférieure.....	56
Figure 32 : Coupole supérieure du grenier en terre.....	58
Figure 33 : zone de transition .....	58
Figure 34 : conditions d'appuis (encastrement à la base) .....	59
Figure 35 : actions sur la paroi.....	59
Figure 36 : remplissage/vidange du grenier en terre [24] .....	60
Figure 37 : élément volumique c3d8r.....	63
Figure 38 : Modélisation géométrique ABAQUS (part) .....	64
Figure 39 : maillage de la paroi (éléments brique).....	65
Figure 40 : maillage du silo (grains + paroi).....	65
Figure 41 : Modèle de comportement élastoplastique des grains .....	65
Figure 42 : Interaction Paroi-Grains .....	69
Figure 43 : path_1.....	69
Figure 44 : déformée de la paroi .....	70
Figure 45 : Contraintes principales _ silo chargé au repos .....	70
Figure 46 : contrainte équivalente _ silo chargé au repos .....	71

Figure 47 : Variation de la contrainte équivalente maximale en fonction du nombre des couches de remplissage.....	72
Figure 48 : Variation de la contrainte équivalente maximale en fonction du temps du remplissage .....	73
Figure 49 : état de contrainte dans la paroi à la vidange.....	74
Figure 50 : Variation de la contrainte équivalente maximale à différentes étapes de la vidange .....	74
Figure 51 : Contrainte maximale dans la zone de transition en fonction de la proportion de grains vidés .....	75
Figure 52 : critères de Tresca-Guest et de von Mises .....	76
Figure 53 : Dispositif expérimental de mesures thermiques par méthode fluxmétrique ....	82
Figure 54 : échantillons de différentes épaisseurs testés.....	86
Figure 55 : Déphasage et amortissement de la température.....	86
Figure 56 : Évolution du facteur d'amortissement et du déphasage en fonction de l'épaisseur de la paroi.....	87
Figure 57 : schéma du dispositif de mesure de la conductivité .....	88
Figure 58 : dispositif de mesure.....	89
Figure 59 : acquisition .....	89
Figure 60 : Variation de la conductivité en fonction de temps .....	90
Figure 61 : Température moyenne maximale et minimale Natitingou [251] .....	91
Figure 62 : Variation de température _ jour le plus chaud de l'année [251] .....	92
Figure 63 : Rayonnement solaire quotidien moyen [251].....	92
Figure 64 : Rayonnement solaire en ondes courtes le 21 février [251].....	93
Figure 65 : géométrie du grenier (inclinaison des paroi) .....	93
Figure 66 : Rayonnement global suivant les orientations de paroi .....	94
Figure 67: Modèle thermique _ paroi.....	96
Figure 68 : profil de température _ paroi .....	97
Figure 69 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi _ EST .....	97
Figure 70 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi _ Sud-Est .....	98
Figure 71 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi _ Sud.....	99

Figure 72 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi _ Sud-Ouest .....	99
Figure 73 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi _ Ouest.....	100
Figure 74 : Variation de la température de paroi extérieure en fonction du temps.....	101
Figure 75 : Variation de la température de paroi intérieure en fonction du temps.....	101
Figure 76 : Densité de flux de paroi intérieure suivant l'orientation .....	102
Figure 78 : Échanges de chaleur dans les grains.....	103
Figure 77 : disposition des grains suivant l'orientation .....	104
Figure 79 : État de contrainte et de déformation induite par la variation de température à 17h .....	105
Figure 80 : Déplacement induit par la variation de température dans la paroi .....	105
Figure 81 : Contrainte équivalente induite par la variation de température dans la paroi .....	106
Figure 82 : Déformation induite par la variation de température dans la paroi .....	106
Figure 83 : Déplacement induit par la pression des céréales.....	106

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la paille.....	34
Tableau 2 : limites d'Atterberg du sol .....	36
Tableau 3 : masses volumiques .....	37
Tableau 4 : granularité du sol .....	37
Tableau 5 : taux de retrait du sol.....	38
Tableau 6 : composition des différents mélanges.....	41
Tableau 7 : fractions massiques des composants pour les différents types de mélange ....	42
Tableau 8 : fractions massiques des mélanges « terre + paille + décoction » .....	46
Tableau 9 : caractéristiques mécaniques optimales _ banco.....	49
Tableau 10 : banco optimal mix proportion .....	50
Tableau 11 : dimension du grenier étudié .....	57
Tableau 12 : Temps de calcul des éléments finis.....	64
Tableau 13 : propriétés mécaniques du maïs .....	67
Tableau 14 : propriétés thermiques .....	84
Tableau 15 : Conductivité thermique effective des céréales .....	90
Tableau 16 : Propriétés physique du blé.....	102
Tableau 17 : Échauffement des grains par jour de stockage (jour le plus chaud).....	103



# Introduction générale

L'agriculture constitue un secteur clé pour l'économie des pays du sud où la production agricole se concentre autour de deux catégories de cultures, les cultures vivrières et les cultures de rente[1], [2]. La production vivrière, qui concerne la grande majorité des producteurs est encore largement tributaire des conditions climatiques et notamment de la pluviométrie. Cette situation contraint à une production saisonnière et fragilise le pouvoir d'achat des populations notamment en zone rurale [3], [4].

Au Bénin, une politique soutenue de renforcement du système de production, à travers la mise en place d'actions de promotion des filières, la vulgarisation de l'utilisation d'intrants agricoles, la construction d'infrastructures de désenclavement, a contribué à l'augmentation continue de la production agricole [5].

Malgré ces actions en matière de sécurité alimentaire depuis les années 90 (dans l'Atacora), les récentes enquêtes sur les conditions de vie réalisées par l'INSAE en 2010 et publiées en 2011 révèlent que 72% de la population vit dans la pauvreté et que 21% de la population est en insécurité alimentaire. La sécurité alimentaire se définit comme *«la situation dans laquelle tous les individus ont, à tout moment, un accès physique, social et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active »*. Cette définition, fait apparaître les dimensions de la sécurité alimentaire que sont : disponibilité, accessibilité, stabilité et utilisation des vivres. L'analyse de la situation révèle que les interventions en matière de sécurité alimentaire se concentrent prioritairement sur les composantes de la disponibilité et de l'accessibilité reléguant au second rang celles de la stabilité et surtout de l'utilisation des aliments.

Le besoin en liquidités pour assurer les dépenses incompressibles (scolarisation/formation des enfants, les soins de santé, l'eau, etc.) oblige les producteurs à déstocker de temps en

temps les vivriers destinés à la consommation du ménage pour les vendre sur les marchés locaux. Lorsque les stocks sont épuisés, ils ne disposent plus ni de liquidité, ni de denrées commercialisables ni d'argent ce qui rend cette période de soudure très critique. Cet accès économiquement limité des producteurs aux vivriers augmente la sévérité de la soudure alimentaire.

En considérant les variations de stock au niveau des cultures vivrières dans les greniers (maïs, sorgho, riz et igname), il apparaît que la période de pénurie ou de soudure alimentaire s'étend de juin à septembre dans l'Atacora, soit en moyenne 4 mois (16 semaines) de soudure alimentaire chaque année.

Pour contourner ce problème, qui maintient les populations rurales dans le cercle vicieux de la pauvreté, voire d'insécurité alimentaire, une politique de stabilisation de la récolte sera mise en œuvre, avec la construction de grands silos modernes en tôle ou en ciment. Ce fut un mauvais choix. Les greniers en banco sont préférés aux magasins de stockages modernes notamment pour leur confort thermique intérieur, leur faible coût de construction et une durée de vie de plus de 50 ans [6]–[12]. En effet, les céréales bien traitées avant leur stockage dans le grenier de banco restent intactes, tout le temps que dure leur séjour dans ces ouvrages en terre [6], [13]–[15] contrairement aux silos métalliques ou en ciment.

Pourquoi ces différences de comportement entre matériaux ? Les greniers banco présentent un grave défaut de résistance mécanique ce qui limite leur capacité et donc la durée utile de stockage. Des greniers plus volumineux permettraient de garantir à la fois un stockage plus important de matériaux stockés dès la récolte et permettraient de prolonger le temps de mise à disposition donc de diminuer la période de soudure.

Au regard des performances mécaniques et de durabilité affichées par le composite banco de grenier, il est loisible d'envisager son utilisation dans le cadre de l'augmentation de la capacité de stockage des greniers en terre en milieu rural [12], [16]–[18].

Des essais d'agrandissement ont été menés par le passé [10], [13] et se sont soldés par une fragilité des édifices. Les échecs connus ont été attribués à l'empirisme utilisé pour redimensionner les silos qui n'incluait pas de calculs mécaniques poussés.

Notre objectif est de prendre en compte cette fragilité dès la conception même des silos en proposant une modélisation mécanique de modèles de silo plus volumineux et de prendre en compte l'aspect thermique inhérent à l'ensoleillement du Bénin qui pourrait induire des contraintes de dilatation en plus des contraintes mécaniques "normales".

Cette thèse, vise à améliorer les connaissances sur cette classe de matériau composite afin de développer des formulations plus performantes et faciliter le dimensionnement des greniers en terre tout en garantissant des conditions satisfaisantes du point de vue de la température et de l'humidité dans la zone de stockage à grande capacité.

Pour se faire, la caractérisation de ce matériau de composition empirique reste un vaste chantier pour développer de formulations plus performantes en vue d'un dimensionnement optimal des greniers de stockage de céréales.

Le banco a de nombreuses qualités et atouts, parmi lesquels on peut citer la disponibilité à proximité des matériaux de base, son faible coût de revient [18]–[21], sa facilité de moulage, son excellente résistance en compression, sa bonne inertie thermique, sa bonne tenue au feu sa durabilité et sa bonne résistance en traction du fait de l'incorporation des fibres naturelles qui constituent les renforts à la matrice argileuse [10], [22].

Nous analysons le comportement de la paroi du grenier sous l'action des céréales pour évaluer son niveau de sollicitation et proposer une optimisation paramétrique des dimensions.

La conservation des gains relève du transfert de chaleur et de vapeur d'eau entre les grains stockés et le milieu ambiant. Les murs du silo sont exposés aux rayons solaires durant la période de stockage, ce qui induit localement une surchauffe qui se déplace pendant la journée de l'est vers l'ouest en fonction de la position du soleil. Un autre facteur thermique, moins important que le rayonnement solaire est la fluctuation journalière de la température extérieure qui tantôt va freiner ou accélérer les échanges avec le milieu extérieur.

Pour tenir compte des conditions de températures extérieures plus réalistes, les fluctuations de température ambiante extérieure (jour, nuit et saisons) peuvent être approchées par des températures sinusoïdales, ou la période peut être le défilement des journées ou des années.

Nous analysons l'influence de ces fluctuations sur les conditions d'ambiance à l'intérieur des greniers ; autrement dit l'exposition des céréales.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est organisé en deux parties. La première est une bibliographie dans laquelle nous développons des généralités sur les silos de stockage. Elle comporte les notions relatives à la conception des silos de stockage (classification des silos, matières stockées, etc.), les conditions optimales de conservations dans les silos, ainsi que les risques susceptibles d'être engendrés par leurs exploitations. La présentation des greniers traditionnels du Nord-Bénin vient clore cette partie. La deuxième partie quant à elle, présente les informations générales sur les matériaux de constructions en terre, l'avantage de construire en terre, la stabilisation de la terre pour améliorer ses performances. Les caractéristiques des constituants du banco (terre de barre, paille et décoction de néré) sont rappelées.

Le deuxième chapitre présente les résultats de la caractérisation expérimentale du comportement mécanique du banco. En faisant varier la proportion de paille et de décoction de néré, l'influence sur la terre crue de ces ajouts est mise en évidence pour en déterminer le meilleur dosage.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation de l'action des grains, à la vidange et au remplissage sur la paroi du grenier et l'analyse des déformations induites en lien avec les performances du matériau. Une optimisation paramétrique des dimensions s'en suit pour mieux exploiter la résistance du banco.

Le quatrième chapitre modélise les transferts thermiques à travers la paroi du grenier afin de prendre en compte l'effet des échauffements successifs sur la paroi du grenier. La première partie du chapitre est consacré à la détermination des caractéristiques thermophysiques de la paroi en banco et des céréales. La deuxième partie, utilise les résultats de la modélisation des profils de température dans divers coupe orientée du silo et finit sur les conditions d'ambiance dans le grenier.

# CHAPITRE 1

## Étude bibliographique

### SOMMAIRE

---

1. Introduction .....	6
2. Stratégies de stabilisation de la récolte .....	6
3. Les greniers traditionnels .....	10
4. Facteurs influençant la construction des greniers en terre .....	12
5. Critères de sélection de la terre pour le banco .....	12
6. La paille .....	14
7. La décoction de néré .....	16
8. Propriétés mécaniques du banco .....	18
9. Les silos .....	26
10. Synthèse .....	29

---

## 1. Introduction

L'insécurité alimentaire, vu son caractère multidimensionnel peut être non seulement la conséquence mais également la cause de la pauvreté des ménages. C'est pourquoi, certains programmes de développement interviennent directement sur la sécurité alimentaire pendant que d'autres adoptent l'approche d'amélioration du revenu des ménages afin de contribuer à la sécurité alimentaire.

Malgré les diverses approches d'intervention et leurs actions en matière de sécurité alimentaire depuis 1990 (dans l'Atacora), les récentes enquêtes sur les conditions de vie réalisées par l'INSAE en 2010 et publiées en 2011 révèlent que 72% de la population sont en état de pauvreté et que 21% sont à risque d'insécurité alimentaire.

Pourtant, le département de l'Atacora est globalement excédentaire en tous les produits de base ciblés (maïs, sorgho, igname et les produits maraîchers) excepté le riz dont la production demeure inférieure aux besoins des populations (ONASA, 2012 ; CEBEDES, 2008). Ces produits dégagent, en 2012, des surplus plus élevés (soit 3 fois plus) que ceux de 2002. Ceci atteste que le rythme d'accroissement de la production est théoriquement plus important et rapide que celui des besoins de la population. Il se pose alors le problème de la stabilisation du solde vivrier.

## 2. Stratégies de stabilisation de la récolte

Le premier problème posé par le déficit en céréales de la plupart des pays africains semble tout d'abord être l'aptitude à produire. La production vivrière, étant encore largement tributaire des conditions climatiques et notamment de la pluviométrie. À y regarder de plus près, on constate qu'entre une récolte localisée sur un laps de temps très court, et une consommation annuelle, une partie non négligeable (30 à 40%, selon les auteurs) des grains disparaît à la suite de diverses dégradations. Le stockage n'est donc pas une opération neutre.

La nécessité de stocker les céréales procède de plusieurs facteurs, dont le principal est l'étalement de la consommation de denrées récoltées ponctuellement dans l'année. S'y

ajoutent de nombreux facteurs socio-économiques dont l'importance pour le revenu des paysans est énorme.

## 2.1. Les variations des stocks vivriers

À l'échelle du village, l'évolution du stock vivrier durant une campagne agricole, renseigne non seulement sur la disponibilité réelle des produits alimentaires mais permet également d'identifier les périodes d'abondance et de pénurie qui sont à leur tour calqués sur le calendrier agricole local.

Les récoltes approvisionnent les greniers en vivriers de sortes qu'ils sont généralement pleins entre octobre et décembre (voire janvier). Ainsi, la période d'abondance vivrière où les greniers sont remplis entre 75 et 100% de leurs capacités s'étend d'octobre à janvier.

Les greniers des ménages sont vides et le stock vivrier est nul de juin à septembre. C'est la période de pénurie ou de soudure alimentaire pendant laquelle les prix des vivriers atteignent sur les marchés leurs niveaux les plus élevés (soit au moins le double de ce qu'ils étaient en période d'abondance).

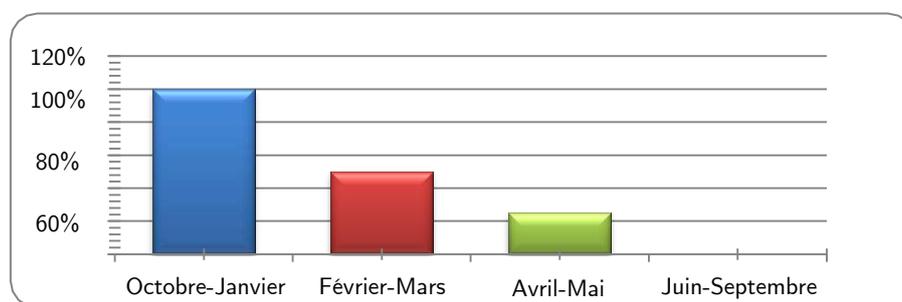


Figure 1 : Calendrier de variation des stocks vivriers [23]

Le besoin en liquidités pour assurer les dépenses incompressibles (scolarisation/formation des enfants, les soins de santé, l'eau, etc.) oblige les producteurs à déstocker de temps en temps les vivriers destinés à la consommation du ménage pour les vendre sur les marchés locaux. Ce déstockage de vivriers est également entretenu et encouragé par une demande grandissante des marchés locaux, qui, à la faveur des infrastructures de désenclavement et du développement des marchés, se sont intégrés aux réseaux régionaux et internationaux d'approvisionnement des grandes villes.

## 2.2. Les actions

À partir des années 90, des projets de développement agricole ont été conduits dans les communes avec diverses approches participatives dans l'objectif de sortir les producteurs de la précarité en améliorant leurs productions et revenus agricoles. Les actions mises en œuvre par ces projets ont couvert les différentes composantes de la sécurité alimentaire (disponibilité, accessibilité, stabilité et utilisation) avec un accent particulier sur la composante stabilité. La stabilité du stock vivrier est liée à la solidité du système post-récolte. Ce système est très complexe du fait de l'interaction entre une multitude de facteurs techniques et socio-économiques auxquels font face les producteurs. L'élément central du système, ce sont les structures de stockage.

Une structure de stockage est une enceinte appropriée dont la finalité est de *contenir* et *préserver* les denrées pendant une durée donnée.

Dans le cas des céréales, que le stockage soit paysan ou commercial, quatre structures ont été identifiées :

- Les greniers traditionnels (stockage domestique)
- Les cribs améliorés (à la ferme ou communautaires)
- les silos (stockage centralisé)
- Les magasins (stockage commercial, administratif ou privé).

Selon des études menées par l'institut international d'agriculture tropicale (IITA), 75% des producteurs au nord-Bénin utilisent des greniers traditionnels en banco.

Le constat général qui se dégage, de l'amélioration des systèmes post récolte au Bénin, est que toutes les tentatives d'introduction de nouvelles technologies de stockage n'ont pas donné les résultats escomptés ou se sont soldées par des échecs. Les technologies traditionnelles continuent de prospérer en dépit des efforts d'amélioration à travers la construction de magasins modernes de stockage en ciment et en tôle. Les échecs trouvent leur justification dans un ensemble de facteurs qui interagissent pour guider les logiques des producteurs qui ne cadrent pas toujours avec les prévisions techniques des chercheurs et vulgarisateurs. Ces facteurs peuvent être regroupés en facteurs techniques, socio-économiques, culturels et enfin institutionnels.

Dans le souci d'accroître les capacités de stockage familial des ménages vulnérables le projet LISA (Louvain Coopération) avait diffusé le grenier en terre dont le corps avait été renforcé avec du ciment afin de le rendre plus solide donc plus durable (Figure 2). Ces greniers n'ont pas montré les performances techniques attendues d'eux du point de vue de la solidité. L'utilisation du ciment pour la construction du grenier est apparue inutile. D'importantes pertes dues à la pourriture des grains ont été enregistrées dans ces greniers où beaucoup de ciment avait été utilisé. L'enduit ciment entraînerait une accumulation de chaleur à l'intérieur du grenier. En effet, le ciment renforce l'humidité à l'intérieure du silo contrairement à la terre qui capte cette humidité. Ce phénomène conduit à la condensation puis au développement des moisissures. De plus, la couche d'enduit se désolidarise du corps du grenier.



Figure 2 : Enduit ciment sur le corps du grenier [13]

D'autres initiatives d'agrandissement de ces greniers en terre se sont soldées par une accélération de la ruine de ces derniers (Figure 3). On pourrait conclure d'un mauvais dimensionnement de ces ouvrages malgré de savoir-faire des producteurs.



Figure 3 : grenier en terre tombé en ruine

En résumé, pour garantir la stabilité du stock de céréales, il faut améliorer le système de stockage en augmentant la capacité de stockage des ouvrages de stockage. La construction de grenier en terre de grande capacité de stockage s'avère une solution économique et est largement adoptée par les producteurs. Ces greniers pourront faire office de banque de céréales (réserve communautaire) pour se protéger des prix exorbitants pratiqués par certains commerçants et participer à la gestion et la sécurisation des excédents des récoltes.

« *Veiller à ce qu'ils s'approprient les pratiques, c'est la meilleure façon d'avoir la garantie qu'ils ne les abandonneront pas quelque temps plus tard. Parce que ce sera venu d'eux et qu'ils seront fiers de leurs réussites.* », observait Philippe MARTIN, conseiller technique de l'organisation non gouvernementale « Île de paix » dans son rapport « La révolution se passe au grenier » du 11 JANVIER 2017.

Mais quels sont les facteurs qui interviennent dans la construction de ces ouvrages ?

### 3. Les greniers traditionnels

Le stockage au niveau du producteur a pour objectif de conserver les grains en bon état en les protégeant notamment contre la pluie et l'humidité du sol, les insectes et les autres animaux nuisibles, et la chaleur excessive.

Le grenier en terre est une construction en banco (Figure 4), faite à partir de la terre de termitière mélangée à de la paille d'espèces de graminées. Il est compartimenté à l'intérieur en vue du stockage simultané de plusieurs denrées. Le socle est fait de grosses pierres, ou construit en banco surmonté de petits cailloux qui laissent passer l'aération pour la volaille qui s'abrite en dessous. Ce socle peut aussi être un trépied en banco supporté par des pierres.



Figure 4 : Grenier en terre du nord-Bénin

Comparé aux autres structures traditionnelles de stockage utilisées au Bénin, le grenier en terre offre beaucoup d'avantages : (i) il est solide et durable (peut durer plus de 20 ans); (ii) il peut contenir jusqu'à 8 tonnes de grains, donc convient aux gros producteurs mais peut être également utilisé par les petits producteurs; (iii) il rend le stock moins accessible aux ravageurs (insectes, rongeurs) pendant le stockage, donc réduit la ré-infestation du stock; (iv) il peut être utilisé pour le stockage de plusieurs types de produit (maïs, niébé, riz, arachide, cassettes).

Il existe plusieurs types de grenier en terre au Nord du Bénin qui naturellement sont plus solides, plus résistants, plus stables donc plus durables et plus esthétiques. Ce sont surtout : les greniers en terre de type Yora, Otamari, Monkolé et Lokpa auxquels ont été apportés des améliorations en leur adaptant de vanne de vidange et en normalisant leur construction.

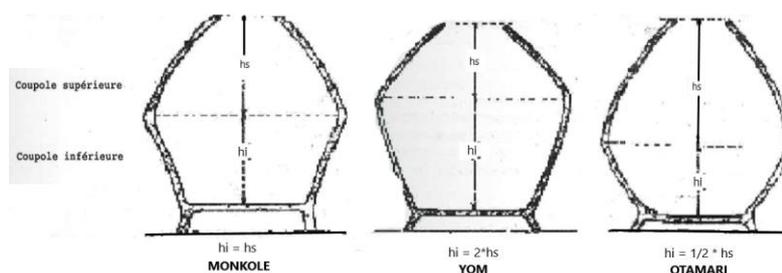


Figure 5 : principaux types de grenier en terre [24]

Ils sont inspirés des maisons en terre, les « tata », du nord-bénin. Des constructions à mi-chemin entre la forteresse médiévale et la termitière.



Figure 6: tata somba

#### 4. Facteurs influençant la construction des greniers en terre

Pour concevoir ces greniers, il faut maîtriser les caractéristiques mécaniques du banco et vérifier la stabilité de la structure sous l'action des céréales.

Le banco est un matériau de composition empirique qui a fait ses preuves dans la construction des maisons en terre, mais qui n'est régi par aucune norme ou réglementation comme la plupart des matériaux de construction en terre.

Sa composition varie d'une localité à l'autre en fonction des matériaux disponibles. Les populations utilisent la paille disponible (riz, fonio, etc. ...) et des ajouts (adjuvants) : décoction de néré, de karité et la bouse de vache pour renforcer la terre.

Des travaux ont été effectués sur la sélection du type de sol se rapprochant le plus à la terre de termitière recommandée pour la construction des greniers [25]. En revanche, quasiment rien n'a été fait sur le meilleur dosage pour des caractéristiques mécaniques maximales.

#### 5. Critères de sélection de la terre pour le banco

Des essais réalisés par le CNERTP [25], il ressort que le sol argileux pouvant servir dans la construction des greniers doit avoir un pourcentage de fine d'au moins 35% et un indice de plasticité variant de 12,5 à 29.

##### 5.1. Bar shrinkage test

Ce test donne une indication de l'indice de plasticité du sol, parce que le taux de retrait du sol lorsqu'il est séché dans son état plastique est liée à son indice de plasticité.

Une boîte de section carrée de 30-40 mm et une longueur de 500-600 mm, est rempli avec l'échantillon de la terre. Avant le remplissage, le sol doit être mélangé avec de l'eau à un peu plus de la limite de liquidité. La consistance est bonne quand une rainure, en forme de V, faites dans le mélange se ferme après environ cinq coups sur la boîte. La boîte, une fois graissée, est remplie et bien compactée avec une attention particulière au remplissage des coins. Ensuite on rase la surface en enlevant l'excès de sol et on place la boîte à l'ombre pendant 7 jours. Le séchage peut être accéléré en laissant la boîte à température ambiante pendant 1 jour, puis dans une étuve à 110 ° C jusqu'à ce que le sol soit sec.

Si, après le séchage, la barre du sol a plus de trois grandes fissures, en plus des retraits à chaque extrémité, le sol ne convient pas. On mesure le taux de retrait en poussant l'échantillon séché à une extrémité de la boîte, et en calculant la longueur du vide laissé en pourcentage, par rapport à la longueur de la boîte. Le sol ne convient pas pour la stabilisation si le taux de retrait est de plus de 10 pourcent, soit un écart de 60 mm de long dans une boîte de 600 mm. Plus le taux de retrait est grand, plus de stabilisant doit être utilisé. Le taux de retrait est calculé comme suit :

$$R = \frac{L_h - L_s}{L_h} \times 100 \quad (1)$$

Avec :  $R$  = Taux de retrait,  $L_h$  = Longueur humide,  $L_s$  = Longueur séchée

## 5.2. La terre de termitière

La meilleure terre pour les constructions en banco comme le grenier en terre amélioré est la terre de termitière (Figure 7). La terre de termitière contient de l'argile. Mais toutes les termitières ne sont pas appropriées pour la construction du grenier.

En règle générale, une terre de termitière est apte pour la construction si le taux de sable qu'elle contient est entre 35 et 50 %, la teneur en argile entre 20 et 35 % (en moyenne 30 %) et l'indice de plasticité compris entre 10 et 20 [24].

De façon pratique, pour reconnaître qu'une terre de termitière identifiée est de bonne qualité, il faut procéder de la manière suivante : prélever une poignée de cette terre, ensuite y ajouter un peu d'eau et malaxer du bout des doigts. Si la terre ainsi malaxée devient immédiatement étirable et compacte, alors c'est une terre de termitière appropriée pour

construire un grenier en terre. Mais si au contraire cette terre met du temps (plusieurs minutes) avant de devenir étirable, c'est donc une terre de mauvaise qualité [16], [24].

Les terres trop argileuses ne sont pas propices car si elles sont utilisées, le corps du grenier comportera trop de fissurations par suite du retrait brusque de l'eau lors du séchage des couches en construction, ce qui fragilisera le grenier. La terre d'une termitière en activité est aussi à éviter car ceci peut constituer une source d'infestation du grenier par les termites.

Il existe différents types de terre de termitière. La plupart sont aptes à la construction du grenier en terre. Toutefois, il est plus prudent de vérifier l'aptitude de la terre de termitière avant tout prélèvement en procédant tel que décrit plus haut.



Figure 7 : termitière (nord-bénin)

## 6. La paille

La paille, c'est-à-dire la tige ligneuse des plantes céréalières, constitue un déchet agricole, car elle a de médiocre qualité alimentaire, même pour des ruminants. Les premières civilisations agricoles ont toutefois trouvé d'autres moyens de la valoriser : comme litière pour les animaux, pour la vannerie, par exemple pour les tatamis, réalisés en paille de riz, et comme matériau de construction, notamment mélangée à la terre crue pour réaliser des briques ou du torchis, ou employée en couverture pour former des toits en chaume.

L'industrialisation de l'agriculture à partir de la fin du XIXe siècle a ajouté une nouvelle mise en œuvre à ces techniques millénaires. Les fermiers du Nebraska ont vite compris que les bottes de paille fabriquées par les premières botteleuses mécaniques pouvaient être utilisées comme des grosses briques pour construire des maisons. Aux Etats-Unis existaient ainsi plusieurs maisons en paille. Les murs sont ainsi réalisés en bottes de paille enduite à la chaux

ou à la terre, avec des renforts structurels en bois pour les points singuliers, dont les ouvertures.

Les pailles sont reconnues pour leur performance en isolation thermique et en affaiblissement acoustique. Elles sont utilisées en renfort à la terre crue pour en améliorer les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques.

L'utilisation des matières d'origine végétale se développe de façon croissante dans des applications du génie civil, et notamment pour la construction. Ce développement est évidemment à relier à la pénurie de matières premières mais également aux besoins de répondre à des préoccupations environnementales et de développement durable.

Ainsi on trouve en Afrique un grand nombre de fibres végétales soit à l'état naturel soit sous la forme de déchets végétaux consécutifs à l'extraction industrielle de substances alimentaires (riz, sucre...), pouvant offrir une grande diversité d'applications dans le domaine du génie civil. Nous trouvons des mélanges fibres et argiles pour fabriquer le banco. En effet l'ajout des fibres à la terre pour la construction offre des avantages en améliorant les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du matériau terre crue. L'ajout de paille augmente d'une part la résistance du matériau et d'autre part confère aux terres une certaine plasticité. Cet ajout permet aussi à conférer aux terres une ductilité au stade de la rupture[26]–[32]. La paille empêche aussi les fissures, allège le matériau et accélère son séchage. Des études ont révélé que la paille ne joue un rôle améliorant que quand le mélange ne contient pas trop d'argile ; mais elle se rend indispensable de par sa capacité d'empêcher les fissures permettant ainsi de confectionner des briques de grandes dimensions[27], [33]–[40].

L'incorporation de la paille dans le béton de terre est intéressante en ce sens que les briques d'adobe paillé sont plus légères, offrent une excellente isolation thermique et acoustique puis ont une résistance mécanique améliorée.

Plusieurs études ont été menées pour déterminer les propriétés mécaniques des fibres végétales. Les travaux de O'Dogherty et al. sur six variétés de paille de blé donnent un ordre de grandeur des performances mécaniques de ces fibres. La résistance à la traction est comprise entre 21,2 et 31,2 MPa et la résistance au cisaillement est comprise entre 4,91

et 7,26 MPa. Le module de Young était compris entre 4,77 et 6,5 GPa et le module de rigidité entre 267 et 547 MPa [41].

H. Tavakoli et al. ont déterminé les propriétés mécaniques de la paille de riz. La résistance à la flexion donne des valeurs comprises entre 8,93 et 7,46 MPa. Le module d'Young varie de 0,35 à 1,25 GPa [42].

## 7. La décoction de néré

La décoction de néré, substance issue de la préparation des grains de néré, en plus de ses vertus médicamenteuses, trouve son application dans le génie civil.

Le néré "Parkia Biglobosa" (Figure 8) est une espèce d'arbre de la famille des Mimosaceae ou des Fabaceae selon la classification phylogénétique. L'arbre est haut de 10 mètres à 20 mètres ; son tronc est recouvert d'une écorce grisâtre et striée.

Les fruits du Néré sont des gousses longues de 25 centimètres et large de 15 millimètres à 20 millimètres aplaties de couleur brun foncé, contenant des grains noirs aplatis semblables à des grosses lentilles (Figure 8).



Figure 8 : néré : de l'arbre à la décoction

Traditionnellement, la décoction à base de gousses de néré est utilisée pour couvrir les murs de terre crue d'enduit (Figure 6). Son caractère imperméabilisant est utilisé pour protéger ces murs de l'érosion et des dégradations de l'eau.

L'extrait (décoction des grains de néré) peut être obtenu en préparant les grains de néré avec de l'eau jusqu'à la cuisson de ces dernières ; ou encore simplement en triturant les graines et en y ajoutant de l'eau selon la concentration voulue ; et dans ce dernier cas, on extrait le jus 48 heures après (Figure 8).

En plus du rôle qu'elle joue dans l'imperméabilisation en tant qu'enduit, la décoction de néré améliore les caractéristiques mécaniques du matériau. Le banco devient plus résistant en compression lorsqu'on y ajoute la décoction de néré. En effet la décoction de néré permet de renforcer des matériaux à base de terre et de graveleux latéritiques, qui avec le temps deviennent des matériaux aussi dur qu'un béton par réaction photo-catalytique[43]–[45].

La caractérisation de la décoction des gousses de néré par IR et HPLC a montré qu'elle est riche en tanins, notamment en acide gallique, épicatechine et épigallocatechine gallate [46].

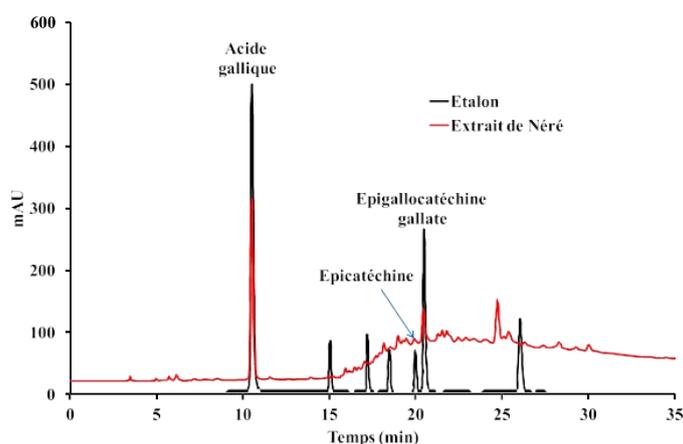


Figure 9 : Chromatogramme de l'extrait de néré [46]

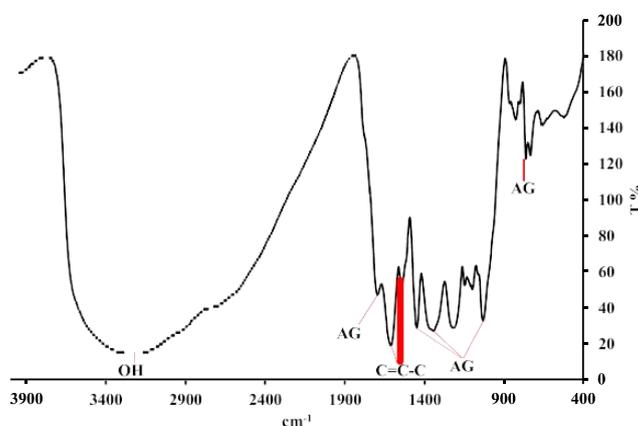


Figure 10 : Spectre infrarouge de la décoction de néré sec [46]

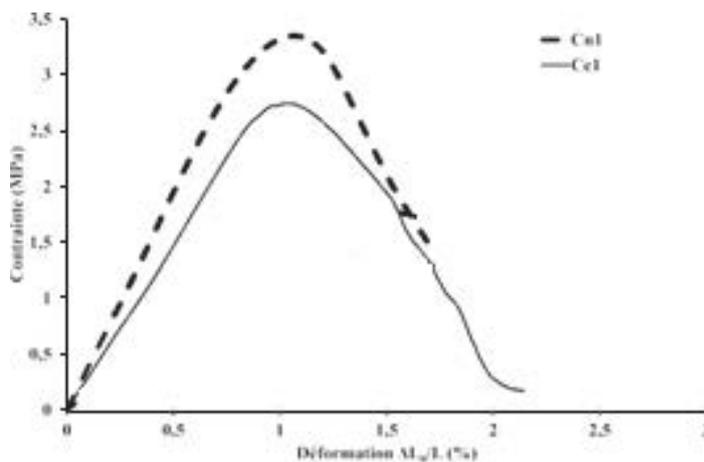


Figure 11 : Courbes de comportement en compression [46]

La comparaison des valeurs associées aux nuances Ce1 (adobe sans décoction de néré) et Cn1 (adobe avec décoction de néré) indique un effet rigidifiant induit par l'ajout de la décoction (augmentation du module d'élasticité,  $E$ ). L'augmentation de la rigidité, serait due aux tanins, qui participent à maintenir une densité, de contacts plus grands entre les grains.

## 8. Propriétés mécaniques du banco

### 8.1. Densité sèche

La densité sèche du sol est le rapport entre sa masse et son volume mesuré à l'état sec (après la cuisson au four à 105 °C) (NF P 94-093).

La densité d'un sol de terre comprimée dépend de plusieurs variables physiques : la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. Cependant, les propriétés de la terre comprimée sont plus influencées par la teneur en eau que par tout autre paramètre [47]. Presque tous les sols présentent une relation similaire entre la teneur en eau et la densité sèche lorsqu'ils sont soumis à une contrainte de compactage donnée (figure 12).

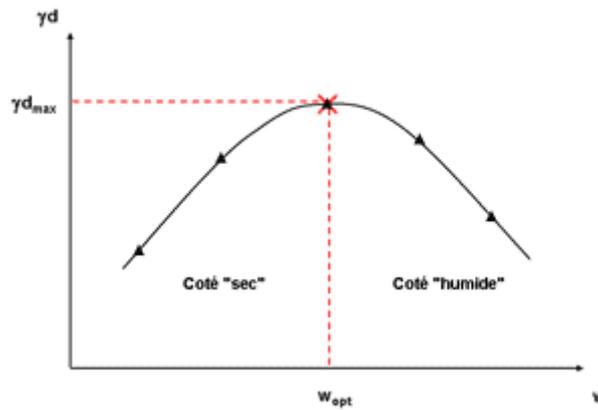


figure 12: variation du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau lors d'une opération de compactage [47]

La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice des vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale. Un sol 'trop sec' sera le siège de frottements importants entre les grains de sol. Un sol trop humide, cependant sera moins susceptible d'être compacté car une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol.

La détermination de la teneur en eau optimale TEO est faite en laboratoire. En géotechnique routière, la recherche de la TEO est obtenue à l'aide de l'essai de Proctor, qui applique un compactage dynamique est mieux adapté aux sols pulvérulents. Cet essai ne serait pas conseillé pour les sols argileux, car il entraîne une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en terme de densité [48].

Des études montrent qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux [49]. De ce fait, l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des blocs d'adobe. En effet, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il semble ne pas exister de relation entre l'énergie Proctor et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs de terre en adobe [50].

Il vaut mieux insister sur la démarche la plus correcte et aussi utilisée sur chantier, qui est de trouver la teneur en eau optimum avec la presse à bloc directement [51]–[54].

## 8.2. Résistance à la compression

### 8.2.1. Paramètres d'influence

La résistance à la compression uniaxial de la terre est déterminante pour le dimensionnement des ouvrages. Plus la résistance est élevée, plus l'épaisseur des murs pourra être faible pour une hauteur de bâtiment donnée. C'est d'ailleurs la seule propriété mécanique faisant l'objet d'exigences réglementaires fortes.

Il a été démontré dans plusieurs études que pour une terre donnée, la résistance à la compression augmente avec la masse volumique [49], [50], [55]–[65]. C'est ce qui justifie l'essai de Proctor : on recherche la quantité d'eau optimale qui conduit à la plus grande densité de la terre compactée, car cela correspond également à un optimum de résistance.

Cependant l'effet de la densité sur la résistance n'est pas flagrant quand on compare des matériaux différents. Hall et Allinson montrent en 2004 qu'avec des mesures faites sur des terres reconstituées à partir des mêmes constituants élémentaires utilisés dans des proportions différentes, les éprouvettes plus denses ne sont pas systématiquement plus résistantes [66]. La densité n'est donc pas un paramètre suffisant pour déterminer la résistance en compression d'une terre.

La nature des argiles présentes dans le matériau joue un rôle important sur la résistance. Ainsi, les densités sèches des matériaux étudiés par Myriam Olivier à base de montmorillonite sont beaucoup plus faibles qu'avec le kaolin, pour des résistances pourtant beaucoup plus élevées [50]. Cela a été confirmé dans le projet Terra : cette étude montre que le ratio montmorillonite/kaolinite a une grande influence sur la résistance [67]. Cela est sans doute à mettre en regard de la grande surface spécifique qui favorise le développement des forces capillaires. La montmorillonite renforce également les forces électro-chimiques et électro-statiques [68]. Ces observations sont généralisables à d'autres argiles : une surface spécifique et une capacité d'échange cationique élevées améliorent la cohésion de la terre, et donc sa résistance à la compression.

Plusieurs auteurs ont caractérisé l'influence de l'humidité relative ou de la teneur en eau sur la résistance à la compression: ils ont observé des résistances plus faibles pour une

hygrométrie ou une teneur en eau plus élevée [50], [69]–[73]. Cela est attribué à la diminution de la succion quand la teneur en eau augmente, phénomène bien étudié en mécanique des sols [74], mais également au fait que l'eau lubrifie les points de contact entre les grains de l'empilement : le coefficient de frottement interne du matériau diminue quand la teneur en eau augmente.

La teneur en eau a une influence sur la succion donc sur les forces capillaires (hypothèse de Heath et coll.) [75], mais également sur les frottements entre les grains de l'empilement. Elle modifie sans doute également l'intensité des liaisons physico-chimiques entre plaquettes argileuses. Une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine de la cohésion de la terre, et de leurs influences respectives, est nécessaire pour aller plus loin.

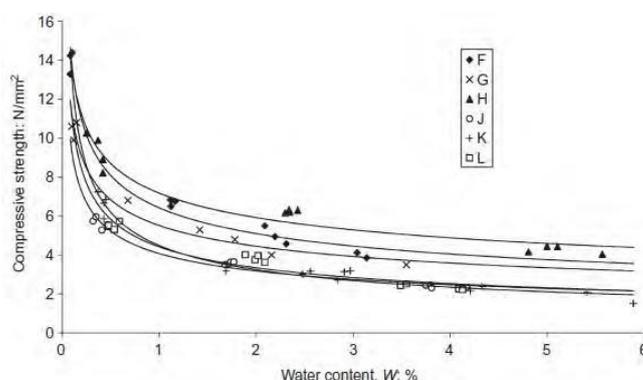


Figure 13 : Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression de briques crues [259]

Les paramètres suivants améliorent la résistance à la compression : une densité élevée, une faible teneur en eau, une teneur élevée en argile et en limon, une grande surface spécifique des argiles, une bonne homogénéité, de petits grains.

### 8.2.2. Mesures et valeurs recensées

La principale propriété mécanique de la terre qui intéresse les constructeurs est sa résistance à la compression simple. Pour la mesurer, il existe de nombreuses procédures de test disponibles qui ne conduisent malheureusement pas aux mêmes résultats pour les mêmes types de matériaux [62], [70]. Dans la plupart des cas, les conditions expérimentales influencent les résultats et ce n'est pas la résistance intrinsèque à la compression du matériau qui est mesurée. Ainsi, ces valeurs ne peuvent pas être utilisées de manière comparative.

À ce jour, il existe un manque flagrant de directives techniques formelles concernant les essais en laboratoire sur les adobes. La terre non cuite est exclue des clauses des normes utilisées internationalement se rapportant aux matériaux de maçonnerie [76], [77]. Il existe des méthodes d'essai normalisées pour évaluer la résistance à la compression non confinée des sols cohérents [78], [79] et elles ont été utilisées pour étudier la réponse des composites à base d'argile renforcée par des fibres (par exemple [27], [80]–[85]). De telles procédures, cependant, examinent les matériaux en terre dans le cadre de la géo-mécanique, plutôt que dans le contexte d'applications de construction communes.

Des recommandations utiles peuvent être trouvées dans les documents de directives nationales élaborés par certains pays et États [69], [86]–[89]. Ces documents comprennent des références spécifiques aux méthodologies de test et prescrivent des valeurs de résistance admissibles. Malheureusement, il y a peu de consensus parmi les procédures décrites et les limites fixées [62]. En outre, leur généralisation est discutable, en raison de l'hétérogénéité des matériaux en terre, et des différentes techniques de production rencontrées dans chaque région.

À la lumière de ce qui précède, l'essai de résistance à la compression des adobes a largement reposé sur des procédures développées pour d'autres types d'unités de maçonnerie, dont la majorité a des propriétés et une microstructure significativement différentes.

Les précautions suivantes doivent être prises afin de mesurer correctement la résistance à la compression de la terre [48], [62], [70], [90]–[92]:

- Choisissez des dimensions d'échantillon supérieures à 5 fois la taille des particules plus grosses.
- Choisissez un format d'image compris entre 1,5 et 2.
- Obtenir des échantillons homogènes.
- Laisser les échantillons se stabiliser dans les conditions hygrothermiques souhaitées.
- Enduire les échantillons d'un matériau aussi rigide que la terre (un mortier de terre fine, par exemple) afin d'obtenir des surfaces lisses et parallèles.
- Utilisez une rotule au-dessus de la plaque supérieure de la presse si les surfaces ne sont pas parfaitement parallèles.

- Lubrifiez le contact entre l'échantillon et les plaques de presse pour réduire la friction.

Pour obtenir une répartition uniforme de la charge à la compression, il est possible de recouvrir les surfaces des éprouvettes de contreplaqué [93], de mortier [59], [94] ou d'une couche de sable [84], [95]. Alternativement, un lissage des irrégularités par abrasion [96] peut être effectué.

Pour mesurer la loi de comportement et le module d'élasticité des éprouvettes, il faut prendre soin de mesurer la déformation au milieu des échantillons (à l'aide de jauges de contrainte par exemple) pour éviter les effets de bord et la déformation causée par un système anti-friction [73].

Les échantillons sont généralement testés dans la direction dans laquelle ils seront posés pendant la construction. La charge de compression est imposée suivant une procédure de charge [33], [97] ou de déplacement [39], [95], [98].

La résistance à la compression ( $f_{bc}$ ) est estimée pour les éprouvettes prismatiques comme (suivant la norme NF EN 13286-41 [79]):

$$f_{bc} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

où  $P$  est la charge maximale exercée et  $A$ , la section transversale de l'échantillon.

Les données obtenues des cylindres sont traitées conformément à la norme ASTM D2166-06 [78]:

$$f_{bc} = \frac{P}{A_c} \quad | \quad A_c = \frac{A}{(1 - \varepsilon_c)} \quad (3)$$

La section transversale ( $A_c$ ) utilisée dans l'estimation de la contrainte de compression à une étape de déformation est corrigée. Dans cette équation,  $A$  est la section d'origine de l'échantillon et  $\varepsilon_c$  est la déformation axiale à l'étape de déformation. La correction tient compte des importantes déformations latérales générées par le chargement.

La grande variété de formes et de tailles d'échantillons testées conduit à s'interroger sur les effets de la géométrie sur les résultats obtenus. Cependant, dans la pratique, les effets de

retenue sont généralement négligés et la résistance moyenne à la compression est simplement exprimée après une analyse statistique des résultats. Par conséquent, la comparaison directe des résultats obtenus par différents chercheurs n'est pas toujours possible.

Des différences considérables se produisent également dans le traitement des échantillons avant le test. Les échantillons peuvent être stockés dans des conditions thermo-hygrométriques stables pendant un certain temps [33], [34], [39], [95], séchés au four à une certaine température jusqu'à un poids constant [99], ou placés à l'extérieur, exposés au soleil ou à l'ombre, afin de reproduire les conditions de production traditionnelles [97], [100]. Le durcissement des éprouvettes dans des sacs de jute humides et la mise en œuvre d'essais après 28, 72 et 96 jours de coulée ont également été relevés [101].

Les résultats des essais de compression rapportés dans la littérature varient de 0,6 à 8,3 MPa, les valeurs les plus courantes étant comprises entre 0,8 et 3,5 MPa avec une moyenne de 1,5 MPa pour le pisé [48], [55], [70], [72], [73], [102]–[109]. Les limites de résistance les plus faibles fixées dans les documents de la directive nationale vont de 1,2 [87], [88] à 2,1 MPa [89]. Outre la simple détermination de la contrainte de rupture, des modèles constitutifs décrivant la réponse contrainte-déformation compressive des adobes ont également été développés [96], [110].

### 8.3. Résistance à la traction

La résistance à la traction de la terre est très faible, donc les ouvrages en terre sont généralement dimensionnés de sorte que le matériau ne subisse que des contraintes de compression. Elle est mesurée, par des essais indirects comme le fendage ou la flexion 3 points.

Parfois elle est mesurée pour déterminer de manière indirecte la résistance à la compression, à partir d'un ratio plus ou moins fiable entre ces deux résistances. L'intérêt est qu'il est beaucoup plus simple de mettre en place sur le terrain, avec un matériel limité, des essais de fendage ou de flexion que des essais de compression.

Les rares mesures montrent que la terre a une résistance en traction de l'ordre de 0,1 à 0,5 MPa[111]–[115].

Il n'y a en général pas d'exigence réglementaire concernant la résistance à la traction de la terre, puisqu'on la considère trop faible pour être prise en compte dans les calculs de dimensionnement. Seule la Nouvelle Zélande impose que la plus faible des résistances à la flexion mesurées sur 5 échantillons soit supérieure à 0,25MPa.

En l'absence d'essais, plusieurs normes comme par exemple la norme australienne, considèrent une résistance à la traction nulle pour la terre. En Nouvelle Zélande, la norme propose de prendre une valeur de 0,1 MPa pour la résistance caractéristique à la flexion en l'absence d'essai, ou de l'estimer comme étant le dixième de la résistance caractéristique à la compression [102], [116] .

#### 8.4. Module de d'Young et Coefficient de poisson

Le module de Young de la terre est difficile à mesurer à partir d'un essai de compression, et nécessite une mesure de la déformation locale suffisamment précise. Il est donc très difficile de trouver des valeurs fiables du module élastique de la terre dans la littérature.

D'après différentes techniques de mesure sur différentes terres, le module de Young de la terre crue se situe entre 1 et 6 GPa. Il est d'autant plus élevé que la porosité et la teneur en eau sont faibles, la teneur en argiles et la surface spécifique sont élevées. Toutefois les liens entre la composition de la terre, sa microstructure et son module élastique ne sont pas clairement établis.

Les valeurs de module recommandées par les normes sont variables et dans l'ensemble plutôt faibles, en- dessous du GPa. Ce module souffre d'un manque de définition clair : comment le mesurer ? Est-ce le module de Young qui intéresse les bâtisseurs, ou un module apparent dans certaines conditions de sollicitations ?

Beaucoup d'auteurs considèrent que le module élastique correspond à la pente de la courbe contrainte- déformation obtenue en chargement monotone, mais ne font pas des mesures suffisamment précises de la déformation pour détecter le réel domaine élastique initial, dans lequel il n'y a pas encore de déformation plastique. Ils déterminent alors un module tangent

Et tel que défini par Bui et Kouakou [55], [100], [117], [118]. Il s'agit d'un module apparent, élastoplastique, et entaché d'erreurs du fait que la déformation est mesurée de manière globale entre les plateaux. On trouve dans la littérature des valeurs de  $E_t$  comprises entre 60 et 450 MPa, mais qu'il est impossible de comparer entre elles à cause du manque de fiabilité des mesures de déformation.

## 9. Les silos

### 9.1. Conception des silos

Les silos sont des structures répandues utilisés pour stocker toutes sortes de produits agricoles : céréales, sucre, farines. Il en existe différents types, en fonction de leur forme (carrée ou circulaire) ou des matériaux de construction (béton ou acier).

Il existe donc une abondante littérature sur la conception des silos [119]–[123]. Les livres de Brown et Nielsen [124], [125] résument toutes les lignes expérimentales réalisées récemment sur la recherche sur les silos. Plusieurs aspects sont considérés, tels que le comportement du matériau stocké, les conditions d'écoulement lors de l'exploitation d'un silo, les essais réalisés dans des silos expérimentaux ou les modèles numériques développés pour analyser les actions sur les parois des silos. Certaines méthodes analytiques [126]–[128] sont également proposées pour la conception de silos.

Au cours des 100 dernières années, de nombreux accidents et explosions se sont produits, souvent en raison d'un manque de connaissances sur le comportement de ces structures. De nombreuses études ont été entreprises dans le monde entier pour accroître la sécurité dans la conception des silos. Une vue d'ensemble de ces travaux peut être trouvée dans les publications de Ayuga, Ooi et Rotter [129]–[132]. À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la recherche sur les silos a commencé à cause de la recrudescence des accidents. Malgré le succès de la théorie des frères Reimbert [133] qui a été proposée après le travail de Janssen [134], cette théorie est encore utilisée dans la plupart des normes actuelles de conception des silos [135]–[137].

Le rapport de pression latérale moyen,  $K$ , est l'un des paramètres les plus importants de l'équation de Janssen, qui peut affecter de manière significative les pressions exercées sur

les parois des silos. En raison de son importance, de nombreuses propositions [123], [138]–[142] (Koenen, Pieper et Wenzel, Walker, Walters, Jenike) ont été faites pour déterminer sa valeur.

### 9.2. Essais expérimentaux dans les silos

Au milieu du 20<sup>ème</sup> siècle, de nombreux tests ont été effectués dans des silos expérimentaux. À la suite de ces recherches, on a pu constater que des pressions plus fortes que celles prédites par l'équation de Janssen pouvaient apparaître [143], [144], surtout pendant le processus de décharge [133], [142], [145]. En conséquence, l'équation de Janssen n'était appropriée que pour prédire les charges de remplissage sur les silos car la pression de vidange maximale pouvait atteindre jusqu'à quatre fois la pression de remplissage maximale.

D'autre part, de nombreux chercheurs [146]–[151] ont signalé que des pressions asymétriques peuvent apparaître pendant le processus de remplissage et la méthode de remplissage influence les pressions sur la paroi. Des pressions plus importantes que prévu sur les parois du silo peuvent apparaître.

### 9.3. Comportement des matériaux granulaires

Le comportement des matériaux granulaires est assez complexe car ils peuvent supporter la résistance au cisaillement et la charge pendant les états statiques, mais ils coulent avec une déformation de masse dans les processus dynamiques (remplissage et vidange). De plus, les matériaux granulaires dépendent généralement du chargement et de la vitesse de chargement [152]. Il est nécessaire de connaître le type de chargement pour déterminer l'état de contrainte du matériau, car il n'y a pas de corrélation unique entre les contraintes et les déformations. Le matériau présente une réponse différente en fonction du taux de charge lorsque les contraintes dépassent la limite élastique.

La principale caractéristique des matériaux granulaires est que certaines déformations non réversibles apparaissent lorsque le niveau de contrainte est supérieur à une certaine limite, appelée limite élastique. En revanche, en dessous de la limite élastique, toutes les déformations sont réversibles. En raison de cette complexité, de nombreux modèles

mathématiques ont été développés pour simuler le comportement des matériaux granulaires. Des modèles élastoplastiques ont été proposés pour les matériaux granulaires par Drucker et Prager, et Lade [153], [154]. Les modèles élastoplastiques peuvent mettre en œuvre certains phénomènes communs associés à ces matériaux, comme la dilatance ou déformations plastiques permanentes. Une autre théorie, celle de l'hypoplasticité a été aussi développée pour les matériaux granulaires [155]–[159].

#### 9.4. Méthodes numériques de calcul des silos

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique appropriée pour analyser le comportement structurel des silos. La simulation de l'interaction entre la paroi et la matière ensilée ou l'analyse des excentricités géométriques est possible grâce à cet outil [129], [160]–[162]. Cependant, une large variation dans la prédiction des pressions latérales est observée comme l'ont montré les travaux de Rotter et Holst [163], [164]. Ces pressions latérales sont essentielles à la conception structurelle des silos [135], [165], [166].

Le développement d'approches pratiques pour la modélisation par éléments finis des silos pourrait constituer une étape importante vers la solution des problèmes dans les silos, et les détails des procédures appropriées (et inadaptées) pourraient aider à harmoniser les résultats. Plusieurs travaux sur la modélisation par éléments finis des silos ont contribué à une meilleure conception de ces ouvrages [131], [163], [167]–[172].

Au milieu des années 90, l'équipe de recherche dirigée par le professeur J. Joffriet à l'Université de Guelph a amélioré les modèles numériques pour les silos. Tout d'abord, ils ont développé des modèles EF qui pourraient analyser la vidange d'un silo [173]. Ensuite, ils ont mis en œuvre un modèle d'éléments discrets pour les silos [174], [175]. Enfin, ils ont proposé le premier modèle hybride pour les silos [176]–[178], qui utilise à la fois les méthodes des éléments finis et discrets. Dans ce modèle, le silo complet est simulé selon le modèle des éléments finis, à l'exception des zones de transition et du matériau granulaire, où la méthode des éléments discrets (MED) a été utilisée.

Au cours des trois dernières décennies dans la recherche sur les silos, des contributions significatives, à la modélisation numériques, ont permis d'analyser l'influence du modèle de

comportement du matériau stocké, la géométrie du silo ou la possibilité de simuler un processus de remplissage et de vidange. Cependant, peu d'analyses sur des aspects spécifiques des codes éléments finis ont été publiées. Keiter, Rombach, Davalos et Zheng [148], [165], [179]–[183] ont analysé l'influence de la taille et du type de l'élément sur les pressions latérales sur la paroi notamment dans les zones de transition. Aussi, les modèles numériques n'ont pas pris en compte de nombreux aspects dans les études de remplissage progressive, par exemple, le nombre de couches utilisées pour remplir le silo ou l'excentricité de remplissage. Beaucoup de modèles numériques existants ne considèrent pas le remplissage du silo en différentes étapes (progressif), mais impliquent un remplissage de la masse d'un coup. En outre, peu d'informations publiées expliquent la procédure utilisée pour générer ces modèles.

## 10. Synthèse

Pour répondre à la récurrente question de rupture de stock de produits vivriers au Nord-Ouest du Bénin, une région pourtant productrice d'abondante céréales, et face à la non adoption des moyens de stockages modernes, l'amélioration de la capacité de stockage des greniers traditionnels en terre, se trouve être une alternative efficace. Dans le cadre de la construction de ces greniers traditionnels, les populations utilisent les tiges de paille de riz dans le sable argileux pour remédier à sa faible résistance. La décoction de néré est utilisée comme un adjuvant étanchéisant.

De nombreux travaux scientifiques sur ces différents matériaux soient disponibles dans la littérature, néanmoins, des études détaillées sont nécessaires pour évaluer les propriétés intrinsèques des matériaux de base et le comportement du mélange, car les structures en terre sont fortement spécifiques au milieu de prélèvement, en fonction des techniques de confection.

Bien que les performances de la terre soient avérées, certaines insuffisances ont été notées [21], [184]–[186]. Ainsi, pour atteindre certaines conditions minimales de résistance mécanique et thermique en cours d'utilisation, il faut une paroi épaisse, cela induit un risque élevé de fissuration lors du séchage, et donc des retraits significatifs. L'amélioration des

propriétés mécaniques de la terre avec des fibres de déchets agricoles offre la possibilité de construire des maisons plus robustes et confortables dans les pays en développement [33], [85], [99], [101], [187]–[189].

Peu de données expérimentales fiables sont disponibles concernant la stabilisation de la terre de barre abondamment disponible au Bénin par des fibres végétales, la paille de riz en particulier, pour les constructions en banco. Ce constat met en évidence le besoin d'expérimentation sur l'effet de l'introduction des fibres végétales, et en particulier la paille de riz, et la décoction de néré sur les propriétés mécaniques du matériau terre.

Nous avons ensuite passé en revue les techniques de conception des silos avec une bonne prise en compte de l'action des grains sur la paroi. En effet, le principal problème dans la conception du silo est que la charge du matériau stocké doit être déterminée avec précision surtout dans les phases opérationnelles afin que l'épaisseur de paroi appropriée puisse être calculée. L'utilisation de méthodes numériques pour l'étude des pressions et des caractéristiques d'écoulement dans les silos vient résoudre ce problème de prédiction par une meilleure simulation du comportement des grains. L'une de ces méthodes, la méthode des éléments finis a été utilisée avec un certain succès pour prédire les pressions et les modèles d'écoulement générés dans les silos. Cependant, relativement peu de calculs ont été faits pour les silos de formes particulières tel que les ovoïdes comme les silos traditionnels de stockage de céréales rencontrés au Nord-Bénin.

# Comportement mécanique du composite argile-paille

## SOMMAIRE

---

1. Introduction .....	32
2. Propriétés physiques et mécaniques de la paille de riz .....	32
3. Propriétés physiques de la terre de barre.....	35
4. La décoction de néré .....	38
5. Confection des échantillons.....	39
6. Effet de la teneur en paille de riz sur la masse volumique et le retrait au séchage du banco.....	41
7. Influence de la proportion de paille sur les propriétés mécaniques du banco .....	42
8. Influence de la décoction de néré sur les propriétés mécaniques du banco .....	46
9. Proportion optimale de mélange .....	47
10. Conclusion.....	50

---

## 1. Introduction

Pour construire les silos traditionnels (greniers de stockage de céréales) en terre, les populations du Nord-Ouest du Bénin utilisent les tiges de pailles de riz pour stabiliser le sable argileux. Le banco, matériau de construction de ces greniers, est un mélange de sable argileux, de tiges de paille de riz, d'eau et de décoction de néré (*Parkia Biglobosa*). L'efficacité de ce composite est prouvée à travers la longévité (plus de 50 d'âge) qui caractérise les greniers et les tatas Somba du Bénin et du Togo.

Un des freins à la conception de ces greniers est la non-maîtrise des dosages des constituants du banco, particulièrement, la quantité de tiges de paille de riz et de décoction de néré.

Ce chapitre est consacré à la détermination de la quantité de tiges de paille de riz et de décoction de néré permettant d'optimiser les performances technologiques et mécaniques du composite. Outre la caractérisation des matériaux de base, on présentera aussi l'ensemble des formulations étudiées. Diverses compositions ont été considérées avec des concentrations massiques variant de 1,5% à 3,0% et de 4,0% à 8,0% de la masse sèche de sable argileux, respectivement en paille de riz et en décoction, pour confectionner des éprouvettes prismatiques 4x4x16 et cylindriques 5Øx10H. Les moules utilisés sont inspirés du modèle de Guettala, formant avec la presse, une combinaison d'extrusion-compression, avec une énergie de compactage contrôlée.

L'analyse et à l'interprétation des résultats de ce programme expérimental a pour but, l'étude de l'effet de la présence de la paille de riz et de la décoction sur les propriétés physiques et mécaniques du banco.

## 2. Propriétés physiques et mécaniques de la paille de riz

Pour la construction des greniers, des graminées sauvages peuvent-être utilisées mais souvent la paille de riz ou de fonio sont préférées.

La paille de riz est abondante dans les régions du nord et du sud Bénin où des rizeries sont installées. Les pailles de riz utilisées proviennent de la Riziculture de Zinvié.

La longueur initiale de la paille variait entre 5 et 60 cm. On compte 5 à 6 nœuds sur la plante à maturité.

Les entre-nœuds, qui représentent environ 50% de la masse de la paille, lui donnent sa résistance mécanique alors que les nœuds et les feuilles qui contiennent plus de minéraux et moins de cellulose que les entre-nœuds ont une tenue mécanique moins bonne [41], [42].

Chaque paille de riz a été débarrassée de ses feuilles non résistantes et ce n'est que la tige elle-même qui a été ensuite coupée en  $3\text{cm} \pm 1$ .



Figure 14 : la paille de riz hachée

La paille est conservée au laboratoire dans les mêmes conditions de conservation du sol.

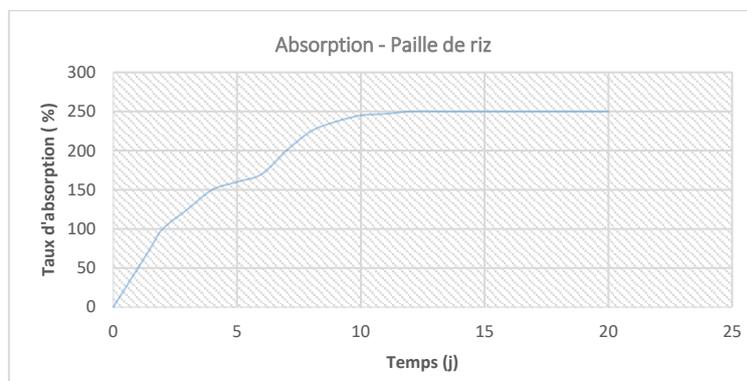


Figure 15 : cinétique d'absorption d'eau de la paille de riz

La cinétique d'absorption d'eau a été étudiée pour évaluer sa sensibilité à l'eau (Figure 15).

La paille de riz a une absorption d'eau relativement élevée qui est de 252%.

Pour la confection des éprouvettes, la paille a été utilisée après avoir été préalablement immergée dans l'eau, afin d'éviter le phénomène d'absorption d'eau dans la matrice argileuse.

Tableau 1 : caractéristiques physiques de la paille

Caractéristiques	Unité	Valeurs
Masse volumique apparente	Kg/m <sup>3</sup>	90
Absorption d'eau	%	252
Diamètre	mm	3
Longueur	mm	20-40

La paille dans une matrice argileuse joue le rôle de renfort [34], [115], [190], [191]. Pour mieux comprendre le comportement mécanique du banco, et le rôle que joue la paille de riz dans ce mélange, nous avons sollicité la paille en traction.

Afin de déterminer le comportement mécanique en traction de la paille, trois séries de mesures sont réalisées sur des tiges selon la direction axiale à l'aide d'une machine d'essai de traction RP 100 TR/AC.

Des tiges de riz de 10 cm de longueur sont découpées. À l'aide d'un dispositif de pinces raccordé à la presse, chaque tige est tirée jusqu'à sa rupture.

La Figure 16 montre une courbe contrainte-déformation type obtenue sur un échantillon de paille.

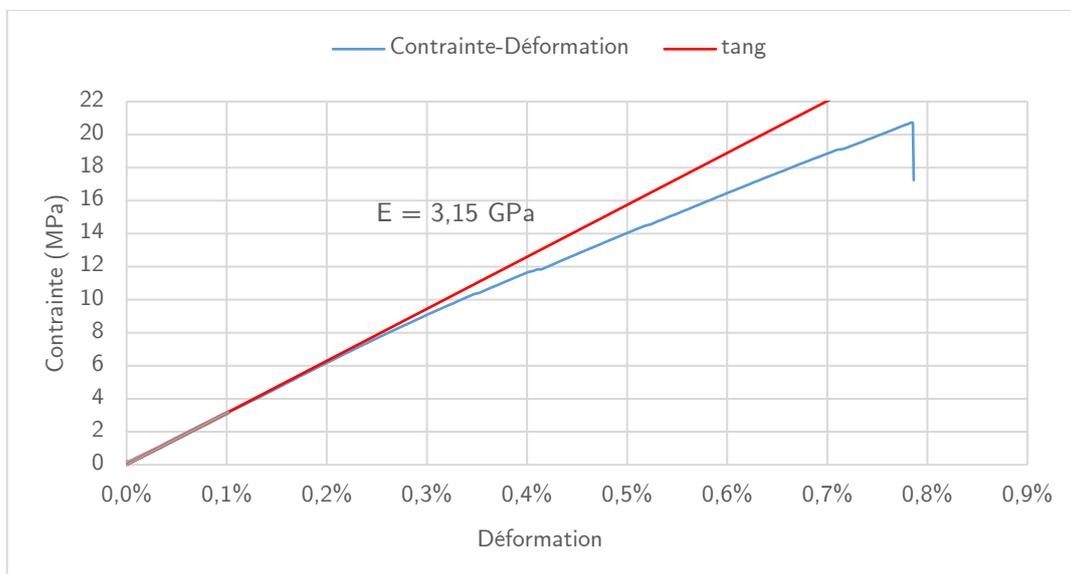


Figure 16 : courbe contrainte-déformation en traction directe --- paille de riz (Zinvié)

Dans cet essai de traction de la paille, on constate :

- Un comportement quasi élastique linéaire (domaine de déformation élastique),

- Un comportement plastique (zone de striction)

Dans cette série d'essais, la zone d'élasticité se termine lorsque la contrainte est comprise entre 04 MPa et 06 MPa soit pour une déformation relative comprise entre 0,1 et 0,2%. Le module de Young longitudinal moyen est de 3,15 GPa avec 5,8% d'écart-type. La déformation plastique se poursuit jusqu'à la rupture des tiges de paille. Ces valeurs concordent avec les travaux de Dogherty et Tavakoli sur la caractérisation des propriétés mécaniques de la paille de riz [41], [42].

L'utilisation de cette fibre naturelle végétale pour améliorer la ductilité des adobes est justifiée.

### 3. Propriétés physiques de la terre de barre

Le sol utilisé provient de la commune d'Abomey-Calavi (Bénin) 6°24'50,05''N ; 2°20'19,84''E et 6°25'13,59''N ; 2°20'41,78''E, il est choisi sur la base de sa disponibilité, son abondance dans la région et de sa forte similitude avec l'argile de termitière utilisée pour la confection des greniers au Nord-Bénin [25].

#### 3.1. Composition granulaire

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais : l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon la norme NF EN ISO 17892-4.

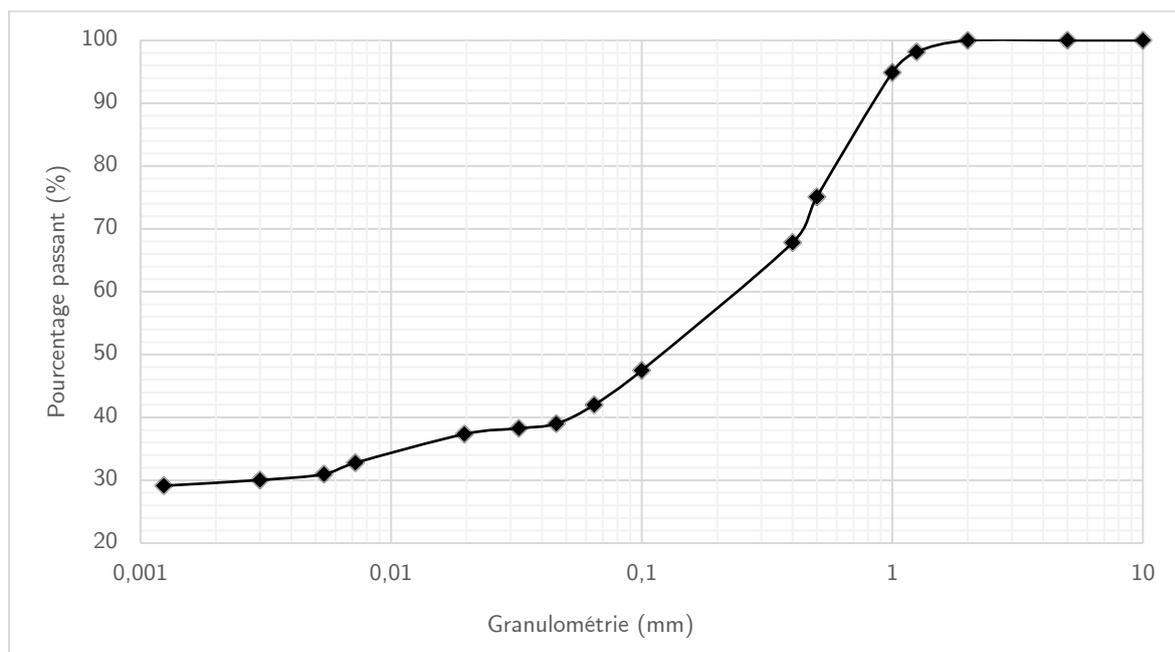


Figure 17 : distribution granulométrique des particules

L'analyse granulométrique par tamisage (Figure 17) montre que le sol prélevé a 53,3% de grains dont le diamètre est supérieur à 0.063 mm : ce qui montre que l'échantillon contient, en moyenne proportion, du sable d'après la classification Atterberg.

Le pourcentage de fines (argile + limon) contenues dans le sol est de 46,67%, compris entre 20 et 50% comme recommandé pour les constructions en terre [16], [25].

### 3.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de leur teneur en eau.

Les essais selon la procédure par Casagrande s'effectuent sur le mortier de terre ( $d < 0,4$  mm) selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés au Tableau 2.

Tableau 2 : limites d'Atterberg du sol

Limites d'Atterberg		
Limite de liquidité LL (%)	Limite de plasticité LP (%)	L'indice de plasticité IP (%)
41	23	18

Ces résultats montrent que les limites de plasticité sont dans les limites les mieux adaptés pour les matériaux de construction en terre (XP P 13-901). Le deuxième critère de choix du type de sol pouvant servir pour le banco (indice de plasticité compris entre 12,5 et 29) est vérifié [25].

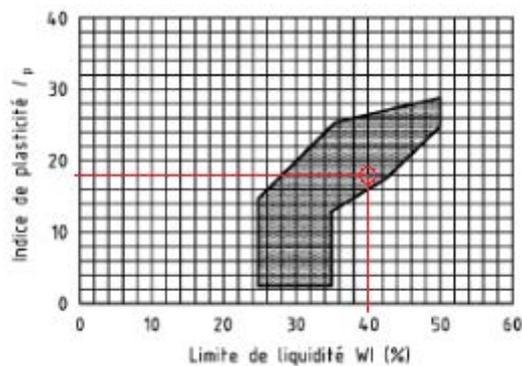


Figure 18 : diagramme de plasticité (XP P 13-901)

### 3.3. Les masses volumiques

Le Tableau 3 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

La masse volumique apparente est la masse de granulat sec remplissant sans compactage un récipient (NF EN 1097-3). La masse volumique absolue est le rapport obtenu en divisant la masse d'un échantillon de granulat séché à l'étuve par le volume qu'il occupe dans l'eau, y compris le volume de tout pore fermé, mais en excluant le volume d'eau présent dans tous les pores accessibles à l'eau (NF EN 1097-6).

Tableau 3 : masses volumiques

Masses volumiques	
Apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Absolute (kg/m <sup>3</sup> )
1220	2600

Ces valeurs concordent avec celles de la littérature [33], [34], [83], [192], [193].

### 3.4. Classification géotechnique

Tableau 4 : granularité du sol

Propriétés	Valeur
Granulométrie	
Sand (2–0.063 mm) (%)	53.33
Silt (0.063–0.002 mm) (%)	16.50
Clay (<0.002 mm) (%)	30.17

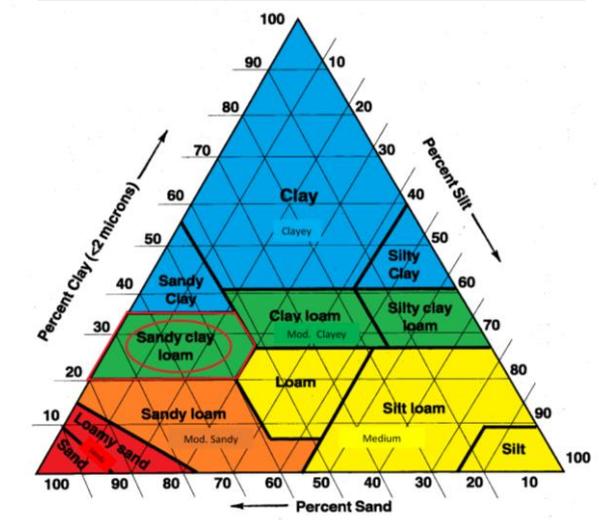


Figure 19 : soil texture triangle

Selon la classification du "triangle des textures" [59], on peut dire qu'il s'agit du limon sablo-argileux (Sandy Clay loam) qui est en général bien adapté pour la stabilisation des sols.

Nous passons, néanmoins un dernier essai pour confirmer l'opportunité de stabiliser ce sol ou non, l'essai de retrait ou le bar shrinkage test.

### 3.5. Essai de retrait

Le bar shrinkage test sert à évaluer le comportement du sol lorsqu'il est séché après avoir été humidifié à un pourcentage d'eau légèrement au-dessus de la limite de liquidité du matériau.

Les taux de retrait pour une série d'essais sont récapitulés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : taux de retrait du sol

Échantillons n°	% de retrait
1	7,58
2	6,68
3	8,93

Le taux de retrait moyen, 7,73 % avec un écart type de 1,13%, est inférieur à 10% comme recommandé dans les travaux de Mrema [16] comme limite au-delà de laquelle un sol ne serait plus stabilisable.

## 4. La décoction de néré

Pour cette étude, la décoction des gousses a été extraite en introduisant 40 g de graines de néré dans 1 litre d'eau pris à la température ambiante pendant 72h. Après filtration, la concentration des tanins dans la décoction a été, estimée à  $(6,33 \pm 0,10)$  g/l en utilisant la méthode de Folin Ciocalteu [194].

## 5. Confection des échantillons

### 5.1. Matériel spécifique

Pour caractériser le comportement mécanique du banco, des séries d'essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques et cylindriques.

L'objectif est de concevoir des moules qui facilitent le moulage et le démoulage de la pâte qui est collante (les adobes étant moulés à l'état plastique). Le moulage des adobes fibrées nécessite de bien tasser la matière dans les coins et de faire s'interpénétrer les fibres.

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu deux moules inspirés du modèle de Guettala [195] qui forment avec la presse, une combinaison de moulage par extrusion-compression. Il s'agit de tubes métalliques en une pièce munis d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange et servir de contre moule pour faciliter le démoulage par extrusion. Ce dispositif a l'avantage de contrôler aisément la contrainte de compactage contrairement au dispositif de moulage manuel. La contrainte appliquée est de 1.5 MPa. La Figure 20 montre le dispositif et un échantillon en cours de démoulage.



Figure 20 : dispositif de moulage et démoulage

## 5.2. Mélanges

Le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux, et la détermination de la teneur en eau optimale pour l'adobe à partir de l'essai Proctor serait inappropriée, car l'énergie de compactage n'est pas la même que celle d'un compactage statique [48], [49], [196]–[198].

Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition en utilisant la presse directement.

Le malaxage du sol à l'eau a été effectué pendant environ deux minutes avant l'ajout de la paille en veillant à une bonne homogénéisation. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage.

À partir de chaque mélange, on réalise une série de trois éprouvettes prismatiques, 40x40x160mm, et de six éprouvettes cylindriques de diamètre 5 cm et de hauteur 10 cm.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la Figure 21 et Tableau 6 avec différentes concentrations en paille de riz et en décoction de néré.

Les échantillons ont été stockés dans des conditions de laboratoire jusqu'à atteindre l'humidité d'équilibre (température 22°C et 60%HR).

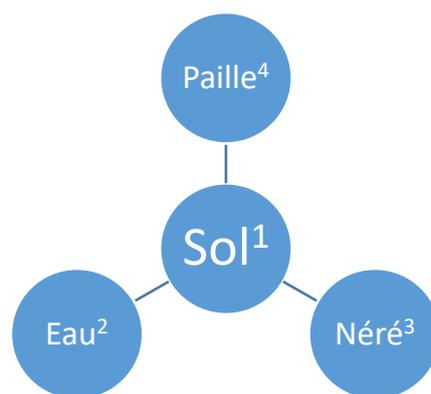


Figure 21 : combinaison des mélanges

Tableau 6 : composition des différents mélanges

Mélange	Composition
M1	Terre + Eau
M2	Terre + Eau + Néré
M3	Terre + Eau + Paille de riz
M4	Terre + Eau + Néré + Paille de riz

## 6. Effet de la teneur en paille de riz sur la masse volumique et le retrait au séchage du banco

Les mesures de l'évolution de la masse volumique du banco en fonction de la teneur massique en fibres, 1,5%, 2%, 2,5% et 3% de la masse sèche de la terre de barre, (pour une contrainte de compactage de 1.5 MPa) sont montrées sur la Figure 22.

La Figure 22 montre une réduction de la masse volumique et du retrait avec l'augmentation de la teneur en fibres. Cependant l'ouvrabilité du mélange est réduite, à mesure que la quantité de paille augmentait.

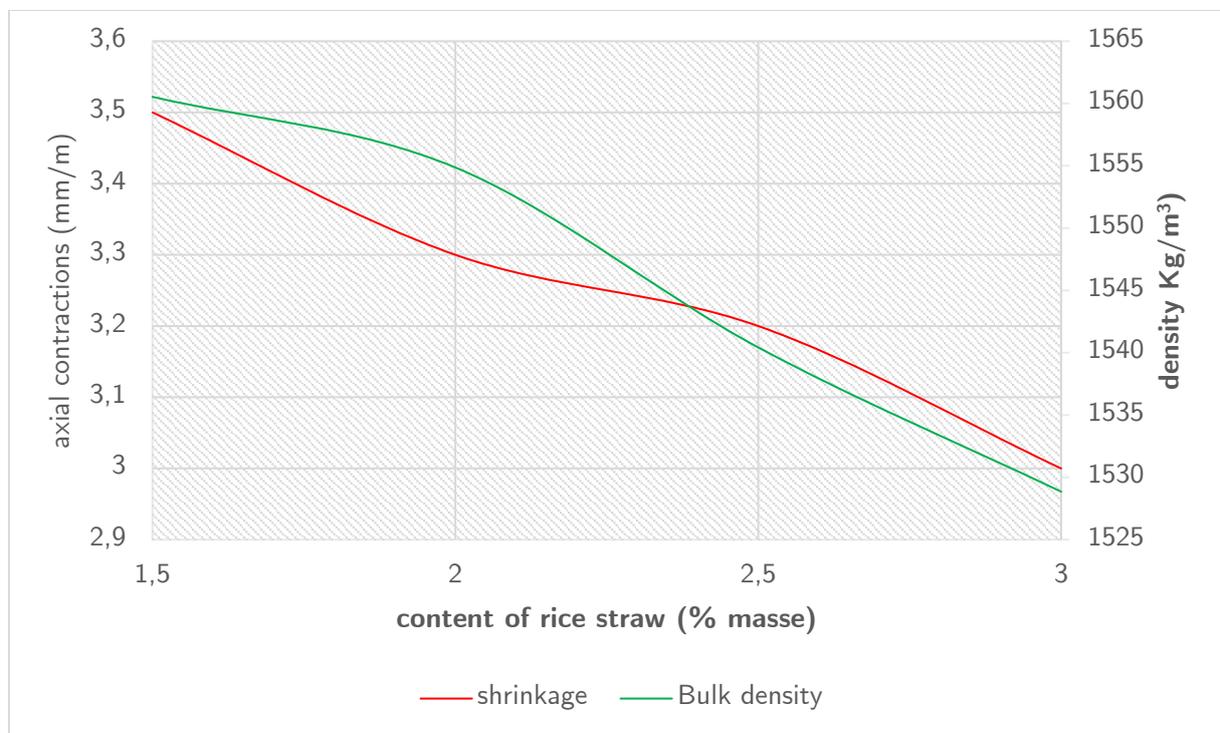


Figure 22 : variation de la masse volumique et du taux de retrait en fonction de la teneur massique en paille

Ces résultats justifient l'utilisation des fibres naturelles dans la fabrication de l'adobe afin de réduire les fissuration de retrait [199].

## 7. Influence de la proportion de paille sur les propriétés mécaniques du banco

Dans cette partie, l'objectif est l'analyse paramétrique des propriétés mécaniques expérimentales des échantillons de terre crue stabilisée avec différentes proportions de paille de riz. Différentes compositions de mélange ont été considérées à partir d'une référence appelée "T" (sous-entendu « Terre + Eau »).

Les autres compositions ont été définies en faisant varier la masse de la fibre de paille (P). Les fractions massiques de tous les mélanges sont indiquées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : fractions massiques des composants pour les différents types de mélange

Mélange	Composition
M1	(T)
M31	(T + 1.5% P)
M32	(T + 2% P)
M33	(T + 2.5% P)
M34	(T + 3% P)

Les essais de flexion sont réalisés sur une presse cimentière 3R. Les demi-prismes obtenus sont rompus en compression sur une presse 3R de capacité 10 KN.

L'essai brésilien s'effectue suivant la norme NF P94-422 sur une éprouvette cylindrique de section transversale circulaire comprimée suivant deux génératrices diamétralement opposées. La force est appliquée suivant le plan défini par les deux génératrices de l'éprouvette en contact avec les plateaux de la presse croît de façon continue et sans à-coups, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Disposer l'éprouvette de telle sorte que son axe soit parallèle aux plans des plateaux de la presse en intercalant un carton de répartition entre chaque génératrice et le plateau correspondant. Les cartons ne doivent être utilisés qu'une fois.

La vitesse de chargement utilisée pour les essais est de 0,1 mm/s. Les dispositifs sont tous équipés d'un capteur de force et de déplacement (Figure 23).

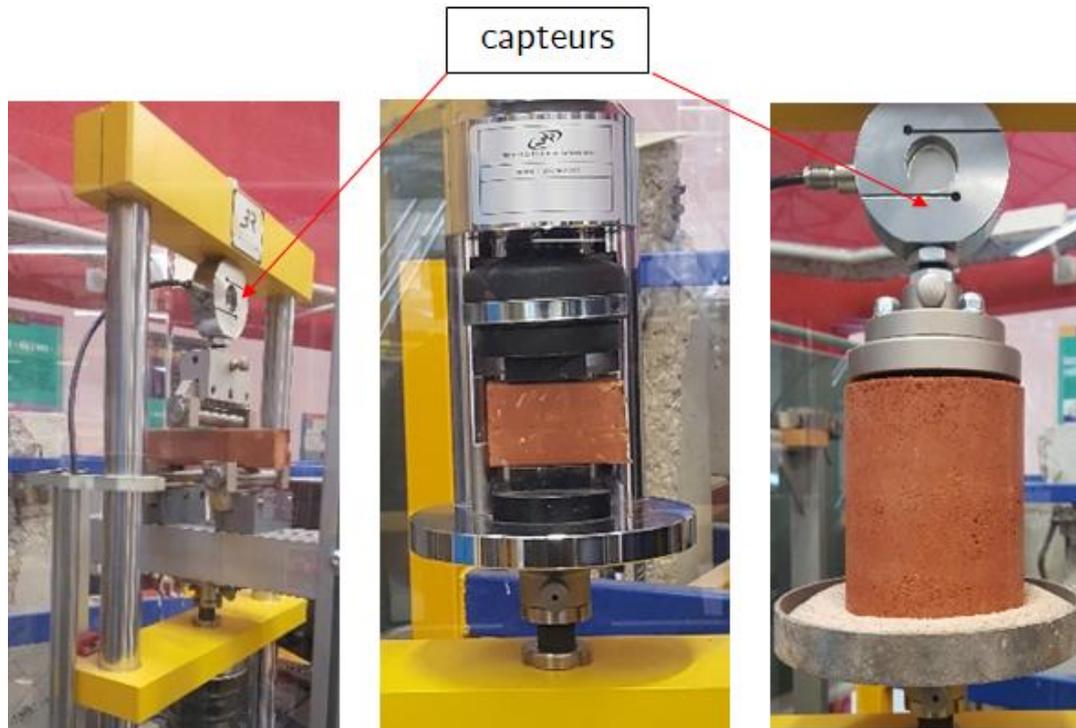


Figure 23 : dispositifs d'essais de flexion et de compression

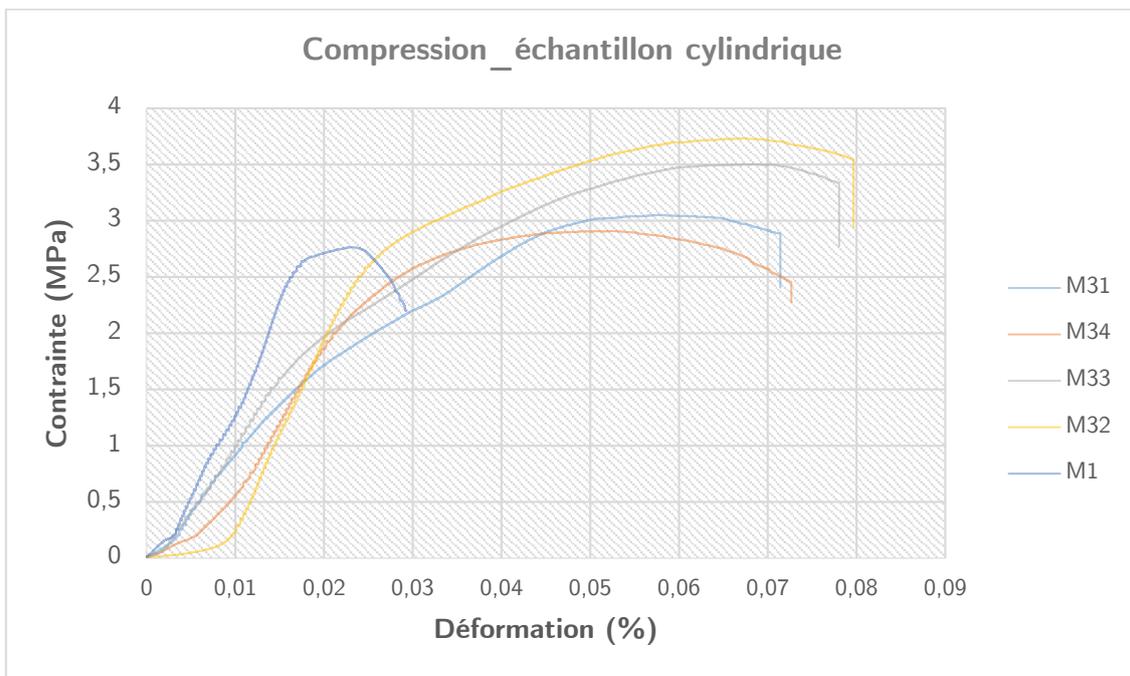


Figure 24 : courbe contrainte-déformation des différents mélanges « terre » et « terre + paille »

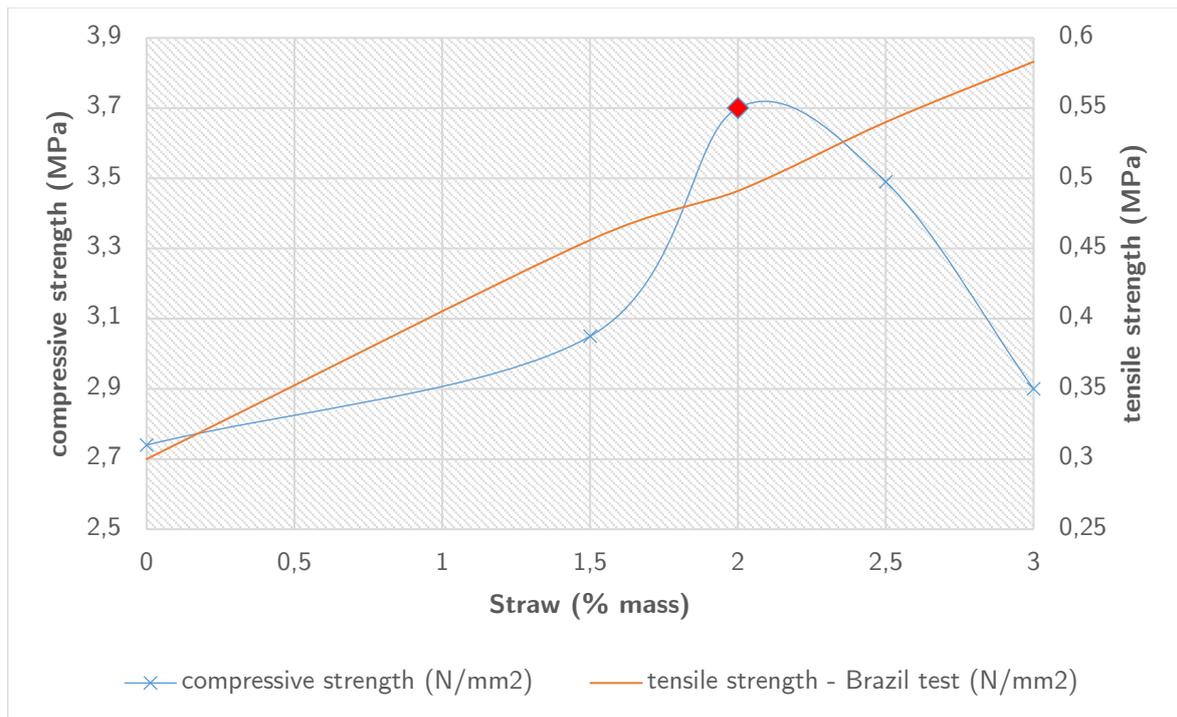


Figure 25 : variation de la contrainte de compression et traction par fendage en fonction de la teneur en paille des éprouvettes cylindriques

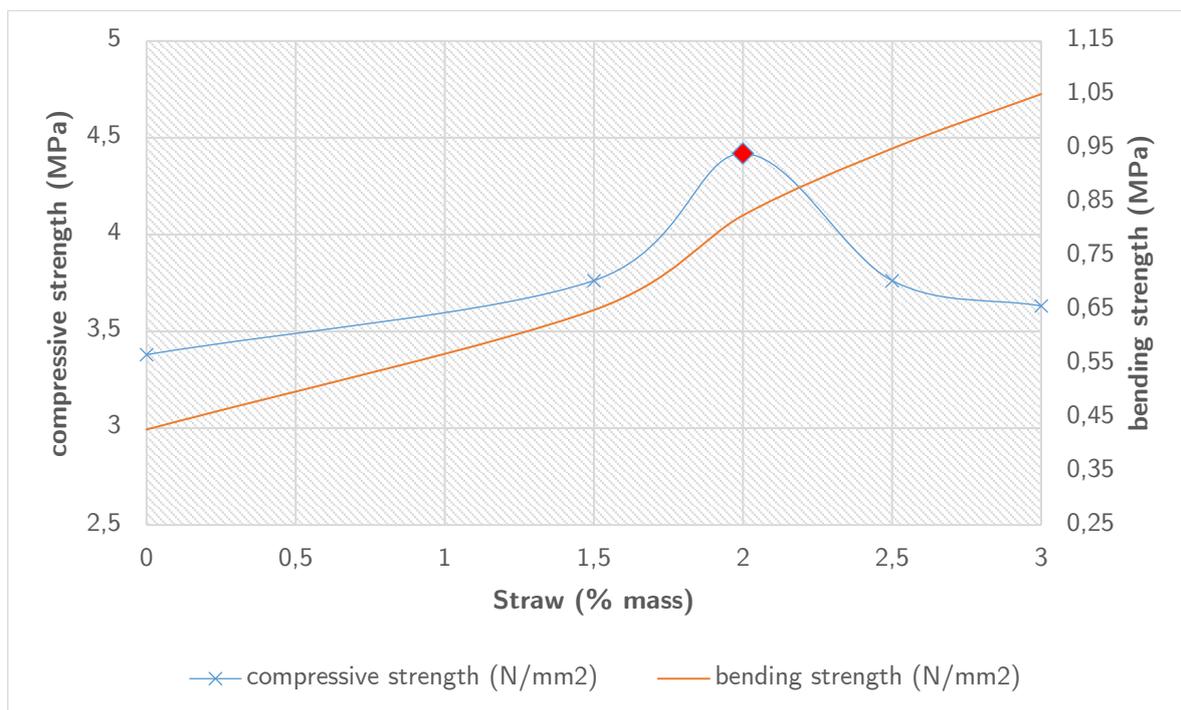


Figure 26 : variation de la contrainte de compression et flexion 3 points en fonction de la teneur en paille des éprouvettes prismatiques

Avec l'augmentation de la quantité de matière végétale dans le mélange, en termes de résistances mécaniques (Figure 25 et Figure 26), on observe une variation qui ne peut être définie par une tendance constante [200].

Ainsi, l'augmentation de la teneur en paille entraîne une variation de Gauss (caractéristique de courbe en cloche) de la résistance à la compression et une augmentation continue de la résistance à la traction.

L'augmentation de la résistance à la traction obtenue dans cette étude concorde avec les résultats trouvés par Millogo et al.[201]–[205]. D'après Millogo et al, les valeurs de la résistance à la flexion des adobes paillés sont plus élevées que celles des adobes sans paille. Ils ont également indiqué que cette augmentation est due principalement à la résistance à la traction élevée des fibres et à la distribution homogène des fibres et leur adhérence avec la matrice argileuse.

Les résistances à la traction enregistrées sont supérieures aux valeurs recommandées dans la littérature ; notamment par la norme néo-zélandaise [87] (0,25MPa) et australienne (0,2MPa) [86].

La déformabilité des mélanges avec paille (M31, M32, M33, M34) est extrêmement importante et l'on observe un palier ductile très étendu. L'ajout des tiges de pailles de riz, à la terre crue, permet de supporter des niveaux de déformations élevées comparées au mélange de référence (M1) (Figure 24) ; 0,08% contre 0,03% comme déformation maximale. En effet la paille confère à la terre cette ductilité. La terre crue (matériau de référence) est plus fragile que les composites « Terre + Paille ».

Le composite, à 2% de paille de riz, présente un maximum sur la courbe de variation de la résistance à la compression (Figure 25 et Figure 26). De façon précise, un ajout de paille, supérieure à 2%, n'induit pas une augmentation, mais au contraire, la chute de la résistance à la compression, bien que la résistance à la traction par flexion et par fendage continue de croître [200].

Ce comportement se justifie aisément du fait que l'augmentation de la teneur en paille allège considérablement le composite, le squelette de terre qui devrait reprendre les efforts de compression est fragilisé [206]. L'augmentation de la paille entraîne une diminution de la masse de terre. Lorsque le composite est sollicité en compression, la terre argileuse reprend les efforts ; en traction, c'est plutôt la paille qui reprend les efforts.

Dans la gamme comprise entre 1.5% et 2% d'ajout de paille, nous observons une forte croissance des résistances mécaniques contrairement à la masse volumique qui diminue progressivement.

L'analyse croisée des différents résultats expérimentaux obtenus pour les résistances mécaniques, masse volumique et le taux retrait montre que l'ajout optimal de paille de riz dans la matrice argileuse pour un meilleur compromis dans les résistances mécaniques, la masse volumique et le retrait est 2% de la masse de sol.

## 8. Influence de la décoction de néré sur les propriétés mécaniques du banco

Considérons des mélanges de terre crue avec ajout de 2% de masse de paille de riz auxquels on ajoute différentes proportions de la décoction de néré en substitution à l'eau. Nous augmentons la proportion de la décoction de 1%, de 4 à 8% et on s'intéresse au comportement mécanique à la compression des échantillons. Le Tableau 8 présente la composition des différents mélanges.

Tableau 8 : fractions massiques des mélanges « terre + paille + décoction »

Mélange	Composition
M41	(T + 2% P + 4% N)
M42	(T + 2% P + 5% N)
M43	(T + 2% P + 6% N)
M44	(T + 2% P + 7% N)
M45	(T + 2% P + 8% N)

La Figure 27 montre la variation de la contrainte en fonction du pourcentage de décoction de néré dans le matériau composite à matrice argileuse formulée avec 2% de paille (proportion optimale de paille). L'évolution de la résistance à la compression a un pic (maximum) à 6% avec le mélange M43 (6% de décoction). Autrement dit, la courbe de variation de la contrainte de compression en fonction du pourcentage de décoction de néré présente un point d'inflexion à 6%.

On peut conclure que la proportion optimale de décoction de néré pour une bonne résistance en compression est 6%, le point où la résistance caractéristique obtenue est la plus élevée

L'ajout de la décoction de néré, en remplacement de l'eau s'est avéré efficace, car le banco élaboré avec le mélange « Terre + Eau + Néré + Paille de riz » présente des valeurs de résistance en compression supérieures à celles obtenues sans décoction mais dans une certaine mesure. Ce résultat concorde avec les travaux de Sorgho [43].

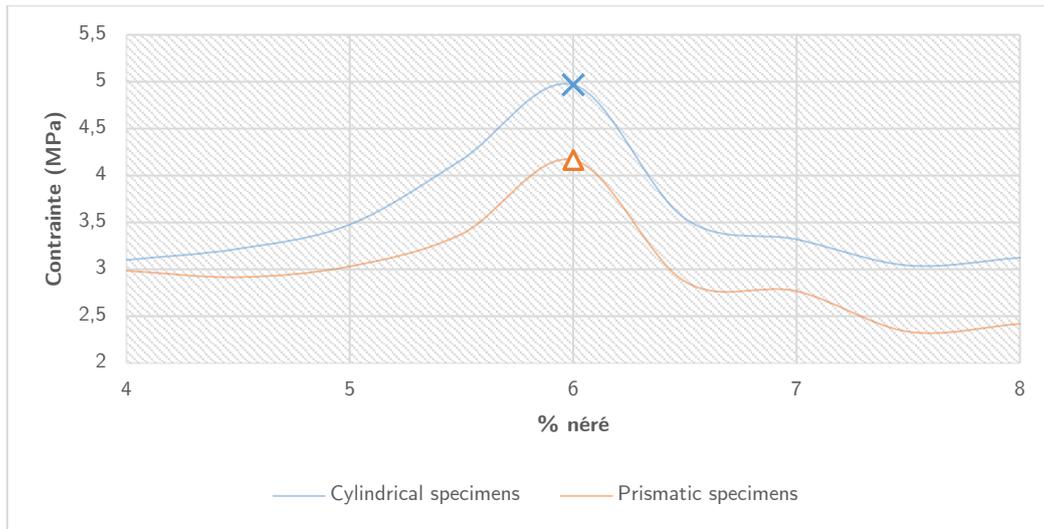


Figure 27 : variation de la contrainte en fonction du pourcentage de décoction de néré du mélange à 2% de paille

Si l'emploi de la décoction de Néré permet d'améliorer la résistance à la rupture des adobes, les mécanismes qui conduisent à renforcer cette résistance sont encore peu connus.

## 9. Proportion optimale de mélange

De tous les facteurs d'influence observés dans cette étude, le facteur limitant dans l'analyse paramétrique des propriétés mécaniques expérimentales des échantillons de terre crue stabilisée avec différentes proportions de paille de riz et de décoction de néré est la résistance à la compression qui a un pic d'évolution en variant l'un ou l'autre des paramètres. En effet, l'augmentation de la proportion de paille améliore toutes les caractéristiques sauf la résistance à la compression qui a une courbe en cloche avec un maximum à 2%, idem pour la proportion de décoction de graines de néré avec 6% comme maximum.

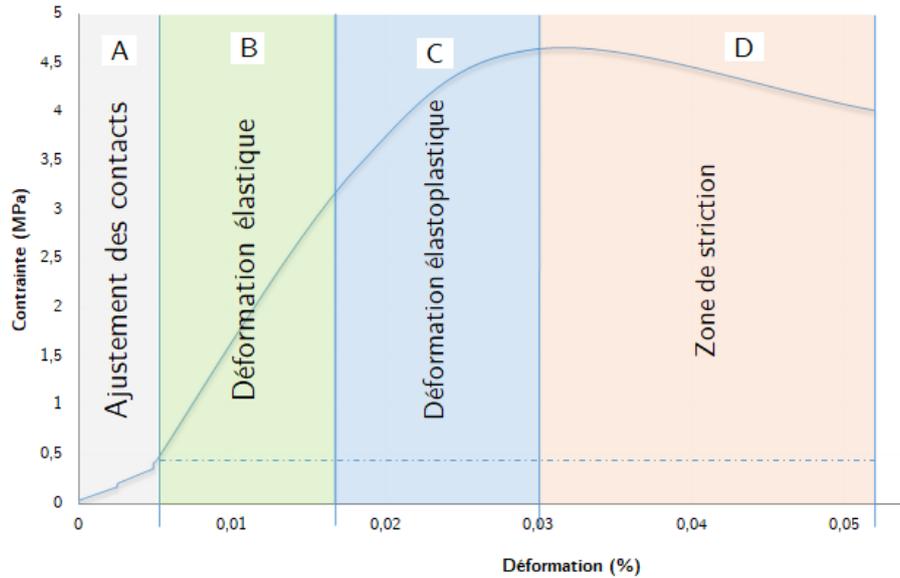


Figure 28 : comportement typique du banco en compression

La Figure 28 montre l'évolution de la contrainte de compression en fonction de la déformation du banco. Le matériau présente globalement un comportement très ductile et il n'apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte-déformation. Le comportement enregistré peut généralement être divisé en quatre phases distinctes. (A à D).

Phase A, une phase d'ajustement des contacts, qui correspond à un écrasement des aspérités de surface [55], [184]. Cette phase, visible sur la Figure 28, n'est pas caractéristique du matériau et masque le domaine élastique initial du comportement du matériau.

La phase B, se caractérise par une variation linéaire de la contrainte en fonction de la déformation. Les déformations enregistrées dans cette zone sont faibles, elle correspond au domaine élastique du matériau. Des modules sécants de 230 à 260 MPa ont été enregistrés pour le dosage donnant les résistances maximales en compression. Par ailleurs, il est recommandé d'effectuer des cycles de décharge – recharge et de mesurer le module tangent à la mise en charge de chaque cycle. Ce module reste constant quelle que soit la charge de préconsolidation, et est égal à la première pente de la courbe. On observe des déformations résiduelles caractéristiques d'un comportement plastique.

Dans la phase C, on observe un comportement élastoplastique où le matériau est déformé de façon permanente jusqu'à sa capacité maximale. La faible déviation de la linéarité

avant la contrainte maximale est rattachée aux micro-déplacements locaux (effondrement des amas granulaires, avec une réduction de la porosité), à la viscoélasticité de la matrice argileuse et à la création de microfissures.

Après le dépassement de la capacité de charge maximale (phase D), la décroissance continue de la contrainte avec l'augmentation de la déformation est associée au flambement de la structure et à la coalescence des microfissures. Le matériau est soumis à un ramollissement par compression, jusqu'à la déformation finale subite (la rupture).

Les éprouvettes prismatiques ont donné des valeurs de résistance à la compression et à la traction par flexion généralement plus élevées que celles des éprouvettes cylindriques. À titre d'exemple, à 2% d'ajout de paille, les résistances sont de 4,97 et 0,93 MPa pour les éprouvettes prismatiques contre 4,17 et 0,74 MPa pour les éprouvettes cylindriques, respectivement en compression et en traction (Tableau 9). Cette situation se justifie bien parce que pour les éprouvettes prismatiques, la zone chargée est supposée être égale à leur section transversale d'origine (conformément à la norme NF EN 196-1) tandis que les données obtenues des éprouvettes cylindriques ont été traitées conformément à la norme ASTM D2166-06 et IS.2720.10.1991 [101], [110], [207]–[209], ce qui indique que la section transversale  $A_i$  à une étape de déformation doit être corrigée. La correction tient compte des importantes déformations latérales générées à des niveaux élevés de chargement.

Tableau 9 : caractéristiques mécaniques optimales \_ banco

Mélanges	Composition	Résistance moyenne (MPa)				E (MPa)
		Éprouvettes cylindriques		Éprouvettes prismatiques		
		Compression	Traction indirect	Compression	Flexion 3 pts	
M43	(T+2%P+6%N)	4,166	0,736	4,968	0,928	250

Les résistances mécaniques mesurées sont comparables à celles des BTC [32], [48], [210], [211]. La contrainte de 4,97 MPa obtenue est similaire à celle des briques de terre crue améliorées avec de faibles teneurs de ciment ou de laitier de haut fourneau [65], [212]–[214]. L'utilisation de la décoction de néré, à la place de l'eau et l'ajout de renforts (paille de riz) apporte une amélioration effective du comportement à la compression.

Tableau 10 : banco optimal mix proportion

	Optimal mix proportion (mass)
[T : N : E : P]	[1 :0,06 :0,11 :0,02]
T=Terre ; N=décoction de néré ; E=Eau ; P= Paille de riz	

## 10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de la paille de riz comme matériau de renforcement et de la décoction de néré comme adjuvant dans le matériau terre sur ses caractéristiques mécaniques.

Nous avons déterminé l'ajout optimal de paille et de décoction en considérant les caractéristiques physiques et mécaniques requises pour des éléments de mur en terre : les fissurations, le taux de retrait, la masse volumique, et les résistances mécaniques (compression et traction).

Les résultats expérimentaux ont montré une réduction de la masse volumique qui chute de 1560 Kg/m<sup>3</sup> (1,5% de paille) à 1528 Kg/m<sup>3</sup> (3,0% de paille), et du retrait au séchage qui chute de 3,5mm/m (1,5% de paille) à 3,0mm/m (3,0% de paille), à mesure que la quantité de paille augmente dans le mélange.

Les échantillons renforcés avec des proportions différentes de paille montrent une augmentation des valeurs de compression jusqu'à un point spécifique au-delà duquel ils commencent à diminuer. Les résistances à la compression ont une évolution de Gauss. À 2% de paille de riz, il apparaît un maximum sur les courbes de variation de la résistance à la compression. Ceci donne une idée de la proportion additive de la fibre pour renforcer le sol afin d'augmenter sa valeur de résistance à la compression à des fins pratiques. Les résistances à la traction par flexion ou par fendage augmentent constamment avec l'ajout de paille ; ce qui montre que la paille apporte sa ductilité à la terre. Le composite résiste mieux à la traction. Les pailles se comportent comme des armatures dans le composite banco.

Comme la paille de riz, la décoction de graines de néré améliore elle aussi, dans une certaine mesure, la résistance en compression de la terre de barre. Une proportion massique de 6%

de décoction de néré par rapport à la masse de terre est retenue. La décoction de graines de néré est un additif prometteur pour l'élaboration d'eco-matériaux.

La réponse du banco en compression, comme en traction dépend fortement de la forme (cylindre, prisme) et de la taille de l'échantillon examiné. En effet les résistances obtenues avec les éprouvettes prismatiques sont supérieures à celles obtenues avec les éprouvettes cylindriques.

Les mélanges avec paille présentent globalement un comportement très ductile et il n'apparaît pas de rupture brutale sur la courbe contrainte-déformation.

En termes de résistances mécaniques, obtenues expérimentalement, nos résultats sont comparables aux résultats expérimentaux rapportés par d'autres études dans la littérature [33], [85], [99], [101], [189], [200].



# Modélisation mécanique de la paroi du silo en banco

## SOMMAIRE

---

1. Introduction .....	54
2. Géométrie du grenier .....	55
3. Actions entrant en jeu dans le comportement des silos .....	57
4. Calcul numérique du silo .....	61
5. Condition de résistance .....	75
6. Conclusion .....	77

---

## 1. Introduction

Les silos constituent une structure largement utilisée par les industries et l'agroalimentaire pour le stockage de tous types de produits agricoles : céréales, fourrage, sucre, etc. Ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique ou à section rectangulaire. Son utilisation s'est généralisée à partir de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, malgré les nombreuses inconnues concernant sa conception structurelle.

Dans les silos, des matériaux présentant des comportements nettement différents entrent en contact, tels que le matériau stocké (les céréales dans notre cas), d'une part, et la paroi du silo (en banco), d'autre part. Cette interaction est l'une des principales causes de l'incertitude persistante dans le calcul structurel des silos.

Janssen (1895) [134] a été le pionnier dans l'étude du comportement des silos, et l'importance de son travail était telle que même aujourd'hui sa théorie est encore utilisée pour le calcul des silos dans leur phase de repos. Cependant, des études expérimentales menées au cours du XX<sup>e</sup> siècle ont démontré l'existence de nombreux phénomènes non expliqués par la théorie de Janssen, tels que les surpressions induites lors de la vidange du silo ou l'apparition de divers effets d'origine dynamique.

Malgré les nombreuses recherches effectuées à ce jour, la grande impulsion dans l'étude des silos se fait à partir des premiers modèles mathématiques, réalisés principalement avec la technique des éléments finis, à la fin de la décennie des années 70. Ensuite, grâce aux progrès de l'informatique et à l'optimisation des outils de calcul, des progrès notables ont été réalisés dans l'étude des silos.

Cependant, il existe un certain manque d'information concernant certains aspects des modèles numériques. Dans ce chapitre, l'influence de certains paramètres numériques, nécessaires à la génération du modèle des éléments finis, dans les pressions induites dans les parois est étudiée. En raison de son importance critique dans les pressions exercées sur la paroi du silo, l'étude des paramètres s'est concentrée sur la génération de contact entre le grain et la paroi dans le modèle numérique.

Dans la suite, nous avons simulé l'influence de l'action des grains sur la paroi du grenier, notamment dans les phases d'opération, au remplissage et au déstockage en variant les paramètres tels que le temps de remplissage et de vidange pour juger de la stabilité de ces ouvrages en lien avec les caractéristiques du matériau de construction, le banco.

## 2. Géométrie du grenier

Les greniers traditionnels améliorés, proposés en remplacement des greniers traditionnels ont la même structure que ces derniers. Une citerne (silo) ovoïde en banco qui peut contenir deux à cinq tonnes de céréales, fermée par un couvercle et recouverte d'un chapeau de paille. Cette architecture, bien particulière, se distingue de celle des silos classiques.

Cette citerne ovoïde est composée de deux coupoles renversées l'une sur l'autre et appuyées au sol par un socle en pierre (pour éviter l'humidité et les termites) et sont équipés d'une vanne, munie d'un cadenas, pour dissuader les charpardeurs.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté les différents types de grenier en terre au Bénin (Otamari, Yom, Monkolé), selon le rapport entre les coupoles inférieure et supérieure qui composent l'ovoïde.

L'objet de notre étude est le grenier YOM pour lequel la coupole inférieure contient les céréales et dont la coupole supérieure, est de moitié, la taille de la coupole inférieure.



Figure 29 : Géométrie du grenier

L'orifice de vidange est excentré, un écoulement excentré se produit lors de la vidange. Le compartimentage du silo impose aussi un remplissage excentré (le sommet de la surface de remplissage, à tout moment du remplissage, est situé en dehors de l'axe vertical du silo).

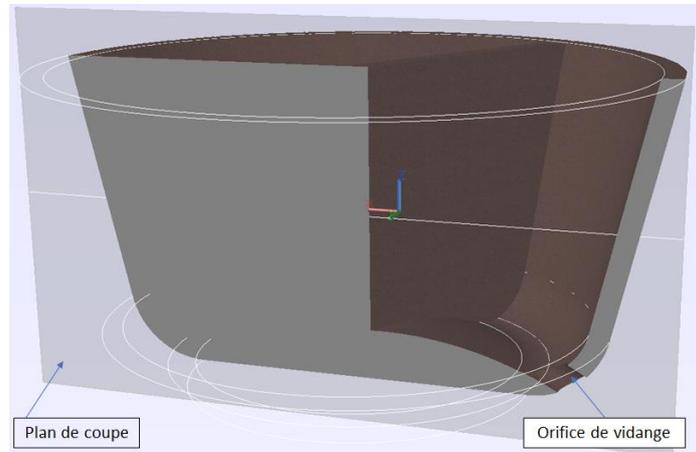


Figure 30 : Coupe 3D grenier en terre (YOM)

Le fond du silo est considéré plat conformément à la norme européenne [135]. Il est incliné de moins de 5° sur l'horizontale.

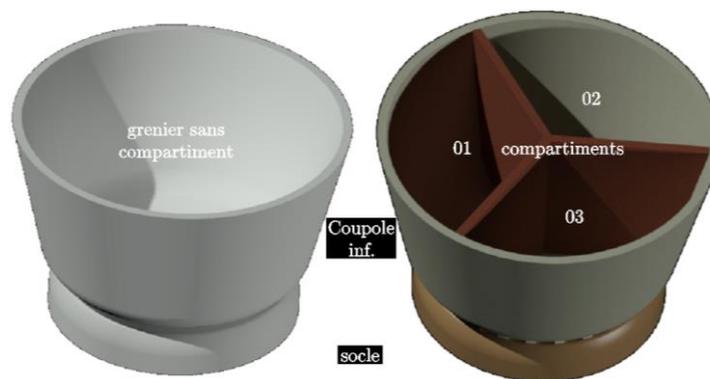


Figure 31 : Coupole inférieure

Pour cette étude, nous déterminons l'état de contrainte et de déformation de la paroi d'un GTA (grenier en terre amélioré) qui fera office de réserve de céréale pour les ménages, ou coopératives (associations) de producteur.

Les dimensions de ce grenier sont inspirées de celles des GTA vulgarisés dans le cadre du programme LISA II.

Tableau 11 : dimension du grenier étudié

	Dimension (mm)
Hauteur totale	2400
Hauteur coupole inférieure	1562
Hauteur coupole supérieure	830
Diamètre central	3055
Diamètre de base	1700
Diamètre d'ouverture (remplissage)	700
Diamètre vanne de vidange	150
Épaisseur paroi	100

Le coefficient dimensionnel  $h_i/dc$  de la coupe verticale du silo est égal à 0.51, compris entre 0.4 et 1. En référence à l'Eurocode [135], les greniers sont classés « silo peu élancé ».

### 3. Actions entrant en jeu dans le comportement des silos

Le grenier est composé de deux éléments coques (la coupole inférieure et supérieure) assemblés. Des parois de compartimentage sont encastrées à la coupole inférieure qui reçoit les grains.

Le frottement des grains avec les parois qui cause la compression axiale, ajouté à cela la pression interne et les charges des grains solides qui parfois deviennent asymétrique, mènent à des problèmes de stabilité de coque.

#### 3.1. Les composantes du silo

##### 3.1.1. La coupole supérieure

La coupole supérieure est fixée à la couple inférieure par une ceinture. Elle transmet donc son poids propre à la coupole inférieure et participe à son flambement (Figure 32).

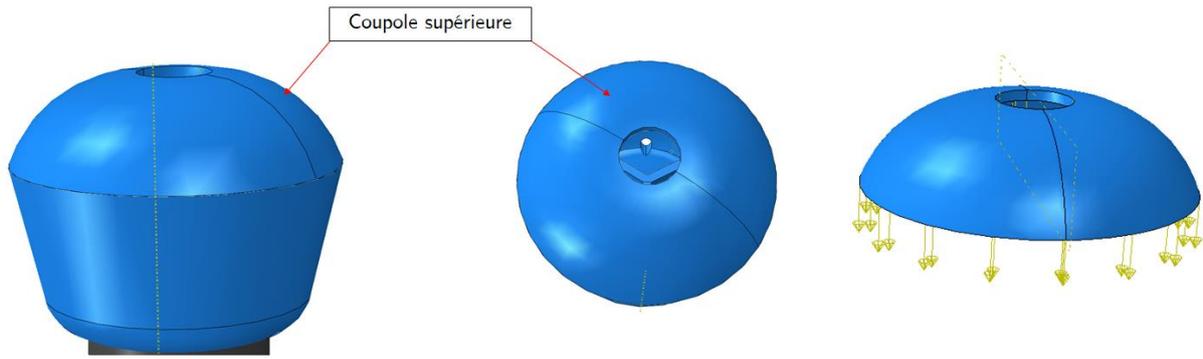


Figure 32 : Coupole supérieure du grenier en terre

### 3.1.2. La coupole inférieure

La coupole inférieure est soumise à la pression interne et la traction fractionnelle des grains qui glissent dans sa surface interne (Figure 31). L'effet conjugué de la coupole supérieure et de l'action des grains soumet la coupole inférieure à la tension circonférentielle, et à la compression verticale, la source des principales déformations [148], [165], [182], [215], [216]. Les éléments de séparation constituent des renforts pour la coupole inférieure. L'encastrement de ces parois contribue à la résistance à l'éclatement de la coupole.

### 3.1.3. La transition

La jonction entre la coupole inférieure et le fond du silo est faite par un raccordement. Elle résiste à une traction radiale et une compression circonférentielle due à la coupole inférieure.

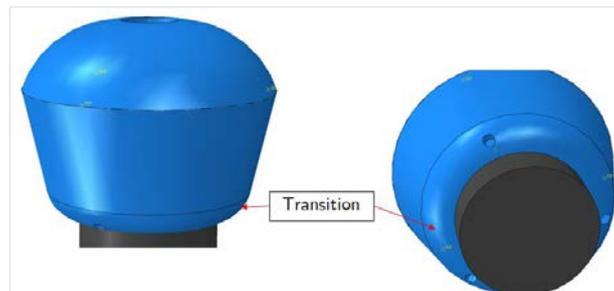


Figure 33 : zone de transition

Les conditions d'appuis sont telles que la base du silo est encadrée (Figure 34).

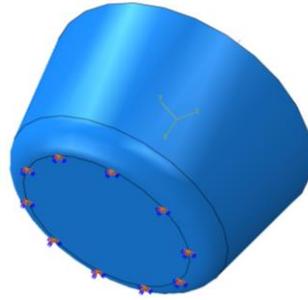


Figure 34 : conditions d'appuis (encastrement à la base)

### 3.2. Pressions dans le silo

La pression, qu'exercent les grains sur les parois, a une composante normale  $P_{nf}$  et une tangentielle  $P_{tf}$ . Le premier tend à éclater le silo et l'autre à appuyer sur sa base et donc à concentrer les contraintes sur les ponts d'appui.

Les pressions exercées sont liées aux caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée :

- La densité,
- Le frottement interne,
- Le frottement sur la paroi.

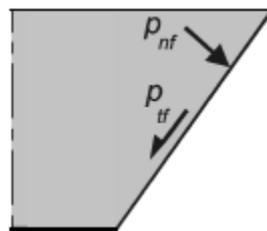


Figure 35 : actions sur la paroi

### 3.3. Actions particulières lors de remplissage et de la vidange des silos



Figure 36 : remplissage/vidange du grenier en terre [24]

Les effets dynamiques dans un silo sont introduits par les phénomènes qui se produisent dans l'écoulement des grains ensilés à la vidange ou au remplissage. Une ouverture même petite de la vanne de vidange produit un écoulement vers le bas rompant l'équilibre de la masse ensilée et introduit immédiatement des surpressions sur les parois. La vitesse de la matière ensilée est moindre le long des parois en raison des frottements sur celles-ci ; elle est au contraire accrue dans l'axe de la trémie à l'aplomb de laquelle il se forme un cône d'ébranlement dans la masse et un entonnoir à la partie supérieure pour une vidange centrée.

La géométrie des greniers en terre nous impose une vidange excentrée. Dans ce cas, on constate des augmentations de pression sur les parois opposées à l'orifice, lors de l'écoulement des grains.

Dès que la matière commence à bouger vers la trappe, on dit qu'il y'a un écoulement. Le type d'écoulement rencontré au cours d'une vidange dépend de la géométrie du silo, et des propriétés mécaniques des parois et de la matière ensilée[131], [217]–[219].

L'une des difficultés dans les simulations numériques est de simuler le comportement du matériau granulaire stocké. Il est démontré que dans le cas d'un écoulement en masse le pic de pression se trouve dans la zone de transition, pareil que dans un silo statique [129], [130], [220].

Les silos cylindriques se vident en un temps plus faible que les silos carrés, à section horizontale et volume égaux. Cela est très probablement dû au fait qu'à surface de section

horizontale égale, le cercle représente une circonférence de moindre que le périmètre du carré.

La vidange centrée d'un silo est moins rapide que celle du même silo à orifice de vidange excentré. L'influence de l'excentrement de la vidange est très importante sur le temps durant lequel s'effectue cette vidange. il a été vérifié que la vidange centrée d'un silo à petits grains est 1,3 à 1,6 fois plus long que la vidange excentrée [121], [221], [222].

### 3.4. Les sollicitations externes

Outre son chargement, le silo est soumis à d'autres sollicitations telles que le vent et les variations de température de la matière ensilée.

La bonne inertie thermique des parois en banco, matériau de construction de ces silos, garantie une température de stockage quasiment stable.

La prise en compte des effets de variation des températures des parois est très importante dans la conception des silos. Avec la température qui augmente, les objets prennent de l'expansion. En effet avec l'élévation de température due à l'effet des échauffements successifs (rayonnement solaire) de la paroi du grenier, le périmètre des parois augmente, créant ainsi un vide par rapport à la position initiale de celles-ci. Ce vide est immédiatement comblé par la matière ensilée. Lorsque cette paroi se refroidit, elle se contracte et tend donc à revenir à sa position première, mais elle en est empêchée par la présence de la matière ensilée qui est alors comprimée. Des contraintes mécaniques sont induites par cette variation de température (dilatation thermique).

## 4. Calcul numérique du silo

Afin de concevoir une structure en toute sécurité, l'analyse de son comportement sous différentes configurations de chargement est importante. La première étape pour analyser le comportement de la structure face aux différentes charges est l'analyse de contraintes qui peut être réalisée de différentes méthodes théorique, numérique et expérimentale.

Nous avons montré les limites des méthodes théoriques notamment dans la prise en compte des mouvements de la matière ensilée. Les méthodes numériques sont aujourd'hui très

employées pour modéliser le comportement des grains au repos ou en mouvement. Les modèles par éléments finis peuvent produire des prédictions pour les pressions de remplissage et de vidange.

La modélisation par éléments finis 3D concerne la modélisation de la matière granulaire comme un solide en lui donnant une loi de comportement plus réaliste et avec prise en compte de l'interaction avec la paroi [162], [163], [181], [216], [223]–[225].

En conséquence, les grains ont été modélisé en continu, en utilisant une loi de comportement élastoplastique non linéaire. La validation de ce modèle est basée sur des expériences sur des silos avec différentes matières ensilées [150], [226], [227] pour valider le modèle des éléments finis par Goodey et al. [227].

#### 4.1. Modèle éléments finis sous Abaqus

Le poids des céréales stockés dans le silo est la seule charge prise en compte dans les analyses. Les déplacements des éléments situés à la base du silo sont bloqués pour les phases de remplissages.

Nous utilisons le système de référence d'Euler pour la modélisation par éléments finis du milieu granulaire. La condition d'équilibre dynamique (remplissage et vidange) utilisée est la suivante :

$$\nabla T + \rho(b_v - \dot{v}) = 0 \quad (4)$$

Où  $T$  représente le tenseur des contraintes de Cauchy ;  $\rho$ , est la densité volumétrique du matériau ;  $b_v$ , est le vecteur des forces volumétriques ;  $v$ , est l'accélération, dont l'expression est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla v \cdot v \quad (5)$$

L'utilisation du référentiel eulérien implique une plus grande difficulté et une plus grande lenteur dans la réalisation des calculs numériques car l'évolution du mouvement de chaque point du matériau doit être décrite à tout moment. Mais elle permet l'analyse du remplissage, (statique), et de la vidange (dynamique). L'une des caractéristiques du processus de décharge des silos est la variation subie par la densité du matériau confiné à

l'intérieur. Avant l'ouverture de la trappe de vidange, les grains ont une densité élevée due au compactage produit lors du remplissage. Une fois la décharge commencée, la densité diminue considérablement, en particulier dans la région la plus proche de la sortie. Pour cette raison, ces variations de la densité du matériau sont évaluées dans chaque élément du modèle par l'équation suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{tr}(\nabla \rho \mathbf{v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \int_s |\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}| \, ds = 0 \quad (6)$$

#### 4.1.1. Modèle d'éléments finis

Pour la modélisation 3D par éléments finis, nous avons utilisé les éléments volumiques disponibles dans la bibliothèque Abaqus (Abaqus 2017) qui est un code commercial de calcul par éléments finis pour l'analyse tridimensionnelle des contraintes et des déformations dans les structures.

Pour la génération des grains, matériau stocké, nous utilisons les éléments continus de type brique ; les éléments cubiques à 8 nœuds d'Abaqus C3D8.

Afin de réduire les temps de calcul, nous avons choisi d'utiliser les éléments à intégration réduite, c'est à dire à un seul point de Gauss dans l'élément (C3D8R). L'élément Abaqus C3D8R (élément brique linéaire) est un élément hexaédrique tridimensionnel à huit nœuds avec intégration réduite. C3D8R : Continuum,3-D, 8-nœuds, Intégration réduite.

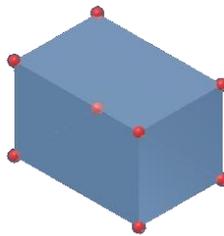


Figure 37 : élément volumique c3d8r

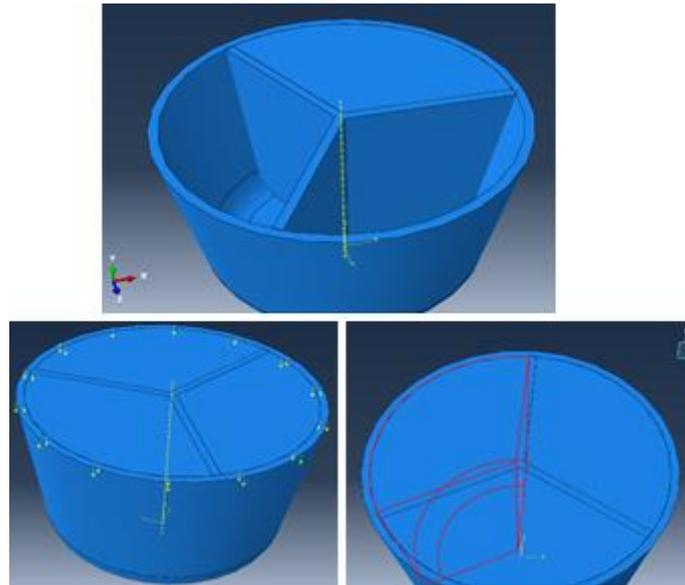


Figure 38 : Modélisation géométrique ABAQUS (part)

#### 4.1.2. Taille des éléments

Les éléments de volume sont des éléments tridimensionnels dont toutes les dimensions sont du même ordre de grandeur. Ils sont employés pour la modélisation d'éléments coque-solide dans une structure complexe non modélisable par un modèle bidimensionnel de type coque ou membrane.

Nous utilisons les éléments linéaires de forme hexaèdre C3D8R. Ils sont définis par huit nœuds, comportant trois degrés de liberté, trois déplacements. L'intégration de ces éléments s'effectue à l'aide d'un point d'intégration.

Le nombre d'éléments doit nous permettre d'étudier la flexion des membrures dans les deux directions ; un nombre trop restreint d'éléments aboutit à une raideur numérique importante.

Une étude préliminaire, pour optimiser les temps de calculs ainsi que leur précision a été effectuée. L'utilisation de trois (03) éléments dans l'épaisseur de la paroi est alors retenue pour une meilleure combinaison de précision et de temps de calcul raisonnable.

Tableau 12 : Temps de calcul des éléments finis

Taille élément	20	30	50
Total CPU times (s)	13791	6897	1675.9

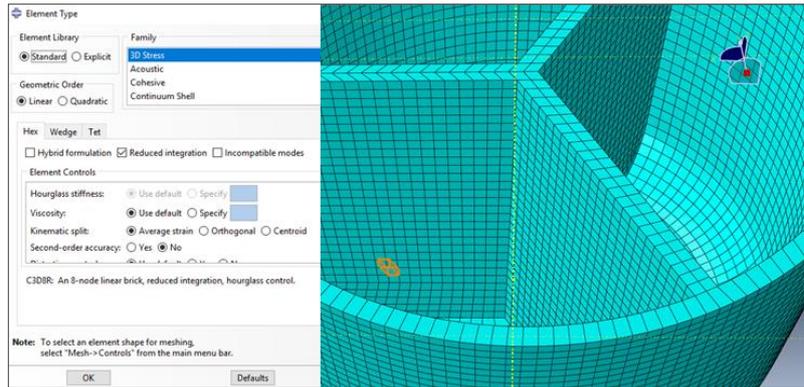


Figure 39 : maillage de la paroi (éléments brique)

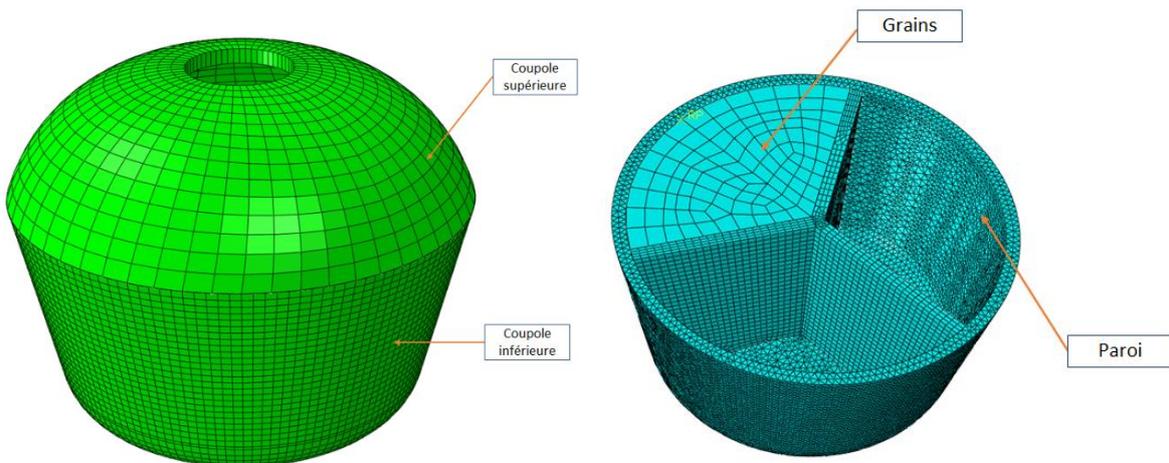


Figure 40 : maillage du silo (grains + paroi)

#### 4.2. Loi de comportement

Pour la simulation du comportement des grains, nous avons utilisé la loi de comportement élastoplastique, dont la représentation dans un diagramme contrainte-déformation est la suivante.

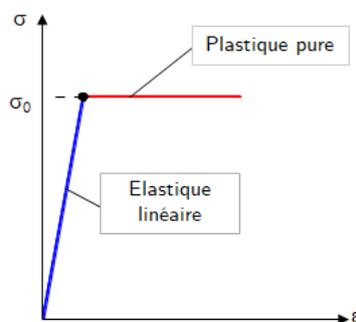


Figure 41 : Modèle de comportement élastoplastique des grains

Seuls deux paramètres sont nécessaires pour décrire son comportement élastique : le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. La cohésion, l'angle de frottement interne et l'angle de dilatation, ils sont nécessaires pour définir le comportement plastique par la loi de comportement de Drucker-Prager. Ces paramètres sont tirés d'expériences de Moya [220], [228].

Ce modèle de comportement plastique développé par Drucker et Prager (1952) [154] pour la simulation de matériaux granulaires a pour but d'améliorer le critère de plasticité de Mohr-Coulomb. En effet le critère de Mohr-Coulomb pose des problèmes pour l'implémentation des matériaux granulaires dans les codes éléments finis notamment dans la détermination des déformations plastiques dans les zones de jonction de paroi. Le critère Drucker-Prager diffère de celui de Mohr Coulomb par la définition de la surface de plasticité comme un cône circulaire [130], [229]–[233] dans l'espace de contrainte déviatorique, ce qui augmente la performance numérique. La surface élastique adopte une forme arrondie pour empêcher l'apparition d'effets de bords.

L'équation générale du critère de plasticité de Drucker-Prager peut être exprimée en termes d'invariants des contraintes selon l'équation suivante :

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (7)$$

Où  $\alpha$  et  $k$  sont des constantes qui dépendent de l'angle de frottement interne et de la cohésion du matériau stocké,  $I_1$  est le premier invariant du tenseur des contraintes, et  $J_2$  est le deuxième invariant déviatorique.

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 = \frac{1}{3} I_1^2 + I_2 \end{cases}$$

Le Tableau 13 présente les paramètres utilisés pour définir les propriétés de la matière granulaire (le maïs).

Tableau 13 : propriétés mécaniques du maïs

Propriété	Valeurs
Angle de frottement du maïs sur les parois	$\rho' = 18^\circ$
Angle de talus naturel	$\theta = 25^\circ$
Poids volumique max	$\delta = 0.8 \text{ T/m}^3$
Angle de frottement interne minimal	$\rho_{\min} = 21^\circ$
Angle de frottement interne maximal	$\rho_{\max} = 31^\circ$
Coefficient de poisson	$\gamma = 0.32$
Coefficient de frottement des grains sur les parois	$\mu = 0.2$
Cohésion	$C = 0.3 \text{ T/m}^3$
Module de Young	$E = 512.9 \text{ T/m}^2$

#### 4.3. Interaction paroi - grains

L'interaction entre la paroi et les grains est un point critique dans le développement de modèles numériques pour les silos. Un des aspects les plus importants à considérer dans l'analyse des silos est l'interaction qui se produit entre le matériau stocké et la paroi, en raison de la nature différente des deux.

Il existe de nombreux modèles pour l'étude du frottement qui se produit entre les matériaux en contact. Dans cette thèse, seul le modèle de frottement de Mohr-Coulomb a été utilisé, pour étudier l'interaction entre la matière ensilée (les céréales) et la paroi (en banco).

L'équation suivante est l'expression mathématique générale du modèle de frottement de Coulomb.

$$\tau = \mu \cdot p_h + c \quad (8)$$

- $\tau$  : contrainte de cisaillement équivalente (kPa).
- $\mu$  : coefficient de frottement entre le grain et la paroi.
- $p_h$  : pression normale exercée sur la paroi (kPa).
- $C$  : cohésion de la résistance au glissement (kPa).

D'après cette équation, la définition exacte d'un modèle de frottement entre la paroi et les grains nécessite la détermination de deux paramètres :  $\mu$  et  $c$ . Dans les modèles générés dans les silos, il a été considéré qu'il n'y a pas de cohésion entre les matériaux en contact (le banco et les grains). Par conséquent, seule la détermination du coefficient de frottement entre les grains et la paroi est nécessaire, dont la valeur peut être facilement obtenue en effectuant un essai de coupe directe décrite dans les travaux de Moya [220], [228].

La cohésion est supposée égal à zéro, et la contrainte de cisaillement équivalente est donc proportionnelle à la pression normale de la paroi.

Mais dans la pratique, la modélisation numérique ne permet pas l'utilisation de la valeur zéro pour la cohésion, parce elle provoque une singularité dans le calcul numérique. Ainsi on tient compte d'une certaine cohésion qui est due généralement à l'humidité des grains et leur attribue une valeur basse [129].

La gestion du contact sous Abaqus se fait par :

- Modélisation du contact basée sur l'interaction des surfaces
- Modélisation basée sur l'utilisation d'éléments de contact

Les éléments de contact sont utilisés lorsqu'il est impossible de gérer l'interaction de surfaces et intègrent directement les propriétés de contact d'un point de vue global. Nous utilisons ici l'interaction de surfaces pour décrire le contact avec plus de finesse.

Cette interaction est gérée par l'option « Surface-to-Surface » dans Abaqus. Cette méthode est basée sur la définition de deux surfaces : la surface maîtresse et la surface esclave. Pour chaque nœud de la surface esclave, Abaqus cherche le point le plus proche sur la surface maîtresse ; l'interaction est alors discrétisée entre les nœuds de la surface maîtresse et les nœuds de la surface esclave.

La surface maîtresse doit représenter matériau plus rigide, dans notre cas, la paroi, tandis que la surface esclave est définie par le matériau déformable, dans ce cas, les grains.

Abaqus dispose de deux algorithmes de gestion de contact :

- Algorithme de contact de type cinématique
- Algorithme de contact de type « penalty »

Le premier procède par avancement de l'état cinématique du modèle sans tenir compte des contacts alors que le second évalue la force pénétrante du nœud esclave est lui oppose une force résistante ; la surface maîtresse subit la même force de sorte qu'elle ne pénètre pas la surface esclave en ce point. La différence entre ces deux algorithmes se voit dans la part dissipée de l'énergie cinétique des nœuds en contact. Une masse ponctuelle impactant un mur rigide se collera au mur avec l'algorithme de contact cinématique, par contre nous observons un rebond avec l'algorithme de type penalty [234]. Nous utilisons ici l'algorithme de gestion de contact de type penalty d'ABAQUS.

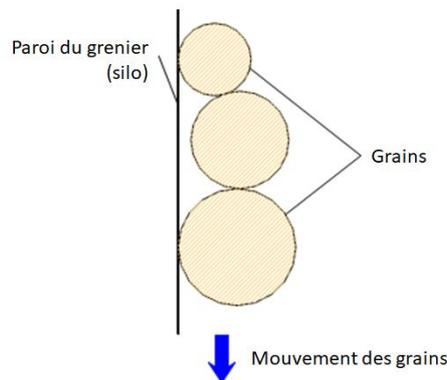


Figure 42 : Interaction Paroi-Grains

#### 4.4. Analyse statique

Elle concerne la phase de stockage des céréales, où les grains sont au repos. Seul le poids des grains et le poids propre de la structure sont considérés comme sollicitations.

L'allure de la courbe des contraintes équivalentes, celles de von mises, est présenté sur la Figure 46. La contrainte équivalente est utilisée pour synthétiser le tenseur des contraintes par un scalaire.

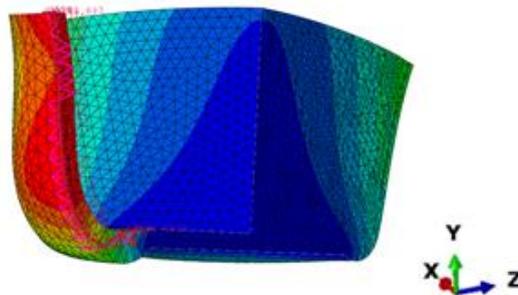


Figure 43 : path\_1

La valeur des contraintes à la profondeur  $z=0$  m est de 0,06 MPa, cette valeur chute jusqu'à  $z=0,3$ m, augmente jusqu'à la valeur de 0,08 MPa à la profondeur 1,2 m. Dans la zone de transition, au fond du silo, la valeur maximale de la contrainte est de 0,21 MPa, cette valeur est la valeur maximale dans tout le silo.

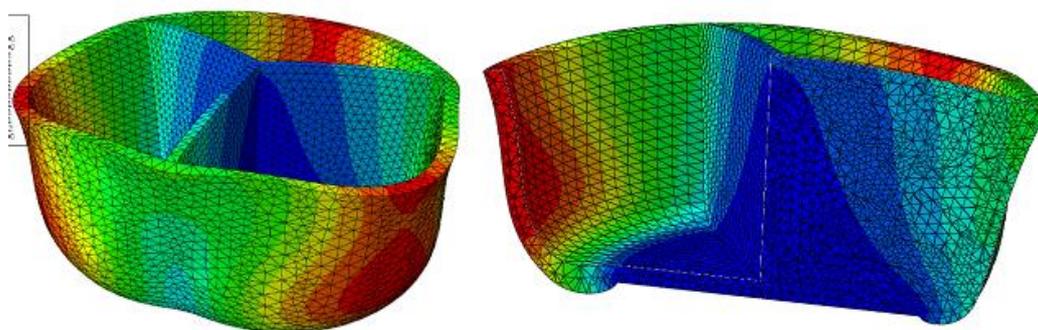


Figure 44 : déformée de la paroi

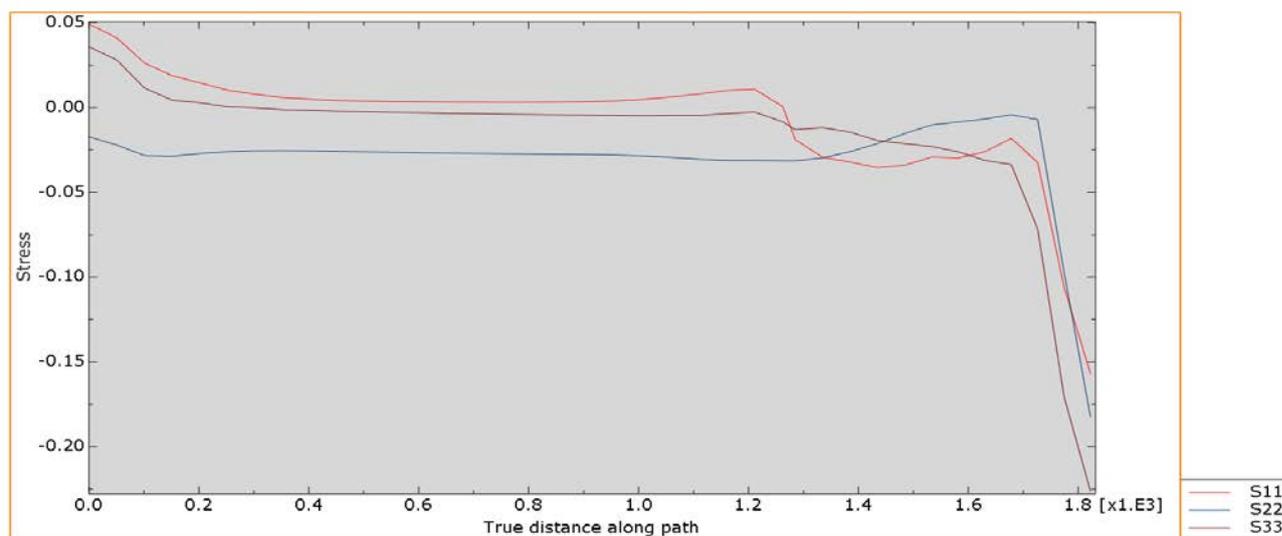


Figure 45 : Contraintes principales \_ silo chargé au repos

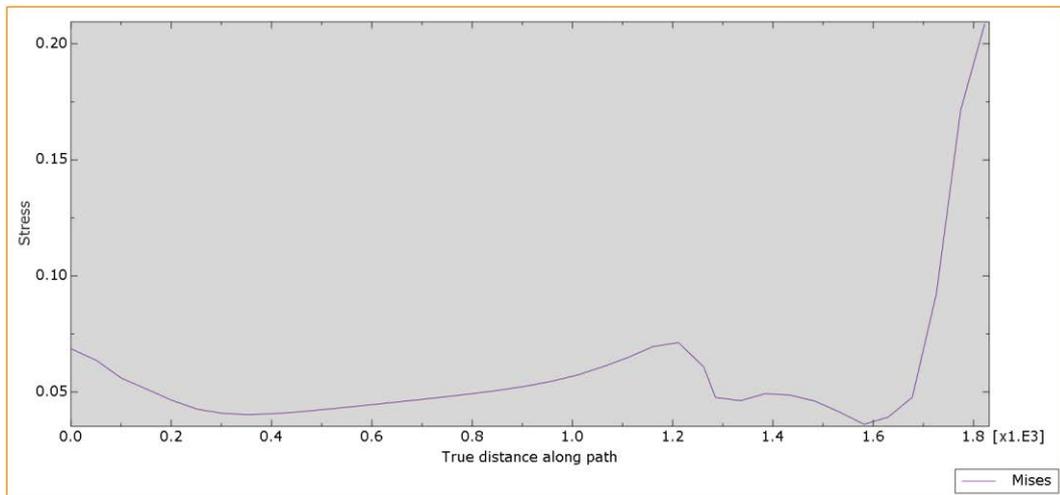


Figure 46 : contrainte équivalente \_ silo chargé au repos

Les contraintes maximales dans la paroi de la coupole inférieure se développent au fond du silo, dans la zone de raccordement avec  $\sigma_{e_{\max}} = 0.21 \text{ MPa}$ .

#### 4.5. Analyse dynamique

L'analyse dynamique concerne l'écoulement des grains soit à la vidange ou au remplissage. Nous utilisons ici une analyse explicite en tenant compte de la non-linéarité de la matière ensilée et du frottement sur les parois.

En tenant compte de la vitesse et l'accélération des couches de remplissage et de vidange, on a :

$$Ku + C\dot{u} + M\ddot{u} = F \quad (9)$$

K, C et M sont respectivement les matrices de rigidité, d'amortissement, et de masse.

u,  $\dot{u}$  et  $\ddot{u}$  représentent les vecteurs après assemblage de déplacement, vitesse et accélération.

F est le vecteur force extérieur appliqué à la structure.

##### 4.5.1. Remplissage

###### 4.5.1.1. Influence de la méthode de chargement

De nombreux modèles d'éléments finis dans les silos considèrent la présence du poids total du matériau stocké depuis le début de l'analyse. Cependant, le processus réel de remplissage d'un silo est constitué d'une incorporation progressive du matériau.

Pour coller le plus à la réalité, le chargement des grains stockés est modélisé par incrémentation de la gravité [130], [171], [230], [235]. Le silo est initialement rempli de solide sans poids et la gravité est incrémentée jusqu'à ce que le poids total du solide soit appliqué à la structure. La méthode de remplissage par incrémentation de la gravité a fourni des résultats par la méthode des éléments finis conformes aux données expérimentales [182], [227].

Nous faisons l'analyse dynamique en variant le nombre de couche de remplissage :  $n=5$ , 10, et 15.

La Figure 47 présente l'allure de la courbe de la contrainte équivalente de von mises développée dans la paroi en fonction de la profondeur du silo (path1).

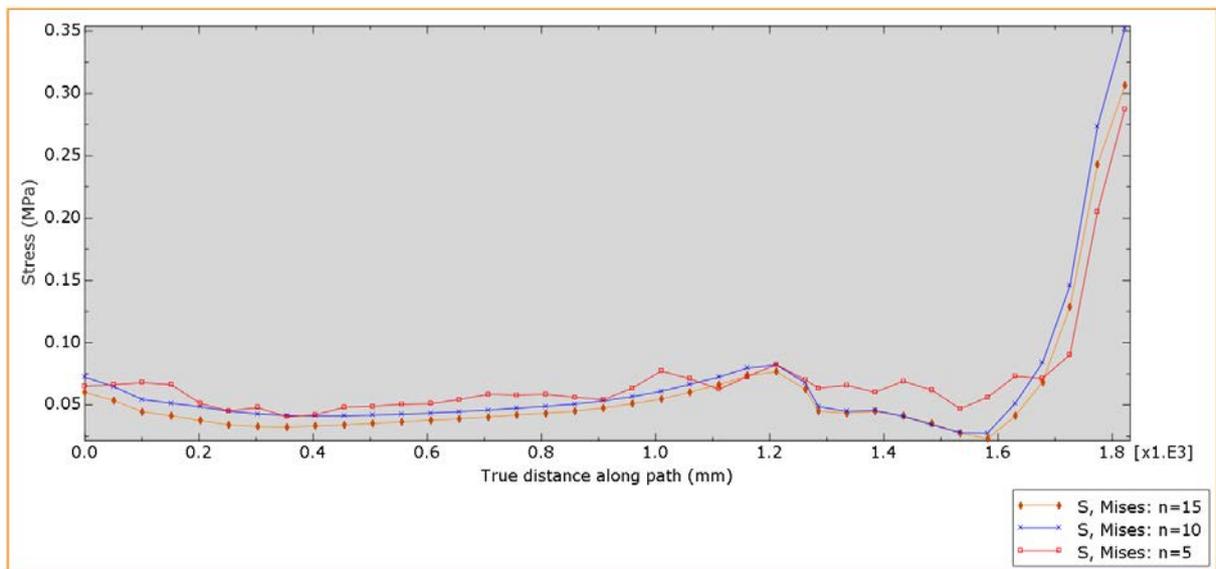


Figure 47 : Variation de la contrainte équivalente maximale en fonction du nombre des couches de remplissage

L'effet du nombre de couches dans le remplissage progressif est le plus observé dans la zone de transition.

La simulation du remplissage progressif du silo produit une légère augmentation des contraintes, par rapport à celle du modèle statique.

Les contraintes obtenues par l'analyse dynamique sont supérieures à celles de l'analyse statique, au fond du réservoir notamment.

La contrainte maximale développée avec 10 couches à la zone de la transition est égale à 0.353 MPa contre 0.31 MPa et 0.28 MPa respectivement obtenues pour 15 et 5 couches.

#### 4.5.1.2. Influence du temps de remplissage

Pour évaluer l'effet du temps de remplissage, nous effectuons une analyse dynamique du remplissage du silo, en considérant le nombre des couches égale à 10 couches et en variant le temps de  $t= 5, 10, \text{ et } 15$  secondes.

La Figure 48 présente l'allure de la courbe de la contrainte équivalente de von mises développée dans la paroi en fonction de la profondeur du silo (path1).

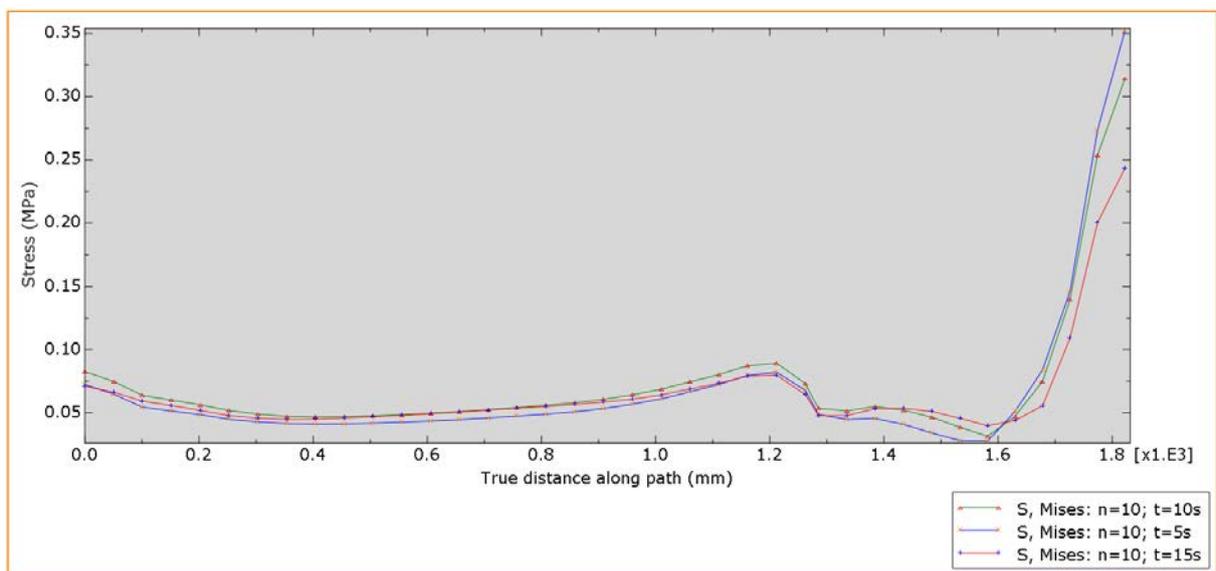


Figure 48 : Variation de la contrainte équivalente maximale en fonction du temps du remplissage

Les contraintes dans la paroi sont inversement proportionnelles au temps de remplissage du silo [182], [236], [237].

A  $t=5s$ , nous avons une contrainte équivalente égale à 0.353 MPa dans la zone de transition, 0.32 MPa pour  $t=10s$  et 0.25 MPa pour  $t=15s$ .

#### 4.5.2. Vidange

La rupture de l'état d'équilibre statique obtenue au remplissage, engendre, dès le début de la vidange, des surpressions qui sont fonction des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée, de l'élancement de silo, de la disposition de l'orifice de la vidange, et de la forme des cellules.

Une analyse dynamique est effectuée par décrémentation de la gravité. Le silo est initialement rempli de grains de son poids total et la gravité est décrémentée du dixième de son poids total jusqu'à ce que le poids des grains soit nul.

Soit  $\frac{n}{10}\gamma$ , le poids de matière vidée.

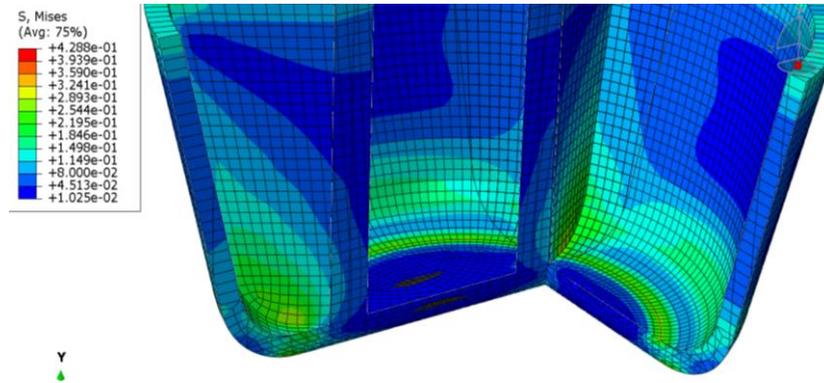


Figure 49 : état de contrainte dans la paroi à la vidange

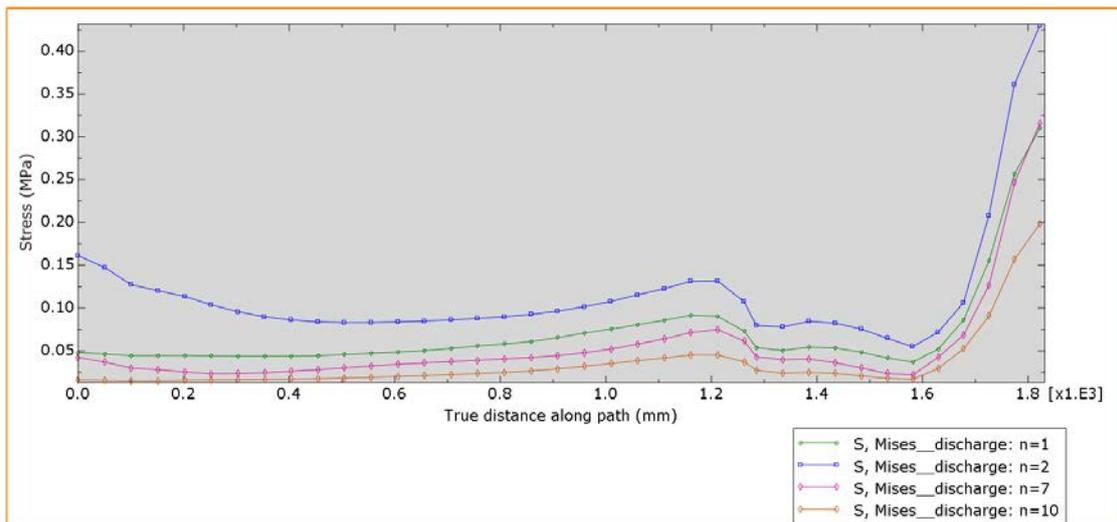


Figure 50 : Variation de la contrainte équivalente maximale à différentes étapes de la vidange

La Figure 51 présente les contraintes équivalentes maximales obtenues dans la zone de transition en fonction du poids de la matière vidée.

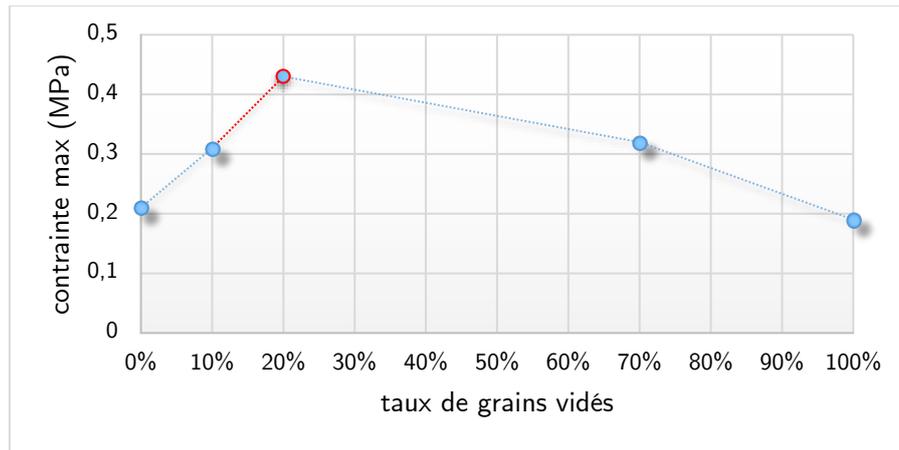


Figure 51 : Contrainte maximale dans la zone de transition en fonction de la proportion de grains vidés

L'analyse prédit une augmentation des pressions durant les étapes initiales de la vidange ; la contrainte équivalente passe de 0.31 à 0.428 MPa dès le début du processus puis chute sensiblement jusqu'à 0.19 MPa.

#### 4.5.3. Synthèse analyse dynamique

L'analyse dynamique du grenier par la méthode des éléments finis montre l'effet des paramètres de remplissage et vidanges qui peuvent influencer sur les résultats des contraintes induites dans la paroi et par suite sur son dimensionnement.

Les prédictions de l'analyse dynamique sont largement supérieures à l'analyse statique. Ces résultats sont en concordance avec les travaux de Gallego en 2015 [237].

## 5. Condition de résistance

Pour vérifier la stabilité d'une structure sollicitée, on compare la contrainte équivalente développée dans cette pièce, avec les paramètres du matériau établis par l'essai de traction.

La condition de résistance les états de contrainte complexes s'écrit :

$$\sigma_e \leq R_{pe} \quad (10)$$

$R_{pe}$  : résistance pratique élastique (MPa)

$$R_{pe} = \frac{R_e}{s} \quad (11)$$

$R_e$  : limite d'élasticité en traction (MPa) ;  $s$  : coefficient de sécurité.

Le respect de cette limite est un critère de validation du système. Son dépassement est considéré comme provoquant la défaillance du système, cela constitue donc un critère de ruine.

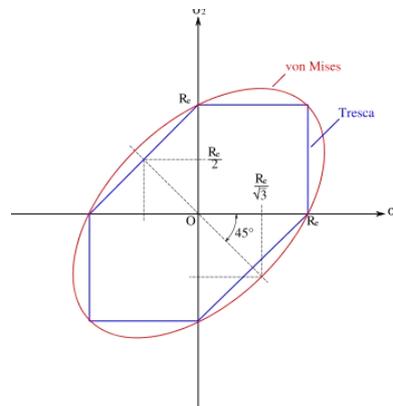


Figure 52 : critères de Tresca-Guest et de von Mises

Le critère de von Mises utilise la théorie de l'énergie de distorsion alors que le critère de contrainte principale maximale utilise la théorie de la contrainte principale maximale. La théorie de von Mises est plus populaire en raison de son approche du traitement des critères de défaillance du point de vue énergétique. La plupart des défaillances de matériaux ductiles peuvent être prédites en utilisant les critères de von Mises. Beaucoup de programmes commerciaux d'analyse des contraintes et d'éléments finis s'appuient sur von Mises.

Donnée liée à la sécurité

Convenons de prendre comme coefficient de sécurité, pour prévoir l'imprévu,  $s = 1,5$ . La limite d'élasticité en traction est 0,736 MPa.

$$R_{pe_{tract}} = \frac{0,736}{1,5} = 0,491 \text{ MPa}$$

La contrainte équivalente maximale est observée à la phase de vidange du silo avec  $\sigma_{g_{max}} = 0,428 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_{g_{max}} = 0,428 < 0,491 = R_{pe_{tract}}$$

Par ailleurs, aucune déformation plastique n'a été observé lors de la simulation avec l'analyse statique et dynamique. Le matériau est sollicité dans son domaine élastique.

## 6. Conclusion

Les greniers traditionnels ont une capacité moyenne de  $3\text{m}^3$ . Cette capacité est insuffisante pour assurer le stockage d'un stock répondant aux besoins de consommation des familles tout au long de l'année. Les nombreuses tentatives d'agrandissement se sont soldées par des échecs faute d'un dimensionnement adéquat. À ce jour, les greniers agrandis ont une contenance de 5 à  $6\text{ m}^3$ .

Dans ce chapitre, nous avons fait l'analyse numérique par élément finis briques d'un grenier agrandi à trois compartiments, trois trémies excentrées et  $8\text{ m}^3$  de volume. L'évaluation des efforts due à la matière ensilée sollicitant les parois du silo est faite en simulant l'action des grains, à la vidange et au remplissage sur la paroi du grenier.

Nous avons ensuite analysé les contraintes induites sur la paroi, par les grains avec un modèle de comportement élastoplastique et une interaction grains-paroi de type « surface to surface » dans ABAQUS. Les contraintes maximales induites par l'analyse dynamique ( $0.43\text{ MPa}$ ) sont supérieures à celle de l'analyse statique ( $0.21\text{ MPa}$ ). Les résultats obtenus montrent que la pression maximale est située dans la zone de transition à la base du silo.

Avec cette contenance de  $8\text{ m}^3$ , les prédictions de contraintes induites sont inférieures à la limite admissible par le matériau avec un coefficient de sécurité  $n$  égal à 1,5. Le matériau n'est sollicité que dans son domaine élastique.

Il est à noter que dans l'analyse dynamique, les paramètres d'études : nombre de couche de remplissage, temps de remplissage et le débit de vidange, sont assez sévères par rapport à la réalité pour tenir compte des conditions extrêmes d'utilisation. Dans la réalité, les conditions de remplissage et déstockage sont quasi-statiques. Ceci laisse présager dans ces conditions, que les contraintes maximales induites sont plus proches de nos prédictions d'analyse statique. Des mesures expérimentales sont nécessaires pour maîtriser les conditions d'utilisation de ces greniers et réduire la marge d'agrandissement.



# CHAPITRE 4

## Simulation des transferts de chaleur dans la paroi du grenier

### SOMMAIRE

---

1. Introduction .....	80
2. Caractérisation thermophysique des parois en banco.....	80
3. Conductivité thermique des céréales .....	87
4. Conditions climatiques .....	90
5. Modélisation des transferts de chaleur .....	95
6. Déformations induites par la variation de température.....	104
7. Conclusion.....	107

---

## 1. Introduction

Pour pouvoir atteindre les objectifs du conditionnement et du stockage des récoltes, le grenier doit satisfaire autant que possible les paramètres suivants: A) le grain doit être sec; (B) le grain doit être maintenu à une température quasi-uniforme; C) le grain doit être protégé contre les attaques d'insectes et rongeurs [16].

Les facteurs physiologiques les plus critiques dans le stockage efficace des céréales sont la teneur en humidité et la température. En effet une forte teneur en eau entraîne des problèmes de stockage car elle favorise les problèmes de champignons et d'insectes, la respiration et la germination et l'une des causes de la respiration est la chaleur. Pour une bonne conservation sur la durée des céréales, il faut donc veiller à maintenir une teneur en humidité et une température optimale [12], [16], [238], [239].

Le flux de chaleur provenant du rayonnement solaire, les propriétés thermiques du banco et les pertes de chaleur dues aux paramètres de convection des environnements influencent la variation de température de la paroi du grenier exposée [240].

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, les propriétés mécaniques optimisées du banco permettent un agrandissement des greniers de stockage de céréales. La question qui reste posée est de savoir si cet agrandissement n'affecte pas les conditions de stockage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous déterminons les caractéristiques thermophysiques de la paroi en banco et des céréales. Puis dans une deuxième partie, nous décrivons une méthode pour simuler la variation de température et la déformation correspondante d'une paroi de grenier suivant son orientation en utilisant l'approche par éléments finis 3D (MEF).

## 2. Caractérisation thermophysique des parois en banco

Plusieurs auteurs ont étudié différentes voies possibles d'amélioration de la résistance thermique des briques de terre, en tenant compte des contraintes économiques et environnementales. En effet, l'optimisation de la résistance thermique des parois en terre passe par la minimisation des transferts thermiques, soit par conduction dans la matière,

soit par conduction/convection et rayonnement dans l'air. Parmi les pistes utilisées pour atteindre ces objectifs, il venait que la réduction de la conductivité thermique peut être obtenue, par ajout de résidus végétaux ou de pailles dans le mélange de base[187]. La conductivité thermique de l'adobe fibré varie inversement à l'augmentation du pourcentage de fibre [200], [241], [242].

Dans le chapitre précédent, nous avons déterminé la proportion optimale de paille de riz pour des résistances mécaniques meilleures. Pour obtenir le bon compromis entre les performances thermiques et mécaniques, ce taux de paille reste valable.

Nous déterminons ici les propriétés thermophysiques du mélange M43 (voir chapitre 2).

### 2.1. Conductivité thermique et capacité thermique massique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) des briques a été déterminée à partir de la norme NF EN 12664 (Juillet 2001), qui est relative à la performance thermique des matériaux et des produits pour le bâtiment. Elle traduit la capacité d'un matériau à assurer un transfert de chaleur par conduction lorsqu'il est soumis à une différence de température.

La méthode utilisée consiste à mesurer simultanément le flux thermique et la température sur les deux faces d'un échantillon soumis à un gradient de température imposé par deux plaques échangeuses. L'ensemble échantillon + fluxmètres est entouré d'une ceinture isolante de manière à limiter les pertes latérales de flux thermique et garantir l'unidirectionnalité du flux dans la zone centrale de mesure. L'intérêt de cette méthode réside essentiellement dans la réduction de la durée de la mesure, par rapport aux méthodes classiques en régime permanent comme celle de la plaque chaude gardée. Le dispositif expérimental de cette méthode est présenté dans la Figure 53.

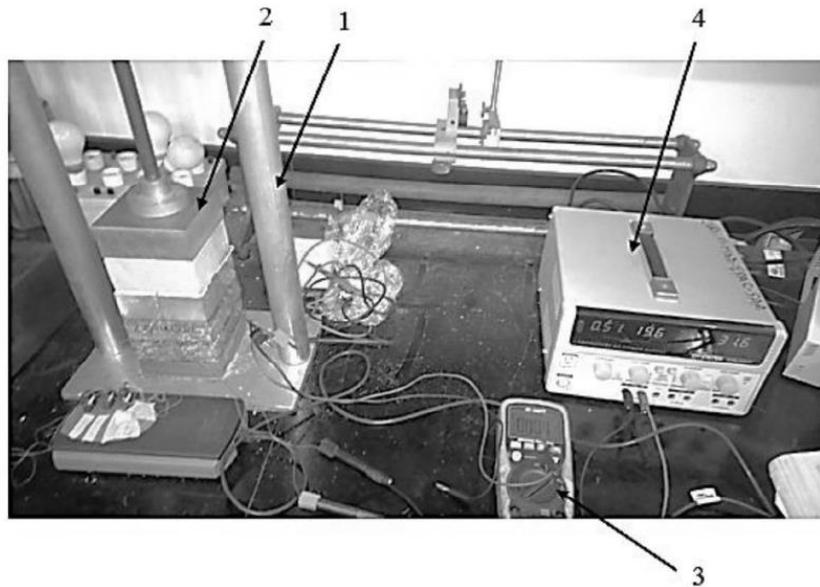


Figure 53 : Dispositif expérimental de mesures thermiques par méthode fluxmétrique

Un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la capacité thermique massique ( $c$ ), appelée aussi chaleur massique ou chaleur spécifique.

Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever de  $1^{\circ}\text{C}$  la température de 1 kg du matériau.

La détermination de la capacité thermique massique est basée principalement sur le processus de stockage du matériau. Le dispositif de mesure est le même que la mesure de la conductivité, seules les sollicitations thermiques imposées changent. À l'état initial, le système est isotherme (les plaques échangeuses sont à la température  $\theta_{\text{initiale}}$ ) et il est amené à un niveau thermique final également isotherme ( $\theta_{\text{finale}}$ ), en changeant les consignes des bains thermostatés. Entre ces deux états, l'échantillon stocke une quantité d'énergie  $Q$  ( $\text{J}/\text{m}^2$ ) qui représente la variation d'énergie interne du matériau, et qui est exprimée selon la formule suivante, où  $\kappa$  représente la capacité thermique surfacique ( $\text{J}/\text{K}\cdot\text{m}^2$ ),  $\Delta\varphi$  est la différence des flux mesurés ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $dt$  est le temps d'acquisition :

$$Q = \int_{t_{\text{ini}}}^{t_{\text{fin}}} \Delta\varphi \cdot dt = \kappa(\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}}) \quad (12)$$

La capacité thermique surfacique renseigne l'aptitude d'une unité de surface de matériau, pour une épaisseur donnée, à stocker de la chaleur. Son évaluation s'effectue en calculant l'intégrale de la différence des flux depuis l'état initial ( $\theta_{\text{initiale}}$ ) jusqu'à l'état final ( $\theta_{\text{finale}}$ ).

La capacité thermique massique  $c$  (J/Kg.K) est ensuite déduite comme suit :

$$c = \frac{\kappa}{\rho.d} \quad (13)$$

Où  $\rho$  désigne la masse volumique de la brique ( $\text{kg/m}^3$ ) et  $d$ , son épaisseur (m).

## 2.2. Diffusivité thermique et effusivité thermique

À partir de la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la capacité thermique massique ( $c$ ), on pourra déterminer la diffusivité thermique ( $a$ ) en ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) et l'effusivité thermique ( $E$ ) ( $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}$ ), qui sont deux caractéristiques essentielles pour le régime non stationnaire. En effet, la diffusivité thermique caractérise la vitesse de transmission de la chaleur par conduction dans le corps. Plus cette valeur est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau. Cependant, l'effusivité thermique représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe (sensation de froid ou de chaud au toucher). Plus le coefficient d'effusivité est faible, plus le matériau se réchauffe vite en surface. Ces deux paramètres sont des caractéristiques importantes dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement dans la sensation de confort. Ils sont calculés à partir des formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{\lambda}{\rho.c} \\ E = \sqrt{\lambda.\rho.c} \end{array} \right. \quad (14)$$

Les propriétés thermophysiques ont été déterminées et présentées dans le Tableau 14.

Tableau 14 : propriétés thermiques

	Banco (T + 2% P + 6% N)	adobes
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1554	1200 - 1700
Conductivité thermique (W/m.K)	0,64 ± 0,03	0.40 - 0.84
Capacité thermique massique (J/kg.K)	800 ± 5,85	600 - 1200
Diffusivité thermique (en 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	4,48 ± 0,18	-
Effusivité thermique (en J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> .s <sup>1/2</sup> )	960,4 ± 11,3	-

### 2.3. Caractéristiques thermiques dynamiques en fonction de l'épaisseur de la paroi

Le calcul des performances dynamiques des matériaux de construction sert principalement aux calculs des besoins de chauffage, et par la suite à l'évaluation de la contribution de ces produits dans la performance énergétique globale.

Les caractéristiques thermiques dynamiques décrivent le comportement thermique d'une paroi lorsqu'il est soumis à des conditions aux limites variables. Les faces du composant sont supposées soumises à des températures ou des flux thermiques variant de façon sinusoïdale [NF EN ISO 13786, 2008]. La norme NF EN ISO 13786 permet de déterminer ces caractéristiques. Le principe de calcul est basé sur la méthode des quadripôles [243]. Il s'agit de déterminer la matrice de transfert thermique ( $Z$ ) liant les amplitudes complexes de la température et de la densité de flux thermique d'un côté du composant aux amplitudes complexes de la température et de la densité de flux thermique de l'autre côté.

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = Z \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Les données nécessaires pour ces calculs sont l'épaisseur du matériau, sa masse volumique, sa conductivité thermique, sa capacité thermique massique, ainsi que la période des variations thermiques.

La période  $T$  prise est un jour (86400 s), correspondant aux variations climatiques quotidiennes. Les calculs sont effectués suivant la norme NF EN ISO 13786, et en tenant compte des résistances thermiques superficielles extérieures et intérieures.

Le mode opératoire est le suivant:

- a) Identifier les données d'entrée : épaisseur de paroi et caractéristiques thermiques du matériau;
- b) Spécifier la période des variations sur les surfaces;
- c) Calculer la profondeur de pénétration périodique  $\delta$
- d) Déterminer les éléments de la matrice de transfert thermique;
- e) Calculer les caractéristiques thermiques dynamiques.

La profondeur de pénétration périodique du matériau,  $\delta$ , se calcule à partir de ses propriétés thermiques et de la période,  $T$  :

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \times T}{\pi \times \rho \times c}} \quad (16)$$

Le rapport de l'épaisseur de la couche à la profondeur de pénétration est alors:  $\xi = \frac{d}{\delta}$

Les éléments,  $Z_{mn}$ , de la matrice se calculent comme suit:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = \cosh(\xi) \times \cos(\xi) + j \times \sinh(\xi) \times \sin(\xi) \\ Z_{12} &= -\frac{\delta}{2\lambda} \left\{ \sinh(\xi) \times \cos(\xi) + \cosh(\xi) \times \sin(\xi) + j \times [\cosh(\xi) \times \sin(\xi) - \sinh(\xi) \times \cos(\xi)] \right\} \\ Z_{21} &= -\frac{\lambda}{\delta} \left\{ \sinh(\xi) \times \cos(\xi) - \cosh(\xi) \times \sin(\xi) + j \times [\sinh(\xi) \times \cos(\xi) - \cosh(\xi) \times \sin(\xi)] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

$f$ , le facteur d'amortissement est toujours inférieur à 1.

$$f = \frac{\left| \frac{-1}{Z_{12}} \right|}{U_0} \quad (18)$$

Le décalage temporel pour le coefficient de transmission thermique périodique est:

$$\Delta t_f = \frac{T}{2\pi} \arg(Z_{12}) \quad (19)$$



Figure 54 : échantillons de différentes épaisseurs testés

Quatre différents échantillons du même mélange M43 et de différentes épaisseurs (10, 12, 15 et 20cm) ont été soumis simultanément au flux solaire pendant trois jours. Des données de flux et de température, ont été recueillies pour chaque échantillon.

Un programme Matlab permet de calculer les matrices de transfert thermique superficielles et dans l'épaisseur de la paroi d'obtenir pour chaque échantillon le déphasage et l'amortissement.

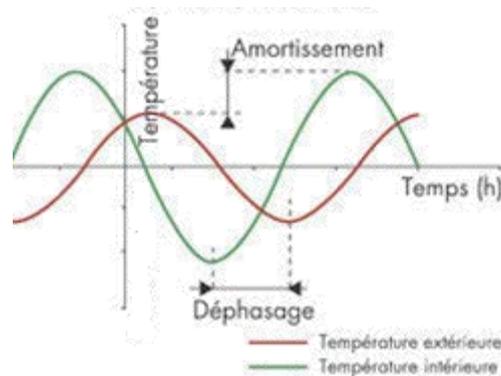


Figure 55 : Déphasage et amortissement de la température

Le déphasage est le temps nécessaire pour que la température intérieure atteigne son maximum à partir du moment où a lieu le pic de température extérieure. Le facteur d'amortissement est le rapport des amplitudes de la température intérieure et de la température extérieure. Plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties.

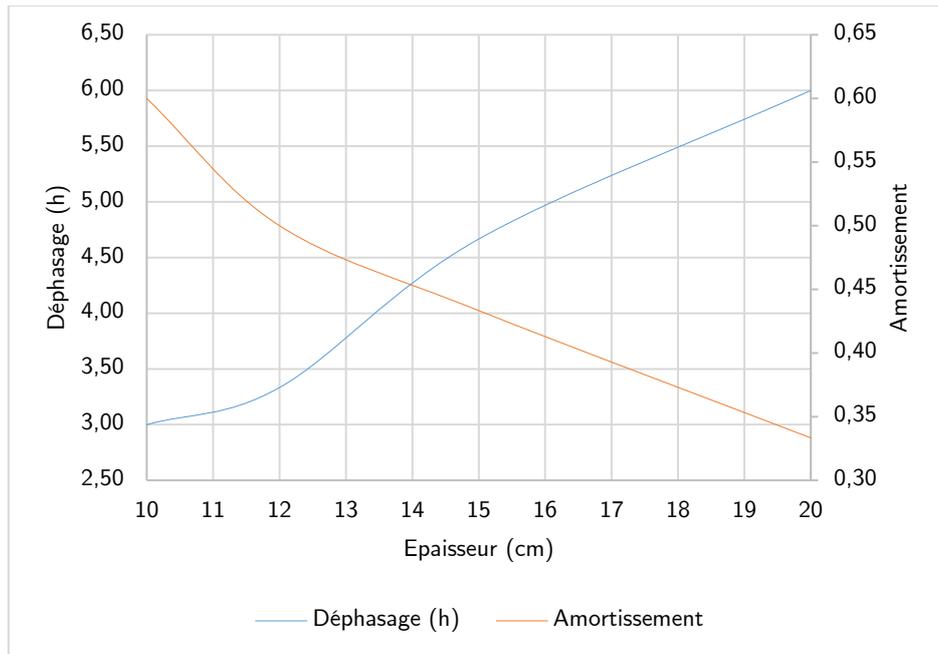


Figure 56 : Évolution du facteur d'amortissement et du déphasage en fonction de l'épaisseur de la paroi

Pour assurer la bonne conservation des céréales, il faut veiller à ce que la variation des conditions extérieures influence le moins possible les conditions de stockage à l'intérieure du grenier. L'objectif est donc de maximiser le déphasage de la paroi et de minimiser le facteur d'amortissement.

Plus la paroi est épaisse, moins l'enceinte est sensible aux variations des conditions d'ambiance extérieures. Pour garantir, de bonnes conditions de stockage des céréales dans les greniers en terre la tendance serait de maximiser l'épaisseur de la paroi.

### 3. Conductivité thermique des céréales

Les céréales sont considérées comme un milieu granulaire qui est un milieu poreux particulier dont la phase solide est constituée de granulats (les grains).

La conductivité thermique effective (équivalente) d'un milieu poreux est une fonction complexe des conductivités du solide ( $\lambda_s$ ) et du fluide ( $\lambda_f$ ). Il existe dans la littérature, plusieurs modèles basés sur des combinaisons pondérées des modèles en série et parallèles basés sur l'analogie électrique, respectivement le modèle en série et le modèle en parallèle.

Ces modèles se répartissent en trois groupes :

- Les modèles des milieux périodiques

Proposés par Kuni [244]–[246], ces modèles supposent que le milieu a une structure plus proche des structures cristallines. La conductivité thermique équivalente est obtenue par résolution de l'équation de la chaleur sur une cellule élémentaire ou par analogie électrique.

- Les modèles statistiques [245]

Ces modèles utilisent les calculs de probabilités basés sur la distribution des points de contact entre les grains.

- Les modèles de types Maxwell [247]–[249]

Apparus après les travaux de Maxwell [250], ces modèles supposent que le milieu est assimilé à un empilement régulier de particules dispersées dans une matrice continue.

Nous présentons ici la détermination de la conductivité thermique effective du blé, de l'orge et de l'avoine par une méthode expérimentale.

### 3.1.1. Dispositif expérimental

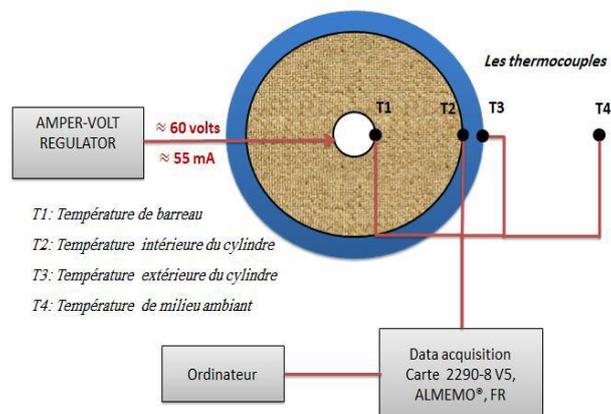


Figure 57 : schéma du dispositif de mesure de la conductivité



Figure 58 : dispositif de mesure

On dispose d'une résistance thermique, d'un tube PVC, de thermocouples de type K, pour estimer la conductivité thermique de céréales. Le principe est le suivant : La résistance placée au centre du tube PVC rempli de grains est constamment alimentée par un flux de chaleur quasi constant jusqu'à ce qu'on atteigne l'équilibre thermique. L'étude du transfert radial de chaleur permet ensuite de quantifier la conductivité thermique des céréales. Les Figure 57, Figure 58 et Figure 59 montrent le dispositif expérimental et les outils d'acquisition.

Des thermocouples calibrés de type chromel-alumel *K* de calibre 0,25 mm ont été utilisés pour la mesure de température. La précision de mesure de la température est de  $\pm 1$  K. Les données sont enregistrées en continu à l'aide d'une carte d'acquisition de données à haut gain (2290-8 V5, ALMEMO®(R), FR) (Figure 59). La température de paroi extérieure du tube est mesurée par un thermocouple TP1000 de précision,  $\pm 0.3$ K.



Figure 59 : acquisition

Au bout de deux à trois jours, l'équilibre thermique est atteint ; La Figure 60 représente l'évolution de la conductivité thermique effective des céréales en fonction des temps.

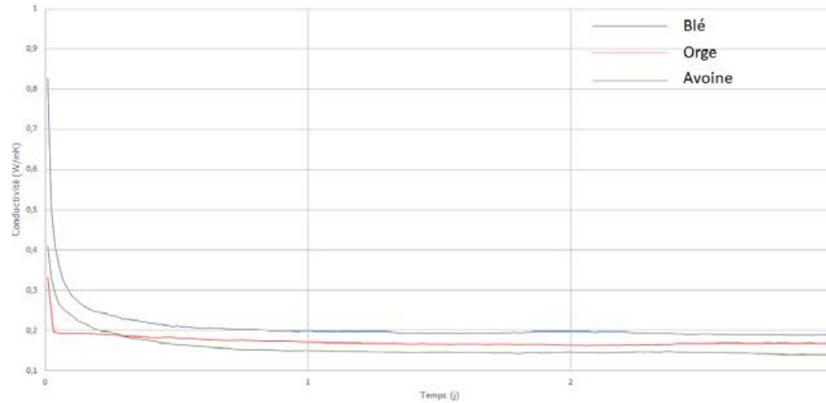


Figure 60 : Variation de la conductivité en fonction de temps

On en déduit la conductivité thermique du blé, de l'orge et de l'avoine (Tableau 15) :

Tableau 15 : Conductivité thermique effective des céréales

Céréales	Blé	Orge	Avoine
Flux de chaleur (W)	3.35	3.28	3.36
Conductivité (W/m.K)	0.19	0.17	0.14

#### 4. Conditions climatiques

La conservation des gains relève du transfert de chaleur et de vapeur d'eau entre les grains stockés et le milieu ambiant. Les parois du silo sont exposées aux rayons solaires durant la période de stockage, ce qui induit localement une surchauffe qui se déplace pendant la journée de l'est vers l'ouest en fonction de la position du soleil. La fluctuation journalière de la température extérieure freine ou accélère les échanges entre le milieu extérieur et intérieur.

Nous présentons ici les conditions de températures extérieures dans la zone d'étude, puis nous calculons le rayonnement solaire auquel est soumis la paroi du silo suivant son orientation et l'heure de la journée.

Les coordonnées géographiques pour la région de Natitingou sont 10,304° de latitude, 1,380° de longitude et 465 m d'altitude.

#### 4.1. Température

La saison très chaude dure 2,4 mois, du 8 février au 21 avril, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 35 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 16 mars, avec une température moyenne maximale de 37 °C et minimale de 24 °C.

La saison fraîche dure 2,7 mois, du 1 juillet au 22 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 30 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 30 décembre, avec une température moyenne minimale de 19 °C et maximale de 33 °C.



Figure 61 : Température moyenne maximale et minimale Natitingou [251]

Pour référence, le 16 mars, la journée la plus chaude de l'année, les températures à Natitingou varient généralement entre 24 °C et 37 °C, tandis que le 30 décembre, la journée la plus froide de l'année, elles varient entre 19 °C et 33 °C.

<sup>1</sup> La température moyenne quotidienne maximale (ligne rouge) et minimale (ligne bleue), avec bandes du 25e au 75e percentile et du 10e au 90e percentile. Les fines lignes pointillées sont les températures moyennes perçues correspondantes.

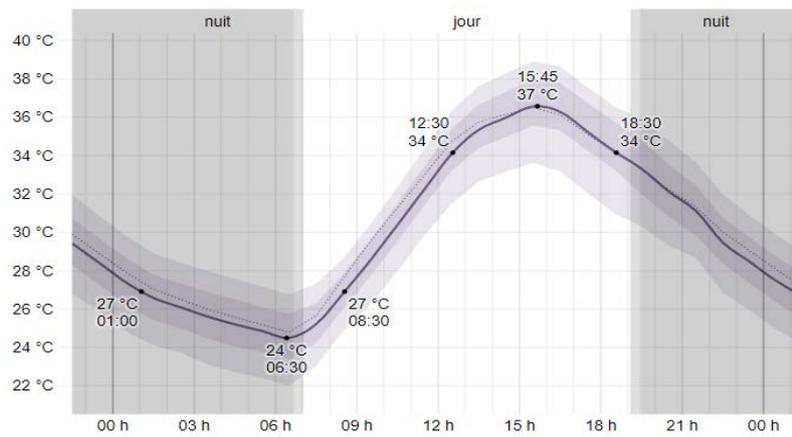


Figure 62 : Variation de température \_ jour le plus chaud de l'année [251]

## 4.2. Rayonnement solaire

### 4.2.1. Données climatiques

Le rayonnement solaire incident en ondes courtes quotidien moyen connaît une variation saisonnière légère au cours de l'année. Le jour le plus lumineux de l'année est le 21 février, avec une moyenne de 6,0 kWh.

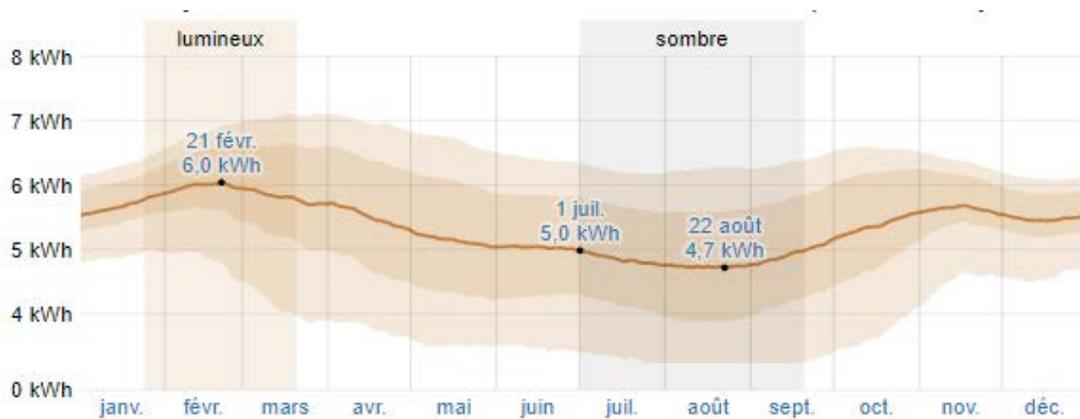


Figure 63 : Rayonnement solaire quotidien moyen [251]

Le rayonnement solaire incident en ondes courtes maximal par mètre carré au sol est 880 watt aux alentours de 12h45. La valeur correspondante le 22 août, le jour le plus sombre de l'année, est 0,67 kilowatt aux alentours de 11h45

<sup>2</sup> Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en mètres carrés (ligne orange), avec bandes du 25e au 75e percentile et du 10e au 90e percentile.

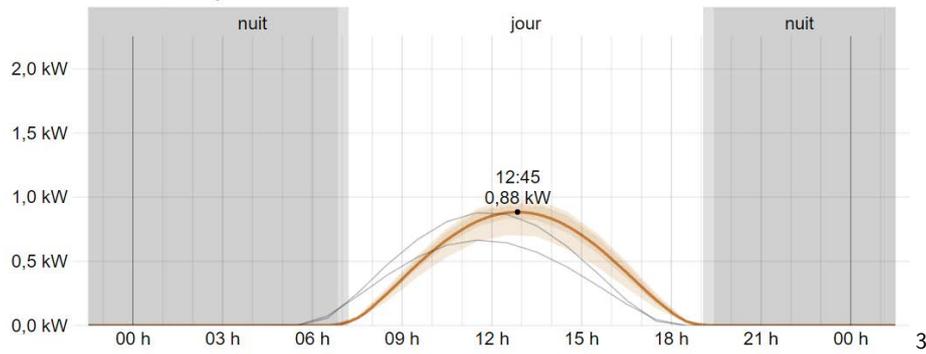


Figure 64 : Rayonnement solaire en ondes courtes le 21 février [251]

#### 4.2.2. Rayonnement direct reçu par la paroi suivant l'orientation et l'inclinaison

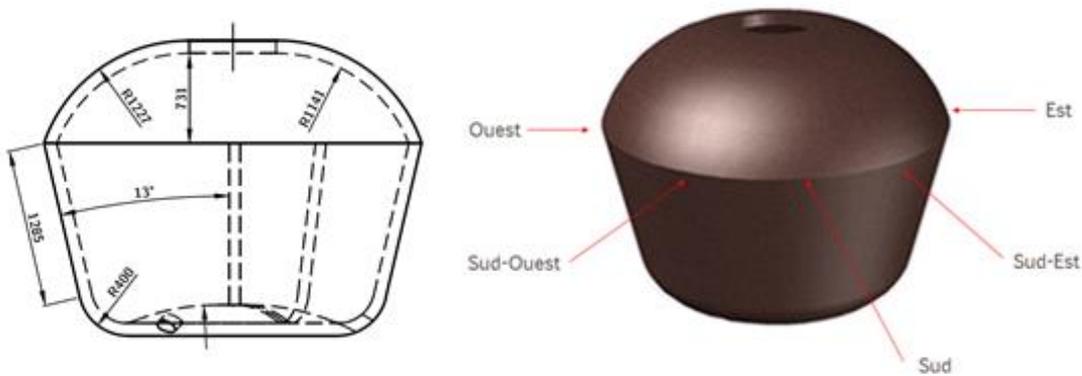


Figure 65 : géométrie du grenier (inclinaison des paroi)

Le rayonnement global  $G$  reçu par une surface horizontale se décompose en deux termes :

- le rayonnement direct  $I$  (éclairage corrigé des phénomènes atmosphériques)
- le rayonnement diffus  $D$  en provenance de toute la voûte céleste.

$$G_h = I_h + D_h \quad (20)$$

Pour connaître  $D_h$ , on fait appel à la fraction d'insolation  $s$  qui représente le nombre d'heures de soleil mesurées par l'héliographe divisé par la durée théorique du jour.

<sup>3</sup> Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en mètres carrés (ligne orange), avec bandes du 25e au 75e percentile et du 10e au 90e percentile. Les lignes gris clair représentent les courbes correspondantes pour les jours avec le rayonnement solaire incident en ondes courtes atteignant le sol minimum et maximum. Le crépuscule civil et la nuit sont indiqués par les superpositions ombrées.

Pour des régions intertropicales, on peut en première approximation, utiliser la formule empirique :  $D_h = 0.3 \times G_h$ .

Pour un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  :

$$I_i = I(\sin h \cdot \cos i + \cos h \cdot \cos(\gamma - a) \cdot \sin i) \quad (21)$$

Les parois orientées de l'est à l'ouest passant par le sud sont les plus balayées par le rayonnement. Nous calculons le rayonnement direct reçu par les faces sud, sud-est, sud-ouest, est, et ouest.

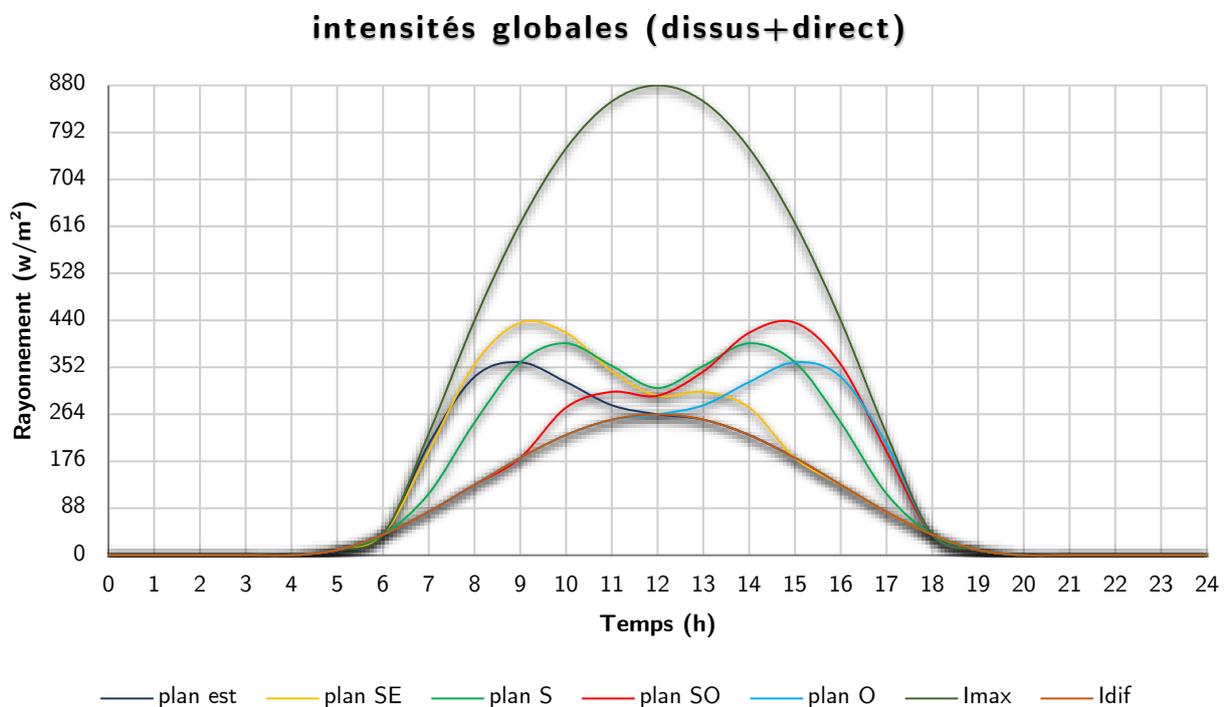


Figure 66 : Rayonnement global suivant les orientations de paroi

L'intensité du rayonnement reçu par la paroi diffère de l'orientation de celle-ci et de l'heure de la journée. Ceci est dû au mouvement du soleil (de l'Est à l'Ouest). Les portions de paroi orientées nord ne reçoivent pas de rayonnement direct au cours de la journée. Elles ne sont soumises qu'au rayonnement diffus.

La portion de paroi orientée Est, reçoit le maximum d'insolation de 08h à 09h. Le reste de la journée, notamment de 09h à 18h, cette portion de paroi n'est sollicitée que par le

rayonnement diffus. Nous observons exactement le contraire au niveau de la portion de paroi orientée Ouest, où le pic du rayonnement reçu est enregistré entre 15h et 16h.

Le pic de rayonnement global ( $440 \text{ W/m}^2$ ) est enregistré pour les portions de paroi orientées Sud-Est et Sud-Ouest dont l'évolution du rayonnement est symétrique.

Le pic d'insolation sur la portion de paroi orientée Sud est enregistré à 10h et 14h. Lorsque le soleil plombe à midi, le rayonnement direct reçu est très faible à midi à cause de l'inclinaison des parois. En effet, les parois du grenier ne font qu'un angle de  $13^\circ$  avec la verticale.

## 5. Modélisation des transferts de chaleur

Le but de cette section est de décrire le comportement du grenier soumis aux variations de température qui déterminent les contraintes et les déformations provoquées par les charges thermiques de fluctuations thermique et d'insolation. Le flux de chaleur provenant du rayonnement solaire, les propriétés thermiques du banco et les pertes de chaleur dues à la convection et à la radiation influencent la variation de température dans la paroi du grenier exposé. L'analyse de ces actions sera réalisée par la méthode des éléments finis 3D (MEF) dont l'efficacité a déjà été amplement démontrée par les auteurs dans des études antérieures [130], [146], [252]–[254].

Il s'agit de simuler la variation de température et la déformation correspondante de la paroi.

Comme dans l'analyse structurelle, la paroi est modélisée par des éléments finis briques DC3D8 dans Abaqus. Une analyse transitoire a été effectuée pendant une période de 24 heures.

Les propriétés thermiques du banco sont présentées dans le Tableau 14. Le rayonnement solaire (flux thermique) et la variation de la température ambiante sont présentés plus haut (Figure 62 et Figure 66).

### 5.1. Analyse thermique

La condition initiale inclut le champ de température initiale pour l'ensemble du modèle au début de l'analyse ; elle est fixée à 25 °C. Par la suite, la température de chaque point à 24h est réinjectée pour une nouvelle analyse comme condition initiale.

Les conditions aux limites comprennent le flux du rayonnement solaire sur la paroi, la convection entre la paroi et l'air, le rayonnement.

Le coefficient d'échange par convection  $h$  à l'extérieure du grenier est égale  $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ . À l'intérieure du grenier, le coefficient global d'échange mesuré, incluant les échanges conductifs et convectifs, dans la masse granulaire est égal à  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ .

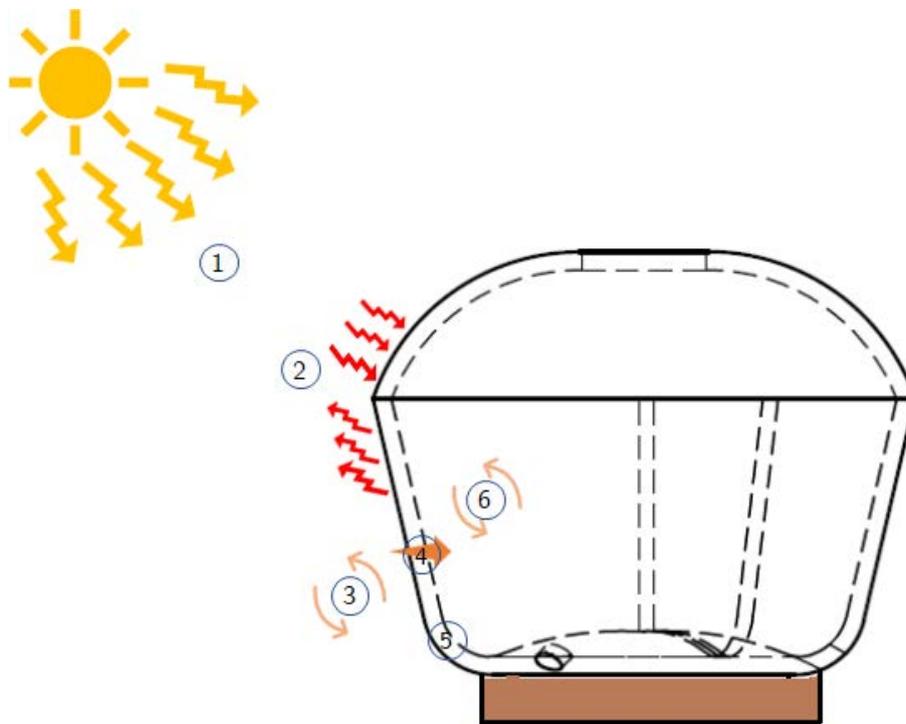


Figure 67: Modèle thermique \_ paroi

1. Flux solaire (rayonnement global)
2. Flux net radiatif (paroi + atmosphère)
3. Flux net convectif
4. Conduction
5. Échauffement/Refroidissement
6. Flux global intérieur (convectif + conductif)

Une analyse thermique avec la méthode des éléments finis par ABAQUS a permis de déterminer la distribution de température dans la paroi et à chaque instant [240], [255]. Le profil de température à travers l'épaisseur de la paroi est obtenu pour toute la journée. La Figure 68 montre les valeurs de température obtenues à partir du modèle 3D.

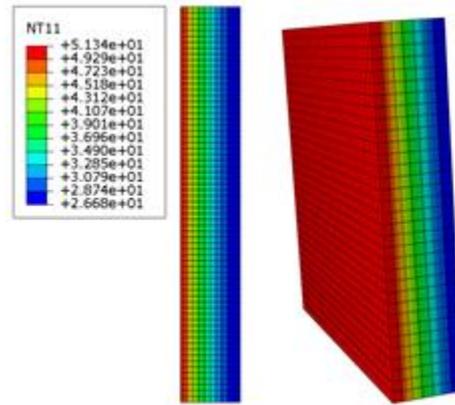


Figure 68 : profil de température \_ paroi

La variation de température à travers la paroi obtenue avec l'analyse thermique Abaqus en fonction de l'orientation.

### 5.1.1. Profil de température de paroi suivant l'orientation

- Orientation Est

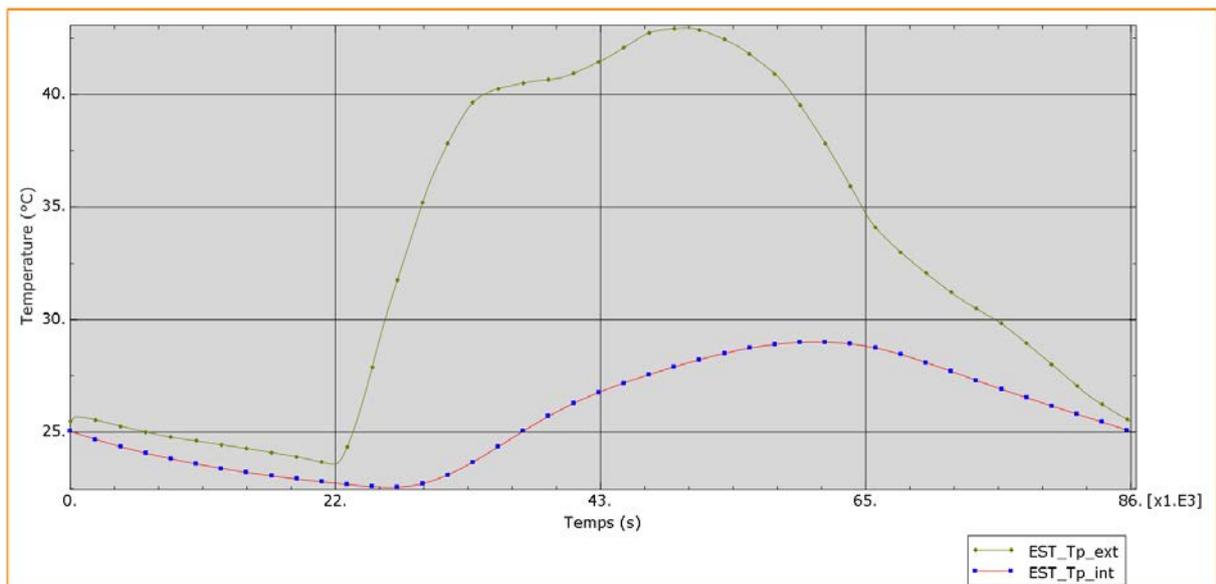


Figure 69 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi \_ EST

La Figure 69 présente les prédictions de variation de la température dans la portion de paroi orientée Est au cours de la journée.

Les deux pics observés sur la variation de la température de paroi extérieure se justifient par le déphasage de l'évolution du rayonnement et de la température ambiante. En effet, le rayonnement atteint son pic entre 08h et 09h alors température ambiante est maximale autour de 15h. La face interne de la paroi est moins sensible aux variations du rayonnement et de la température ambiante ; la température est très bien amortie.

Le décalage entre les températures les plus élevées de parois externe et interne pendant la journée, obtenu à partir de l'analyse thermique, est d'environ trois heures, ce qui concorde avec les résultats des essais réalisés présentés à la Figure 56.

- Orientation Sud-Est

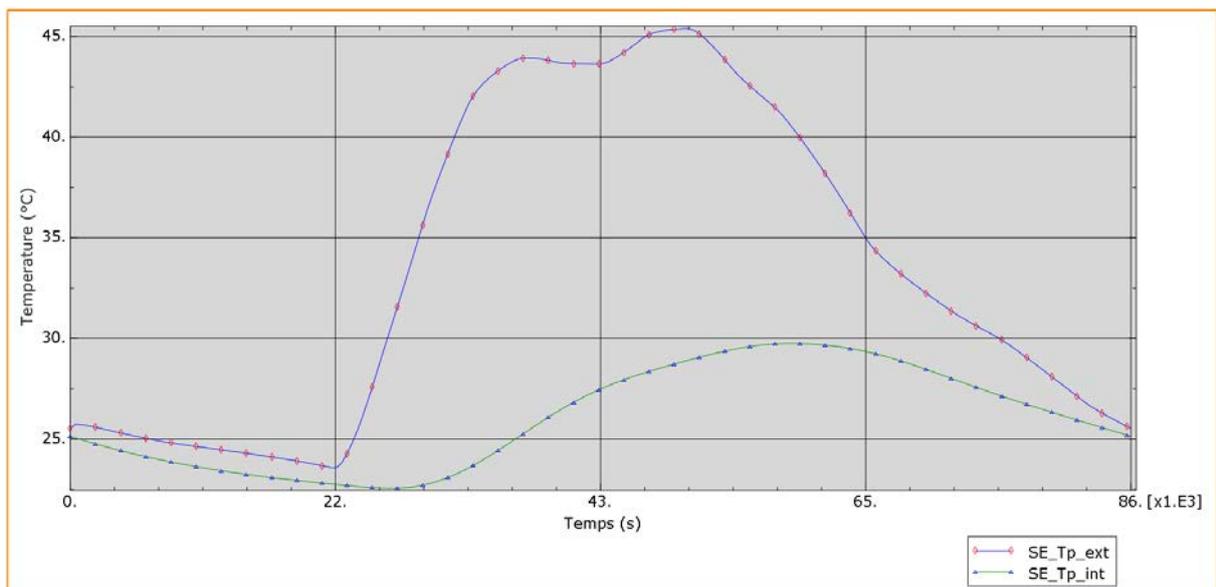


Figure 70 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi \_Sud-Est

La variation de température dans la paroi orientée Sud-Est présentée à la Figure 70 est similaire à celle de la paroi orientée Est (Figure 69).

- Orientation Sud

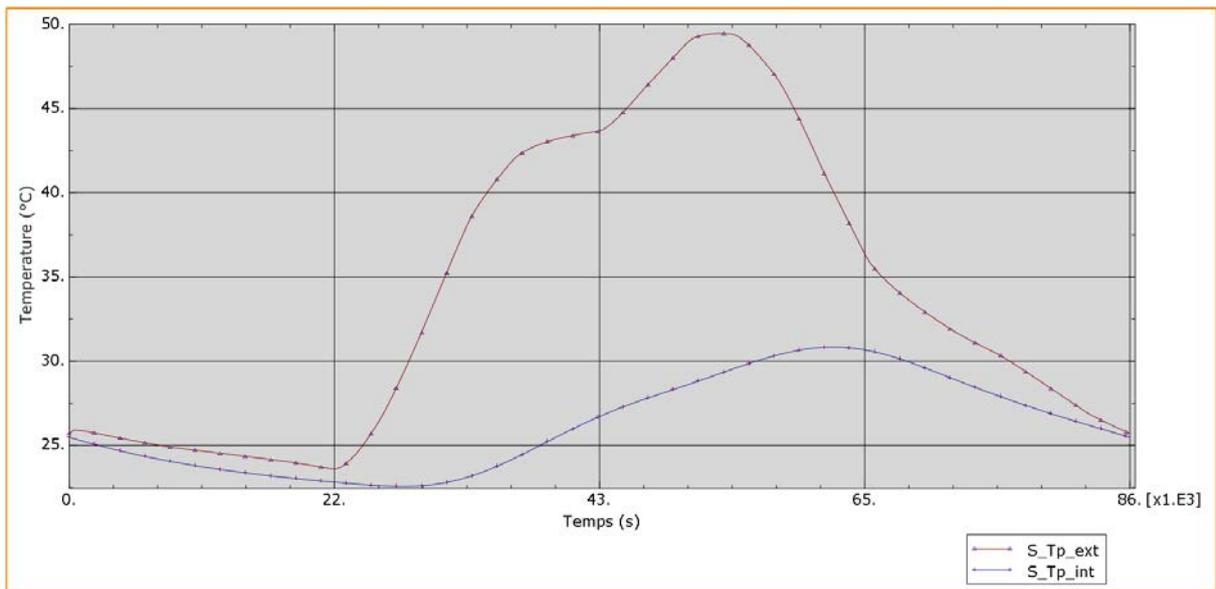


Figure 71 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi \_ Sud

La Figure 71 présente les prédictions de variation de la température dans la paroi orientée Sud au cours de la journée.

Les températures maximales de paroi extérieure et intérieure augmentent légèrement par rapport aux portions de paroi orientées Est. En revanche, le déphasage reste inchangé (03h).

- Orientation Sud-Ouest

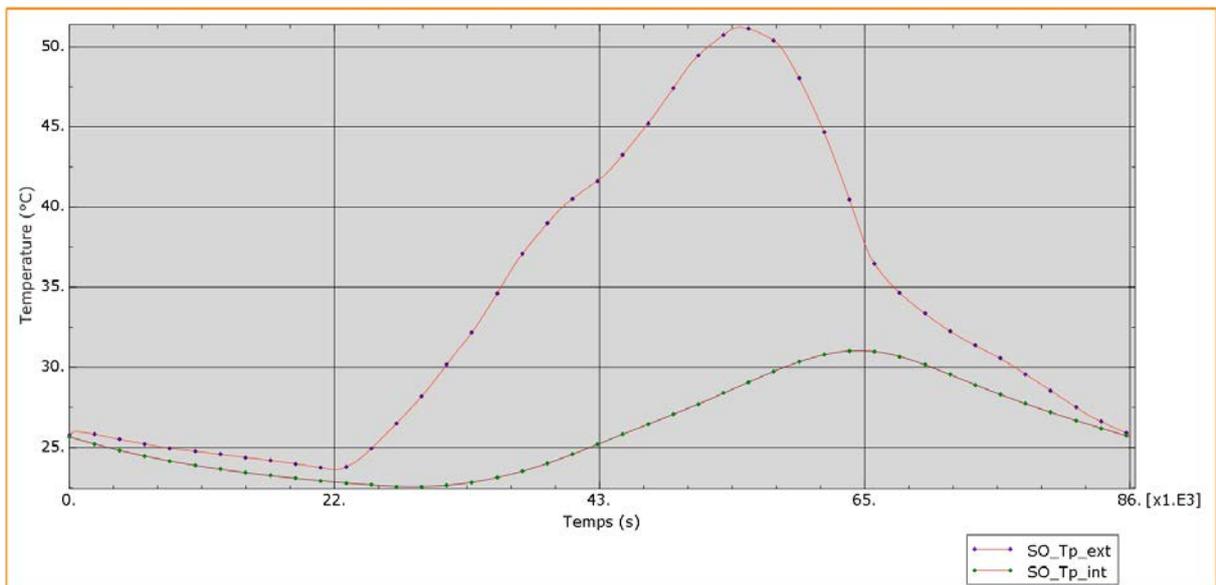


Figure 72 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi \_ Sud-Ouest

La Figure 72 présente les prédictions de variation de la température dans la paroi orientée Sud-Ouest au cours de la journée.

La conjugaison de l'effet de variation de la température ambiante et du rayonnement solaire, qui sont en phase, donne des températures de paroi extérieure et intérieure encore plus élevées que précédemment.

- Orientation Ouest

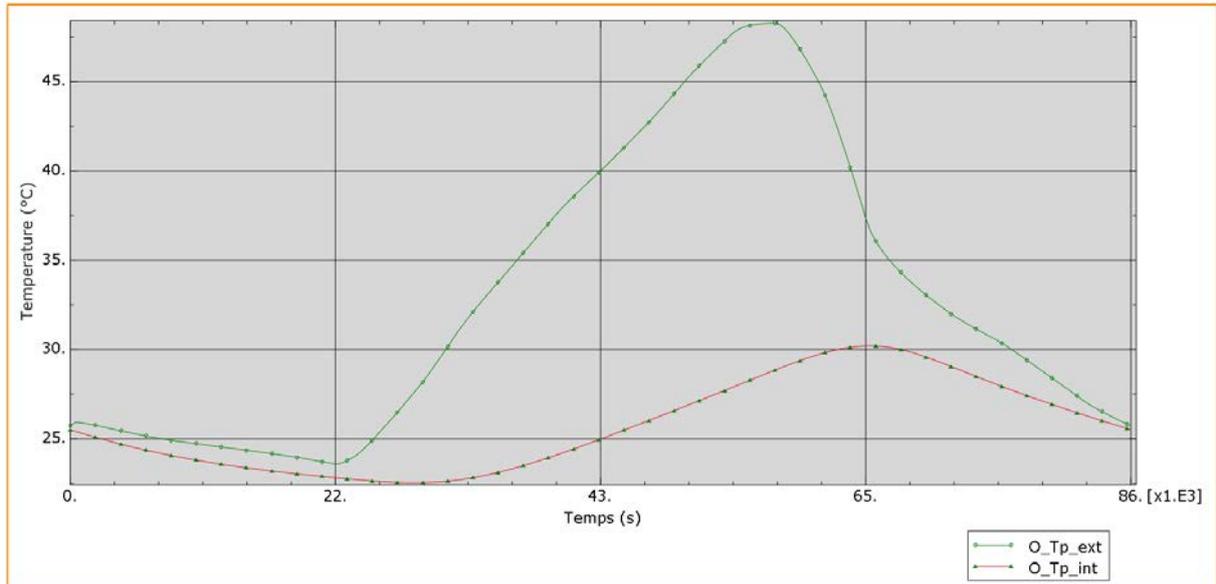


Figure 73 : Variation de température à travers l'épaisseur de paroi \_ Ouest

La Figure 73 présente les prédictions de variation de la température dans la paroi orientée Ouest au cours de la journée.

Cette portion de paroi se comporte quasiment comme la précédente. La température maximale extérieure de cette paroi est légèrement inférieure à celle de la paroi orientée Sud-Ouest. Cette situation se justifie par une durée d'exposition de la paroi orientée Sud-Ouest supérieure à celle de la paroi Ouest, bien que le pic de flux solaire soit enregistré sur cette dernière. La chute de la température ambiante compense cette augmentation du flux solaire.

#### 5.1.2. Variation de la température de paroi intérieure

Les Figure 74 et Figure 75 présentent les prédictions de variation de la température de paroi du silo en fonction de l'orientation.

La portion de paroi orientée Sud-Ouest est celle qui chauffe le plus avec 51°C à l'extérieur et 31°C au plus fort de la journée.

La variation quotidienne de la température à l'intérieur du grenier est directement proportionnelle à la variation de la température ambiante. La température intérieure a quasiment le même ordre de grandeur que la température ambiante avec un déphasage de 03h.

Pendant la journée, la paroi extérieure absorbe le flux de chaleur solaire et tend à accumuler de l'énergie thermique à l'intérieur de la paroi. Cette énergie est dissipée durant la nuit par la baisse de la température ambiante et par échanges convectifs avec le milieu environnant.

La température de pointe enregistrée sur la paroi intérieure du silo est de 31°C à 18h et un minimum de 22°C à 08h, avec une amplitude crête à crête de 09°C.

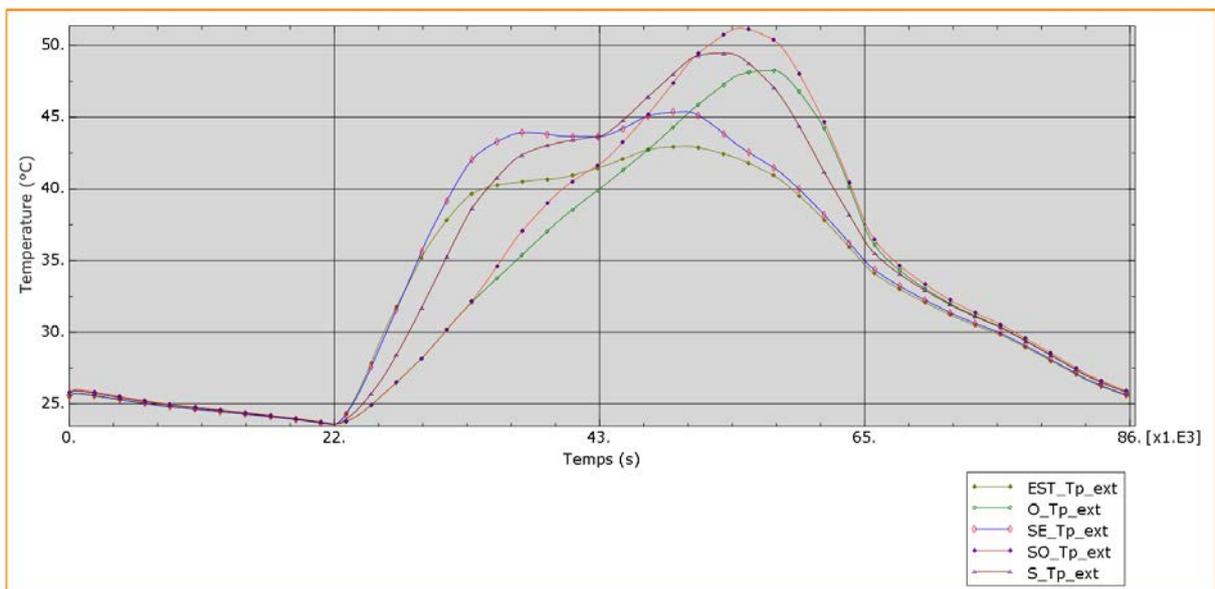


Figure 74 : Variation de la température de paroi extérieure en fonction du temps

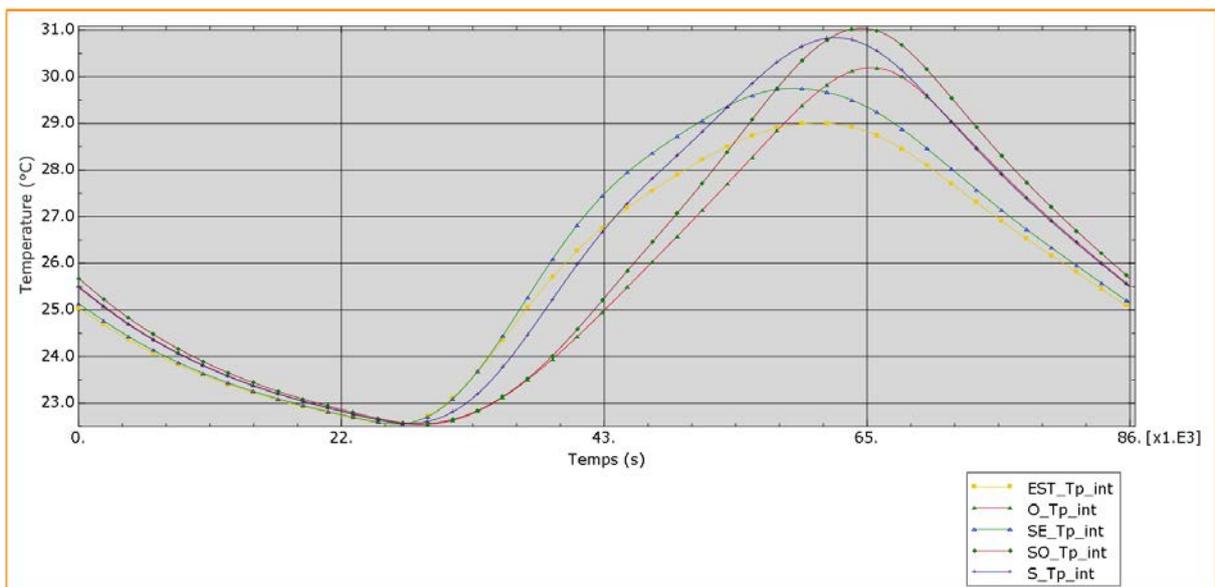


Figure 75 : Variation de la température de paroi intérieure en fonction du temps

## 5.2. Échauffement des grains

Les variations de température dans les parois des silos peuvent provoquer des successions d'expansions et contractions de la matière ensilée entraînant ainsi des défaillances structurelles.

La Figure 76 montre l'évolution du flux de chaleur entrant dans le silo (paroi intérieure) en fonction du temps et suivant l'orientation de la portion de paroi.

Déterminons l'échauffement de céréales induit par cette densité de flux de chaleur.

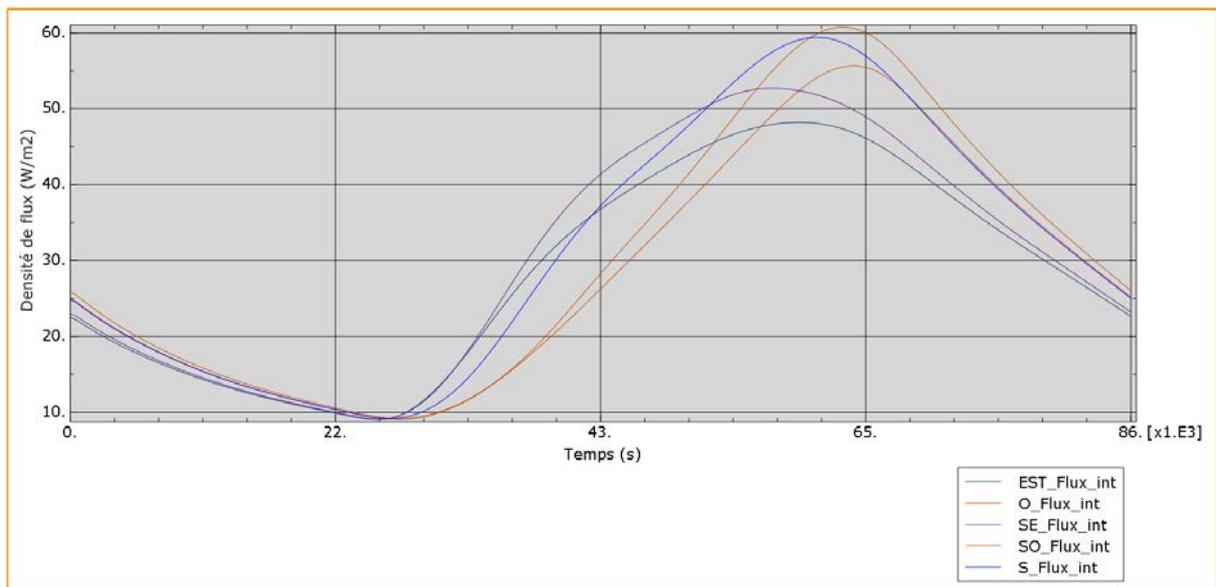


Figure 76 : Densité de flux de paroi intérieure suivant l'orientation

Les caractéristiques physiques du blé, utilisé pour cette simulation, sont présentées au Tableau 16.

Tableau 16 : Propriétés physique du blé

Propriété	Valeurs
Masse volumique	800 kg/m <sup>3</sup>
Chaleur spécifique	2,18 kJ/°C/kg
Coef de conductivité	0,19 W/m.°C

Le flux de chaleur entrant dans le silo se dissipe par conduction, par convection et par échauffement de la masse de céréales.

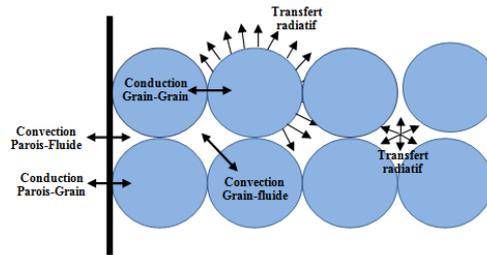


Figure 77 : Échanges de chaleur dans les grains

Supposons que tout le flux entrant va chauffer les céréales, pour apprécier l'élévation de température correspondante soit la vitesse d'échauffement.

$$\Phi = m.c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (22)$$

$$\Delta T = \frac{\Phi \cdot \Delta t}{m.c_p}$$

$\Delta T$  = élévation de température en °C

$\Phi$  = puissance en Watt

$m$  = masse de grains à chauffer en kg

$C_p$  = chaleur spécifique en kcal/kg.°C

Soit  $E$ , l'énergie transmise aux grains par mètre-carré de paroi.  $E$  est calculée en intégrant le flux entrant sur le temps.

$$\text{On a donc } \Delta T = \frac{E}{m.c_p}.$$

La face nord du silo n'étant pas ensoleillée, l'énergie qui entre par la face sud sert également à chauffer les grains situés du côté nord. En effet, la densité de flux qui entre par la portion de paroi orientée sud, participe à chauffer non seulement la portion de grains orientée sud mais également celle orientée nord (Figure 78).

Tableau 17 : Échauffement des grains par jour de stockage (jour le plus chaud)

	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest
<b>Energie (J)</b>	307703,97	327797,111	340259,346	327239,305	307117,367
<b><math>\Delta T/J</math> (°C)</b>	0,15	0,16	0,16	0,16	0,15

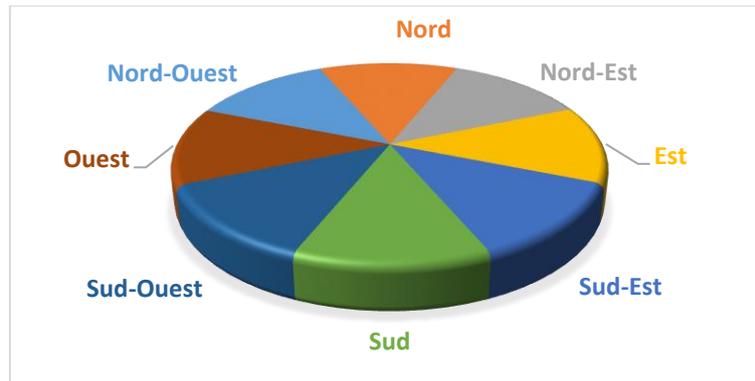


Figure 78 : disposition des grains suivant l'orientation

Au jour le plus chaud de l'année, les grains stockés connaissent une élévation de température de  $0,16^{\circ}\text{C}$  environ. Cette élévation de température est homogène dans le silo.

Avec la prise en compte de paramètres tels que la jupe en paille (bon isolant thermique) qui protège le corps du grenier et la présence de l'air de régulation dans la coupole supérieure, cet échauffement des grains sera amoindri.

## 6. Déformations induites par la variation de température

Les changements de température le long de la paroi du silo produisent des dilatations et des contractions qui provoquent des contraintes dans cette paroi [240], [255], [256].

Les méthodes classiques de calcul de silo tels que l'Eurocode 1991-4 [135], qui traite de la classification des actions affectant ces structures, évoquent l'existence d'une charge thermique, mais aucune indication n'est donnée pour son identification et le fait qu'elle puisse engendrer la ruine.

L'analyse de ces actions et la réponse des parois de silo par la méthode des éléments finis a montré son efficacité avec les travaux de Moran, Aguado et Ayuga [124], [253], [257], [258].

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé, l'effet des grains sur la paroi. En considérant les mêmes paramètres de calcul que l'analyse des transferts thermiques, analysons l'effet mécanique des variations de température sur la paroi. Pour cela, supposons un élément de paroi d' $1\text{m}^2$  orienté Sud-Ouest ; quelles sont les déformations subies par cette dernière au cours d'une journée ?

La simulation faite dans Abaqus avec l'analyse « couplé temp-déplacement » se présente comme suit :

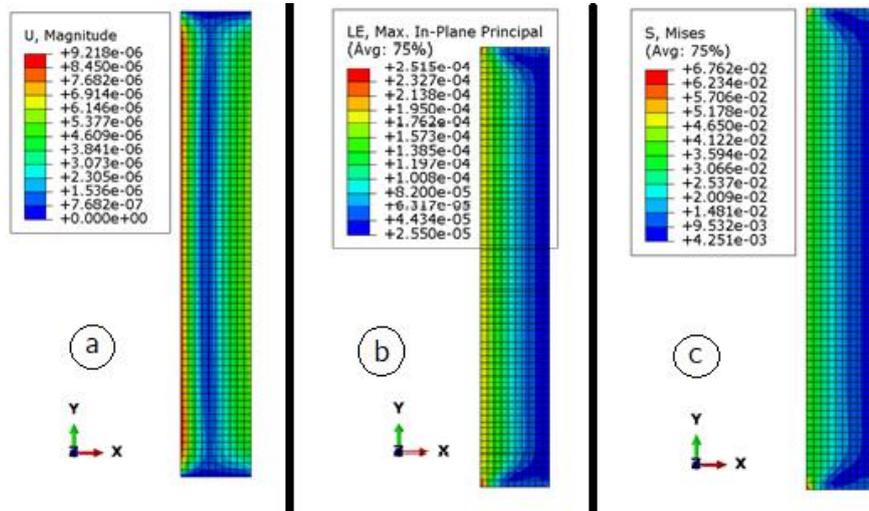


Figure 79 : État de contrainte et de déformation induite par la variation de température à 17h

La Figure 79 présente l'état de contrainte et déformation maximale dans la paroi du grenier.

Les sollicitations mécaniques sont maximales autour de 17h, comme le montrent les Figure 80, Figure 81 et Figure 82.

Sur la Figure 79-a, on peut observer que le déplacement maximal induit par la variation de température ambiante et du rayonnement solaire est de l'ordre de  $9,21 \cdot 10^{-3}$  mm au niveau de la face extérieure exposée tandis que le déplacement maximal induit par la charge des céréales est de 0,8 mm (Figure 83). Le déplacement induit par la variation de température est de l'ordre du centième de celui induit par les grains.

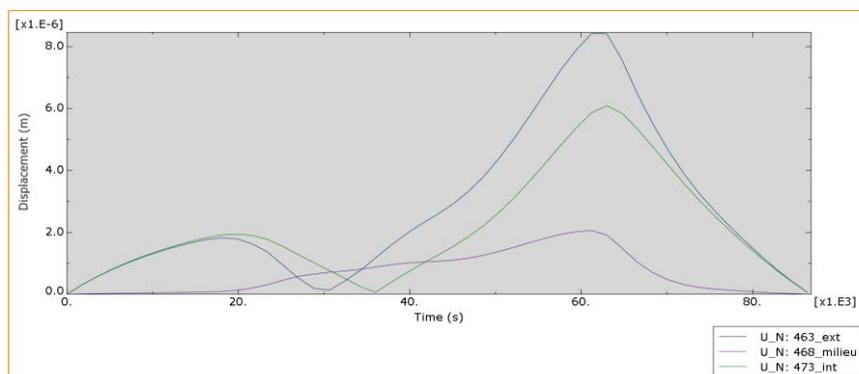


Figure 80 : Déplacement induit par la variation de température dans la paroi

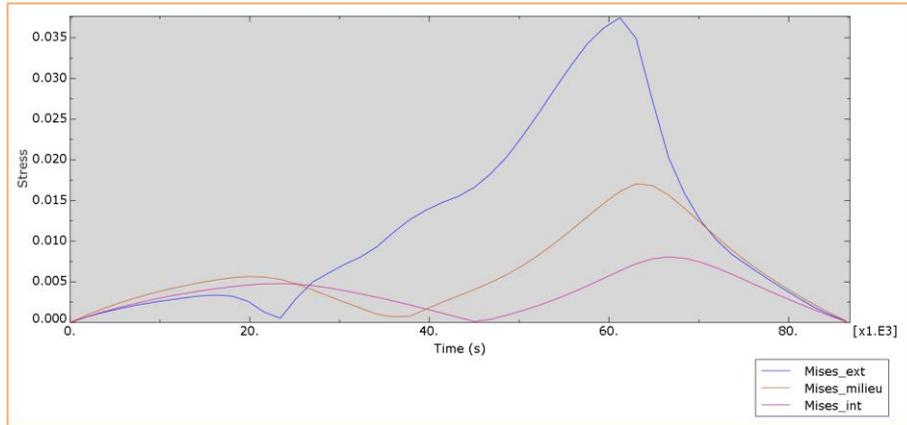


Figure 81 : Contrainte équivalente induite par la variation de température dans la paroi

Dans le même ordre d'idée, on peut observer que la contrainte induite par la variation de température est d'environ 0,04 MPa (Figure 81), contre 0,43 MPa (Figure 51) pour l'analyse structurale dans la zone de transition avec une vidange accélérée.

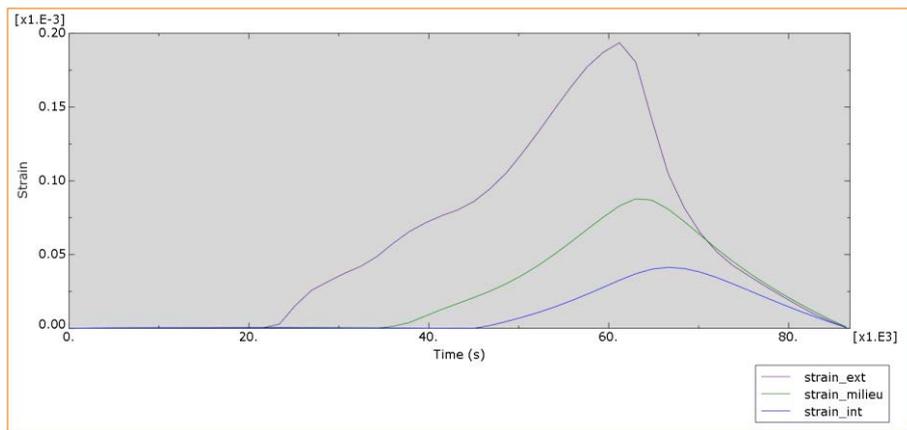


Figure 82 : Déformation induite par la variation de température dans la paroi

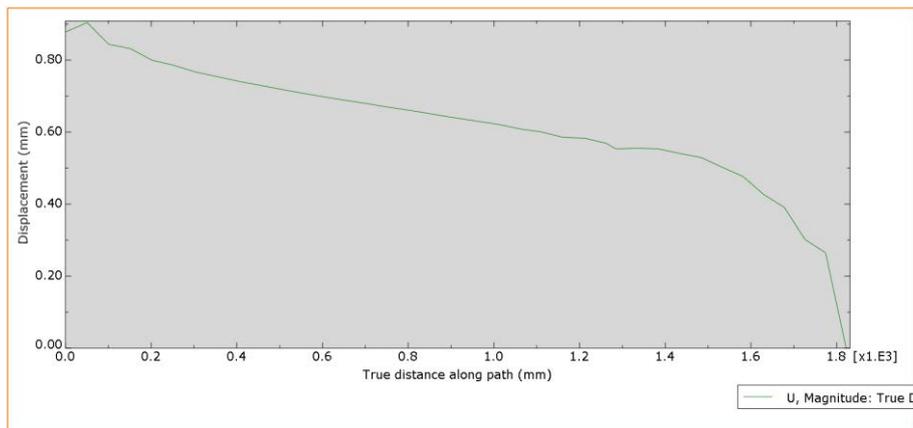


Figure 83 : Déplacement induit par la pression des céréales

Les contraintes et déformations induites par la variations température dans la paroi du silo le long de la journée sont largement inférieures aux contraintes et déformations induites par les actions particulières dues à l'exploitation du silo.

Les effets de variations de températures sur les parois sont négligeables comparés aux contraintes induites par l'action de la matière ensilée sur la paroi du silo.

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les caractéristiques thermophysiques du banco, ensuite nous avons étudié l'influence des fluctuations du rayonnement solaire et de température ambiante avec le cycle de jours et de nuit sur la paroi du silo.

La valeur moyenne de la conductivité thermique, déterminée par la méthode fluxmétrique est de 0,645 (W/m.K).

À partir des données climatiques, nous avons calculé, le rayonnement global reçu par la paroi suivant son orientation et à chaque instant de la journée. Nous en avons déduit le profil de température dans la paroi des silos en banco avec la méthode des éléments finis briques d'Abaqus.

La portion de paroi orientée sud est la plus exposée au soleil; elle a le temps d'insolation le plus élevé. Globalement, les températures de paroi sont similaires d'une portion de paroi à l'autre. Les températures maximales de paroi intérieure varient de 29°C à 31°C suivant l'orientation de la portion. L'amplitude thermique journalière de la paroi est de 09°C.

Au jour le plus chaud de l'année, la chaleur accumulée par les grains induit un échauffement de 0,16°C. Cet échauffement pourrait être atténué dans la journée à l'intérieure du grenier par le chapeau en paille qui protège la coupole supérieure contenant « l'air de régulation ». Ces conditions d'ambiance dans le grenier sont favorables à une bonne conservation.

Enfin, l'analyse couplée thermique et mécanique a montré que les déformations induites par la fluctuation de température et de rayonnement sont très faibles comparée à l'action des grains. Les variations de température de la paroi n'affectent pas la stabilité des silos en banco.



# Conclusion générale et perspectives

Face au besoin accru de stabilisation du stock vivrier, pour réduire la période de soudure, et le refus par les producteurs des magasins modernes, nous nous sommes proposés d'étudier la possibilité d'améliorer l'existant. Autrement dit, étudier la possibilité d'augmenter la capacité des greniers (silo) traditionnels de stockage de céréales sans changer ni la forme, ni le matériau de construction, spécifique à la région.

Notre étude s'est focalisée sur quatre axes essentiellement.

Dans un premier temps, l'identification de l'objet d'étude, le grenier traditionnel du nord Bénin nous a permis de comprendre la spécificité de cet ouvrage dont l'architecture est inspirée des maisons en terre de la région, les « tata-somba ». Ces greniers ont une durée de vie de plus de 50 ans. On comprend vite pourquoi les producteurs du Nord-Bénin sont jaloux de leur grenier.

Nous nous sommes ensuite intéressés à ce qui fait le succès de ces greniers et qui est commun avec les habitations, le banco. Nous avons fait la caractérisation physique et mécanique de ses constituants : la terre de barre, la paille de riz et la décoction des graines de néré, puis nous avons proposé le meilleur dosage qui donne les caractéristiques mécaniques maximales.

Des mélanges de différents dosage ont été testé pour déterminer l'influence de la paille de riz et de la décoction de néré sur les propriétés mécaniques du banco : les fissurations, le taux de retrait, la masse volumique, et les résistances mécaniques (compression et traction). Les résultats indiquent globalement une amélioration de la résistance mécanique composite d'argile avec l'augmentation du taux massique de paille et de décoction. En analysant simultanément tous les paramètres physico-mécaniques observés, pour le mélange, nous avons proposé un ajout optimal de paille de riz, de 2% en masse, et de 6% pour la décoction.

Une fois le matériau de construction des greniers cerné, nous nous sommes intéressés au comportement de la paroi au chargement de céréales notamment dans les phases opérationnelles où les sollicitations sont maximales. La simulation de l'action des grains, à la vidange et au remplissage sur la paroi du grenier a été faite par la méthode des éléments finis. La paroi du grenier et les céréales ont été modélisées par les éléments briques dans Abaqus en considérant une loi de comportement élastoplastique pour la matière ensilée et en simulant l'interaction paroi-grains avec l'algorithme « pénalty ». L'analyse des déformations induites dans la paroi montre que les sollicitations sont maximales au fond du grenier dans la zone de transition. Ces sollicitations sont plus grandes dans les phases de remplissage et de vidange et si le processus est plus rapide. La simulation du remplissage progressif montre que le nombre de couche de remplissage critique est de 10. L'étude de l'état de contrainte et de déformation dans la paroi d'un grenier agrandi de 3 à 8m<sup>3</sup> montre le matériau est sollicité dans sa zone élastique. La contrainte équivalente maximale est de 0,428 MPa contre 0,491 MPa pour la résistance pratique élastique en considérant un coefficient de sécurité de 1,5.

L'effet des échauffements successifs sur la paroi du grenier a été pris en compte à travers la modélisation des transferts thermiques. La modélisation des profils de température dans diverses coupes orientées du silo montre que le flux est bien amorti, les températures de paroi intérieures frôlent la température ambiante avec un déphasage de trois heures. Ces conditions d'ambiance dans le grenier garantissent une bonne conservation.

Par ailleurs, les déformations induites par la fluctuation de température et de rayonnement n'ont qu'une trop faible incidence mécanique sur la paroi comparée à l'action des grains.

L'optimisation des propriétés mécaniques du banco nous a permis même avec des paramètres de simulation sévères (temps de remplissage et de vidange exagéré par rapport à la réalité) de passer de 3 à 8 m<sup>3</sup> de capacité de stockage pour les greniers traditionnels.

Ces greniers agrandis pourront aussi servir de réserves de céréales pour les groupements de producteurs.

Au terme de ces travaux, des perspectives s'ouvrent pour l'amélioration de la méthode de calcul de ces greniers et pour pousser plus loin l'optimisation.

L'étude des mécanismes de sorption est fortement recommandée pour comprendre comment les molécules de tanin contenu dans la décoction de néré interagissent avec les feuillets d'argile pour qu'elle joue ce rôle d'adjuvant. La mise à contribution des méthodes numériques d'homogénéisation pour développer des formulations plus performantes du banco avec la modélisation multi-échelle.

Pour mieux évaluer l'action des grains, un modèle d'élément discret pourrait être utilisé pour simuler les processus de remplissage et de vidange dans les silos et le comparer au modèle élément fini.

Enfin des tests, grandeur nature, avec différents produits agricoles dans des silos sont recommandés pour déterminer les vraies conditions d'exploitation (vitesse d'écoulement).



# Bibliographie

- [1] W. Kidane, M. Maetz, and P. Dardel, "Sécurité alimentaire et développement agricole en Afrique subsaharienne," *Doss. pour l'accroissement des soutiens publics. Rapp. Princ. Rome, FAO*, 2006.
- [2] F. Mestrum, *Mondialisation et pauvreté: de l'utilité de la pauvreté dans le nouvel ordre mondial*. Editions L'Harmattan, 2002.
- [3] S. Bongji, A.-S. Le Dain, A. Cossi, and G. Obama, "Analyse Globale de la Vulnérabilité, de la Sécurité Alimentaire et de la Nutrition (AGVSAN)," p. 168, 2009.
- [4] E. Zinzindohoue, *Etat des lieux de la sécurité alimentaire dans le département de l'Atacora (au Nord Ouest du Bénin) et analyse des politiques publiques*. CERAH Centre d'enseignement et de recherche en action humanitaire de Genève, 2012.
- [5] N. Abdourahmane, B. Mathieu, A. Teyssier, and R. Bello, "La sécurité alimentaire: une affaire de paysans," 2003, p. 10--p.
- [6] J.-F. Cruz, F. Troude, D. Griffon, and J.-P. Hebert, *Conservation des grains en régions chaudes*. Ministère de la coopération et du Développement, 1988.
- [7] A. Arouna, P. Adégbola, and G. Biauou, "Aspect économiques du stockage et de la conservation du maïs au sud-{Bénin}: analyse des coûts," *Bull. la Rech. Agron. du Bénin*, no. Numéro spécial 2, 2011.
- [8] A. Diop, D. Hounhouigan, and K. D. Kossou, "Manuel de référence pour technicien spécialisés: technologie post-récolte et commercialisation des produits vivriers," *ADA Expert. Québec, Canada*, pp. 89–109, 1997.
- [9] A. MABOUDOU, "adoption et diffusion de technologies ameliores de stockage en milieu paysan dans le centre et le nord du benin," Université de Lomé, Lomé, 2003.
- [10] M. Gibigaye *et al.*, "Physical and mechanical characteristics of the earthen barns used

- for food crop storage in the North West of Benin (West Africa),” *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*, no. 1, 2013.
- [11] P. Adégbola, “Analyse des facteurs affectant l’adoption des greniers améliorés,” 2002.
- [12] P. Fandohan, “Introduction du grenier fermé en terre au Sud Bénin.” 2000.
- [13] G. A. Maboudou, “Adoption et diffusion des technologies améliorées de stockage du maïs en milieu paysan dans le Centre et le Nord du Bénin,” Université de Lomé, 2003.
- [14] J.-F. Cruz, J. D. Hounhouigan, and F. Fleurat-Lessard, *La conservation des grains après récolte*. Editions Quae, 2016.
- [15] J.-L. Multon, “Water Vapour and Heat Transfers in Grains Silos and their Consequences on Storage,” *Control. Atmos. Storage Grains*, vol. 1, pp. 399–408, Jan. 1980.
- [16] G. C. Mrema, L. O. Gumbe, H. J. Chepete, and J. O. Agullo, *Rural structures in the tropics. Design and development*. Rome: FAO, 2011.
- [17] J. Thierry and G. Hubert, *CRAterre : Construction en Arcs, voûtes et Coupoles*. 1994.
- [18] H. Bartali, “La terre armé de paille pour les constructions,” 1991, p. 551.
- [19] J. E. AUBERT, “Caractérisation des briques de terre crue de Midi- Pyrénées,»,” Institut National des sciences Appliquées-Université Paul SABATIER Toulouse III, Toulouse, 2013.
- [20] R.-P. Wafer, “L’adobe, une solution pour la construction d’habitations écologiques dans une zone à forte activité sismique comme le Chili,” Université de Sherbrooke, 2010.
- [21] G. Minke, *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Walter de Gruyter, 2012.
- [22] C. Labintan, *Déformations, Sollicitations, et Contraintes dans une paroi de grenier*. Saarbrücken Allemagne: Éditions universitaires européennes, 2015.
- [23] J. Y. P. Tohinlo, “Développement sur les exploitations agricoles familiales et les

menages de l'Atacora," Université de Liège-Gembloux, Belgique, 2016.

- [24] P. FANDOHAN, *Guide pratique de construction et d'utilisation du grenier en terre amélioré pour le stockage du maïs*. 2010.
- [25] CNERTP, "Système de stockage décentralisé-Recherche sur les greniers en terre au Bénin," Cotonou, 1993.
- [26] F. Aouissi, "Comportement physique et mécanique de l'adobe paillé," 2000.
- [27] M. Bouhicha, F. Aouissi, and S. Kenai, "Performance of composite soil reinforced with barley straw," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 617–621, May 2005.
- [28] O. J. Olayemi, A. R. Oyi, and T. S. Allagh, "Comparative evaluation of maize, rice and wheat starch powders as pharmaceutical excipients," vol. 7, no. 1, pp. 131–138, 2008.
- [29] B. E.-D. E. Hegazy, H. A. Fouad, and A. M. Hassanain, "Incorporation of water sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making," *Adv. Environ. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 83–96, Mar. 2012.
- [30] D. Eliche-Quesada, M. A. Felipe-Sesé, J. A. López-Pérez, and A. Infantes-Molina, "Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks," *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 1, pp. 463–475, 2017.
- [31] K.-Y. Chiang, P.-H. Chou, C.-R. Hua, K.-L. Chien, and C. Cheeseman, "Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks," *J. Hazard. Mater.*, vol. 171, no. 1, pp. 76–82, 2009.
- [32] F. V. Riza and I. A. Rahman, "17 – The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks," in *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks*, 2015, pp. 379–392.
- [33] E. Quagliarini and S. Lenci, "The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient {Roman} adobe bricks," *J. Cult. Herit.*, vol. 11, no. 3, pp. 309–314, Jul. 2010.
- [34] E. Quagliarini, S. Lenci, and M. Iorio, "Mechanical properties of adobe walls in a Roman Republican domus at Suasa," *J. Cult. Herit.*, vol. 11, no. 2, pp. 130–137, Apr.

2010.

- [35] F. Parisi, D. Asprone, L. Fenu, and A. Prota, "Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers," *Compos. Struct.*, vol. 122, pp. 300–307, Apr. 2015.
- [36] N. Desborough and S. Samant, "Research and Solutions: Is Straw a Viable Building Material for Housing in the United Kingdom?," *Sustain. J. Rec.*, vol. 2, no. 6, pp. 368–374, Dec. 2009.
- [37] D. A. Bainbridge, "High performance low cost buildings of straw," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 16, no. 3, pp. 281–284, 1986.
- [38] D. M. Andres, D. L. Manea, R. Fechete, and E. Jumate, "Clay Mortar Performance Improvement by Modifying the Physical Characteristics of Wheat Straw," *Procedia Technol.*, vol. 22, pp. 335–342, 2016.
- [39] F. Fratini, E. Pecchioni, L. Rovero, and U. Tonietti, "The earth in the architecture of the historical centre of Lamezia Terme (Italy): Characterization for restoration," *Appl. Clay Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 509–516, 2011.
- [40] S. Serrano, C. Barreneche, and L. F. Cabeza, "Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 108, pp. 105–111, Apr. 2016.
- [41] M. J. O'Dogherty, J. A. Huber, J. Dyson, and C. J. Marshall, "A Study of the Physical and Mechanical Properties of Wheat Straw," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 62, no. 2, pp. 133–142, Oct. 1995.
- [42] M. Tavakoli, H. T. M. H. Azizi, and G. H. Haghayegh, "Comparison of Mechanical Properties Between Two Varieties of Rice Straw," *J. Food Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 50–54, 2010.
- [43] B. Sorgho *et al.*, "Strength and creep behavior of geomaterials for building with tannin addition," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 6, pp. 937–946, Jun. 2014.
- [44] I. Keita *et al.*, "Ageing of clay and clay–tannin geomaterials for building," *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 114–119, Jun. 2014.

- [45] S. Banakinao, S. Tiem, K. Lolo, Y. Koutsawa, and K.-S. Bedja, *Dataset of the use of tannin of néré (parkia-biglobosa) as a solution for the sustainability of the soil constructions in West Africa*, vol. 8. Elsevier, 2016, pp. 474–483.
- [46] B. Sorgho *et al.*, “Étude des propriétés mécaniques des géomatériaux argileux associant la décoction de Parkia Biglobosa (nééré),” *Comptes Rendus Chim.*, vol. 19, no. 7, pp. 895–901, Jul. 2016.
- [47] V. S. Burroughs, “Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction.” University of New South Wales, 2001.
- [48] A. P’Kla, “Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée ({BTC}): application aux maçonneries" {BTC}-{Mortier} de terre",” 2002.
- [49] A. Mesbah, J. C. Morel, and M. Olivier, “Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents,” *Mater. Struct.*, vol. 32, no. 9, p. 687, Nov. 1999.
- [50] M. Olivier, “Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en bloc sur terre,” <http://www.theses.fr>, Jan. 1994.
- [51] J. P’kla, H. D. B.-R. française de génie civil, and undefined 2003, “Essai in situ sur blocs de terre comprimée,” *researchgate.net*.
- [52] J. Morel, P. Abalo, and H. Di Benedetto, “Essai in situ sur blocs de terre comprimée Essai in situ sur blocs de terre comprimée Interprétation en compression ou traction de l’essai,” vol. 5119, no. December, 2017.
- [53] G. A. De Azeredo, “Mise au point de procédures d’essais mécaniques sur mortiers de terre : application à l’étude de leur rhéologie,” Lyon, INSA, 2005.
- [54] O. Izemmouren, K. Gadri, and A. Guettala, “Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée,” 2014.
- [55] C. H. Kouakou and J. C. Morel, “Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 44, no. 1, pp. 27–34, Apr. 2009.

- [56] M. Moevus, R. Anger, L. Fontaine, M. Moevus, R. Anger, and L. Fontaine, "Hygrothermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review To cite this version: HAL Id: hal-01005948," 2014.
- [57] L. Ronsoux *et al.*, "Poured Earth as concrete To cite this version: HAL Id: hal-01006024," 2014.
- [58] M. Olivier, "Restauration des structures en terre crue en fonction de leur technologie de construction," 1993, pp. 673–680.
- [59] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, and F. Vitoux, "Building with earth," *Mud Village Soc. New Delhi*, 1991.
- [60] H. Houben, H. Guillaud, CRAterre., and Intermediate Technology Publications., *Earth construction: a comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications, 1994.
- [61] H. Houben and H. Guillaud, *Traité de construction en terre*. Editions Parenthèses, 1989.
- [62] J.-C. Morel, A. Pkla, and P. Walker, "Compressive strength testing of compressed earth blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 303–309, Feb. 2007.
- [63] Q.-B. Bui and J.-C. Morel, "Assessing the anisotropy of rammed earth," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 9, pp. 3005–3011, 2009.
- [64] A. Fabbri, J. M.-N. and Vernacular, and undefined 2016, "Earthen materials and constructions," *books.google.com*.
- [65] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, 2004.
- [66] M. Hall and Y. Djerbib, "Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, no. 4, pp. 269–280, 2004.
- [67] A. Bourges and S. Simon, "Physical-mechanical properties on artificial adobe," *Getty Conserv. institute, Los Angeles*, 2003.

- [68] H. Van Damme, "L'eau et sa représentation," *Mécanique des sols non saturés, Lavoisier, Paris*, pp. 23–68, 2002.
- [69] F. Volhard, U. Röhlen, and D. Lehm, *Lehmbau-Regeln: Begriffe, Baustoffe, Bauteile*. Vieweg, 1999.
- [70] L. Fontaine, "Cohésion et comportement mécanique de la terre comme matériau de construction," *DPEA Report, Lyon Insa*. 115p, 2004.
- [71] D. Gelard, "Identification et caractérisation de la cohésion interne du matériau terre dans ses conditions naturelles de conservation," Jan. 2005.
- [72] P. A. Jaquin, C. E. Augarde, D. Gallipoli, and D. G. Toll, "The strength of unstabilised rammed earth materials," *Géotechnique*, vol. 59, no. 5, pp. 487–490, Jun. 2009.
- [73] V. Mollion, "Etude du comportement mécanique du pisé," *Internsh. report. Master, Lyon ENTPE*, 2009.
- [74] D. Ciancio, P. Jaquin, and P. Walker, "Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth," *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, pp. 40–47, May 2013.
- [75] A. Heath, P. Walker, and J. Burt, "Improving the bond strength of unfired clay masonry," in *International Symposium on Earthen Structures.*, 2007.
- [76] NF EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances." 2016.
- [77] ASTM C67-12, "Méthodes d'essai normalisées ASTM C67-12 pour l'échantillonnage et l'essai des briques et des carreaux d'argile structurelle," West Conshohocken, 2012.
- [78] ASTM D2166-06, "ASTM D2166 - 06 Méthode d'essai standard pour la résistance à la compression non confinée du sol cohésif," West Conshohocken, 2006.
- [79] NF EN 13286-41, "Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques," *European Committee for Standardization, Brussels*. 2003.
- [80] A. K. Bera, S. N. Chandra, A. A. Ghosh, and A. A. Ghosh, *Unconfined compressive*

- strength of fly ash reinforced with jute geotextiles*, vol. 27, no. 5. Elsevier, 2009, pp. 391–398.
- [81] H. Gullu, K. Hazirbaba, and Elsevier Science (Firm), “Unconfined compressive strength and post-freeze–thaw behavior of fine-grained soils treated with geofiber and synthetic fluid,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 62, no. 2–3, pp. 142–150, Jul. 2010.
- [82] L. Aouba, C. Bories, M. Coutand, B. Perrin, and H. Lemerrier, “Properties of fired clay bricks with incorporated biomasses: Cases of Olive Stone Flour and Wheat Straw residues,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 7–13, 2016.
- [83] L. Turanli and A. Saritas, “Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1747–1752, 2011.
- [84] Q. Piattoni, E. Quagliarini, and S. Lenci, “Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2067–2075, Apr. 2011.
- [85] H. Binici, O. Aksogan, M. N. Bodur, E. Akca, and S. Kapur, “Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 4, pp. 901–906, Apr. 2007.
- [86] P. Walker and Standards Australia International., *The Australian earth building handbook*. Standards Australia International, 2002.
- [87] NZ4298, *Materials and workmanship for earth buildings*. Wellington, 1998.
- [88] NTE E0.80, *Adobe: Norma Técnica de Edificación*. Lima, 2000.
- [89] 14.7.4NMAC, *New Mexico Earthen Building Materials Code*. 2006.
- [90] P. J. Walker, “Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 17, no. 4, pp. 301–310, 1995.
- [91] P. Walker, *Rammed earth : design and construction guidelines*. BRE Bookshop, 2005.
- [92] M. Olivier, A. Mesbah, Z. El Gharbi, and J. C. Morel, “Mode opératoire pour la réalisation d’essais de résistance sur blocs de terre comprimée,” *Mater. Struct.*, vol.

- 30, no. 9, pp. 515–517, Nov. 1997.
- [93] J. Norton, "Handbook on Building with Earth," *Intermed. Technol. Publ. Ltd. London*, 1997.
- [94] P. G. McHenry, *Adobe and rammed earth buildings: design and construction*. University of Arizona Press, 1989.
- [95] S. Lenci, Q. Piattoni, F. Clementi, and T. Sadowski, "An Experimental Study On Damage Evolution of Unfired Dry Earth Under Compression," *Int. J. Fract.*, vol. 172, no. 2, pp. 193–200, Dec. 2011.
- [96] E. Adorni, E. Coisson, and D. Ferretti, "In situ characterization of archaeological adobe bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1–9, Mar. 2013.
- [97] P. Vega, A. Juan, M. Ignacio Guerra, J. M. Morán, P. J. Aguado, and B. Llamas, "Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 7, pp. 3020–3023, Jul. 2011.
- [98] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, and J. Almeida, "Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 36–44, 2012.
- [99] Ş. Yetgin, Ö. ÇAVDAR, and A. Çavdar, "The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 222–227, Mar. 2008.
- [100] E. A. Okunade, "Engineering Properties of Lateritic Adobe Bricks for Local Building Construction and Recommendations for Practice," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 9, pp. 1455–1459, 2007.
- [101] H. Binici, O. Aksogan, and T. Shah, "Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 313–318, May 2005.
- [102] V. Maniatidis, P. Walker, A. Heath, S. Hayward, and web-support@bath.ac.uk, "Mechanical and Thermal Characteristics of Rammed Earth," 2007.
- [103] J.-C. Morel, A. P'kla, and H. Di Benedetto, "Essai in situ sur blocs de terre

- comprimée," *Rev. Française Génie Civ.*, vol. 7, no. 2, pp. 221–237, Feb. 2003.
- [104] F. Bullen and B. Boyce, "Strength and durability of rammed earth walls for domestic and commercial construction," in *Proc Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, pp. 209–212.
- [105] C. Labintan, R. Benelmir, M. Gibigaye, and A. Donnot, "Characterization of the 'Banco,' a building material for a tropical and rural environment," *Int. J. Energy, Environ. Econ.*, vol. 23, no. 2, p. 203, 2015.
- [106] G. Azeredo, "Compressive strength testing of earth mortars," *J. Urban Environ. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 26–35, Jul. 2007.
- [107] Q. Bui, "Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques," 2008.
- [108] A. Hakimi, N. Yamani, and H. Ouissi, "Rapport: Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée," *Mater. Struct.*, vol. 29, no. 10, pp. 600–608, Dec. 1996.
- [109] V. Maniatidis and P. Walker, "Structural Capacity of Rammed Earth in Compression," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 230–238, Mar. 2008.
- [110] D. Silveira, H. Varum, and A. Costa, "Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 719–728, Mar. 2013.
- [111] F. F. Udoeyo, U. H. Iron, and O. O. Odim, "Strength performance of laterized concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 1057–1062, 2006.
- [112] L. Festugato, E. Menger, F. Benezra, E. A. Kipper, and N. C. Consoli, "Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length," 2017.
- [113] P. V. Divya, B. V. S. Viswanadham, and J. P. Gourc, "Evaluation of Tensile Strength-Strain Characteristics of Fiber-Reinforced Soil through Laboratory Tests," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 14–23, Jan. 2014.

- [114] E. F. Rodrigues, T. F. Maia, and D. R. Mulinari, "Tensile strength of polyester resin reinforced sugarcane bagasse fibers modified by esterification," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2348–2352, 2011.
- [115] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. B. Williams, "Physical , mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 797–809, 2015.
- [116] H. Niroumand, M. Zain, S. A.-I. Global, and undefined 2013, "Earth building materials, production, and construction techniques," *books.google.com*.
- [117] A. Thomson and P. Walker, "Durability characteristics of straw bales in building envelopes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 135–141, 2014.
- [118] A. W. Bruno, "Hygro-mechanical characterisation of hypercompacted earth for building construction By," 2016.
- [119] J. Ravenet, "Silos." Barcelona: Editores técnicos asociados, SA, 1977.
- [120] S. S. Safarian, *Design and construction of silos and bunkers*. Van nostrand reinhold company, 1985.
- [121] J. M. Rotter, P. T. Jumikis, S. P. Fleming, and S. J. Porter, "Experiments on the buckling of thin-walled model silo structures," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 271–299, 1989.
- [122] J. W. Carson, "Limits of Silo Design Codes," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 20, no. 2, p. 04014030, May 2015.
- [123] J. K. Walters, "A theoretical analysis of stresses in silos with vertical walls," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 13–21, 1973.
- [124] C. J. Brown and J. Nielsen, *Silos: fundamentals of theory, behaviour and design*. CRC Press, 2014.
- [125] J. Nielsen, "From silo phenomena to load models," in *International Conference on Structures and Granular Solids-From Scientific Principles to Engineering Applications, Structures and Granular Solids: From Scientific Principles to*

*Engineering Applications*, 2008, pp. 49–57.

- [126] Y. Maeda and S. Ishizaki, "ANALYSIS OF CYLINDRICAL-SHELLS FOR DESIGN OF STEEL SILOS," *J. Civ. Eng. Des.*, vol. 1, no. 4, pp. 325–354, 1979.
- [127] J. M. Rotter, "Bending theory of shells for bins and silos," *Trans. Mech. Eng.*, pp. 264–271, 1987.
- [128] J. M. Rotter and J. Teng, "Elastic Stability of Cylindrical Shells with Weld Depressions," *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 5, pp. 1244–1263, May 1989.
- [129] F. Ayuga, M. Guaita, P. J. Aguado, and A. Couto, "Discharge and the Eccentricity of the Hopper Influence on the Silo Wall Pressures," *J. Eng. Mech.*, vol. 127, no. 10, pp. 1067–1074, Oct. 2001.
- [130] F. Ayuga, M. Guaita, and P. Aguado, "SE—Structures and Environment: Static and Dynamic Silo Loads using Finite Element Models," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 78, no. 3, pp. 299–308, Mar. 2001.
- [131] J. Y. Ooi and J. M. Rotter, "Wall pressures in squat steel silos from simple finite element analysis," *Comput. Struct.*, vol. 37, no. 4, pp. 361–374, 1990.
- [132] J. Y. Ooi, L. Pham, and J. M. Rotter, "Systematic and random features of measured pressures on full-scale silo walls," *Eng. Struct.*, vol. 12, no. 2, pp. 74–87, 1990.
- [133] M. Reimbert and A. Reimbert, "Silos; traité théorique et pratique," 1959.
- [134] H. A. Janssen, "Janssen, HA, and Z. Vereins, 1895, Dtsch. Eng. 39 (25), 1045." *Dtsch. Eng.*, vol. 39, p. 1045, 1895.
- [135] CEN, *NF EN 1991-4*. 2007.
- [136] DIN, "DIN 1055-6\_\_Design loads for buildings and loads in silo bins," 2005.
- [137] ACI, *ACI 313 - 97\_ Standard Practice for Design and Construction of Concrete Silos and Stacking Tubes for Storing Granular Materials*. 1997.
- [138] D. M. Walker, "An approximate theory for pressures and arching in hoppers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 21, no. 11, pp. 975–997, 1966.

- [139] A. W. Jenike, J. R. Johanson, and J. W. Carson, "Bin Loads—Part 2: Concepts," *J. Eng. Ind.*, vol. 95, no. 1, p. 1, 1973.
- [140] A. W. Jenike, J. R. Johanson, and J. W. Carson, "Bin Loads—Part 3: Mass-Flow Bins," *J. Eng. Ind.*, vol. 95, no. 1, p. 6, 1973.
- [141] M. Koenen, "Berechnung des seitenund bodendrucks in silos," *Zentralbl. Bauverwaltung*, vol. 16, pp. 446–449, 1895.
- [142] K. Pieper and F. Wenzel, "Comments on DIN1055: design loads for buildings loads in silo bins," *Beton-und Stahlbetonbau*, pp. 6–11, 1963.
- [143] B. A. Petrov, "Experimentalnoe Opređenje Davlenia Cementa na Stenki Zhelezobetonnich Silosov (Determinación experimental de las presiones del cemento sobre las paredes de silos de hormigón)," *Cement*, vol. 2, pp. 21–25, 1958.
- [144] Y. Uematsu and K. Uchiyama, "An experimental investigation of wind-induced ovaling oscillations of thin, circular cylindrical shells," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 18, no. 3, pp. 229–243, 1985.
- [145] M. Sugita, "Flow and pressures of noncohesive granular materials in funnel-flow bins," in *Mechanical Engineering*, 1972, vol. 94, no. 12, p. 60.
- [146] J. Munch-Andersen and J. Nielsen, "Pressures in slender grain silos.," 1990.
- [147] Z. Zhong, J. Y. Y. Ooi, and J. M. M. Rotter, "The sensitivity of silo flow and wall stresses to filling method," *Eng. Struct.*, vol. 23, no. 7, pp. 756–767, Jul. 2001.
- [148] R. Kobyłka, J. Horabik, and M. Molenda, "Numerical simulation of the dynamic response due to discharge initiation of the grain silo," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 106–107, pp. 27–37, Feb. 2017.
- [149] M. Molenda, J. Horabik, S. A. Thompson, and I. J. Ross, "Bin loads induced by eccentric filling and discharge of grain," *Trans. ASAE*, vol. 45, no. 3, p. 781, 2002.
- [150] A. Ramírez, J. Nielsen, and F. Ayuga, "Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers," *Powder Technol.*, vol. 201, no. 1, pp. 7–20, 2010.
- [151] A. J. Sadowski and J. M. Rotter, "Buckling of very slender metal silos under eccentric

- discharge," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 4, pp. 1187–1194, 2011.
- [152] W.-F. Chen and E. Mizuno, *Nonlinear analysis in soil mechanics*. Elsevier Amsterdam, 1990.
- [153] P. V Lade, "Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 13, no. 11, pp. 1019–1035, 1977.
- [154] D. C. Drucker and W. Prager, "Soil mechanics and plastic analysis or limit design," *Q. Appl. Math.*, vol. 10, no. 2, pp. 157–165, Jul. 1952.
- [155] Y. A. Berezin, V. A. Osinov, and K. Hutter, "Evolution of plane disturbances in hypoplastic granular materials," *Contin. Mech. Thermodyn.*, vol. 13, no. 2, pp. 79–90, 2001.
- [156] M. Wójcik and J. Tejchman, "Modeling of shear localization during confined granular flow in silos within non-local hypoplasticity," *Powder Technol.*, vol. 192, no. 3, pp. 298–310, 2009.
- [157] W. Wu, E. Bauer, and D. Kolymbas, "Hypoplastic constitutive model with critical state for granular materials," *Mech. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 45–69, 1996.
- [158] D. Kolymbas and W. Wu, "Introduction to hypoplasticity," *Mod. approaches to Plast.*, pp. 213–223, 1993.
- [159] D. Kolymbas, *Constitutive modelling of granular materials*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [160] P. Vidal, A. Couto, F. Ayuga, and M. Guaita, "Influence of Hopper Eccentricity on Discharge of Cylindrical Mass Flow Silos with Rigid Walls," *J. Eng. Mech.*, vol. 132, no. 9, pp. 1026–1033, Sep. 2006.
- [161] Á. C. Yáñez, "Métodos avanzados de cálculo de presiones estáticas en silos cilíndricos y prismáticos con tolva excéntrica mediante el método de los elementos finitos." Universidade de Santiago de Compostela, 2000.
- [162] M. Guaita, A. Couto, and F. Ayuga, "Numerical Simulation of Wall Pressure during Discharge of Granular Material from Cylindrical Silos with Eccentric Hoppers,"

- Biosyst. Eng.*, vol. 85, no. 1, pp. 101–109, May 2003.
- [163] M. Wood, B. GS, and R. JM, “Silo pressure predictions using discrete-element and finite-element analyses,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 356, no. 1747, pp. 2685–2712, Nov. 1998.
- [164] J. M. F. G. Holst, J. Y. Ooi, J. M. Rotter, and G. H. Rong, “Numerical modeling of silo filling. I: continuum analyses,” *J. Eng. Mech.*, vol. 125, no. 1, pp. 94–103, 1999.
- [165] R. J. Goodey, C. J. Brown, and J. M. Rotter, “Predicted patterns of filling pressures in thin-walled square silos,” *Eng. Struct.*, vol. 28, no. 1, pp. 109–119, Jan. 2006.
- [166] J. M. Rotter and J. Michael, *Guide for the economic design of circular metal silos*. Spon Press New York, 2001.
- [167] A. B. Sabir and A. I. Mousa, “Finite-element analysis of cylindrical-conical storage tanks using strain-based elements,” *Struct. Eng. Rev.*, vol. 4, no. 8, pp. 367–374, 1996.
- [168] J. Y. Ooi and K. M. She, “Finite element analysis of wall pressure in imperfect silos,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 34, no. 16, pp. 2061–2072, Jun. 1997.
- [169] P. Iwicki, K. Rejowski, and J. Tejchman, “Stability of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns based on {FE} analyses versus {Eurocode} 3 approach,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 57, pp. 444–469, 2015.
- [170] D. Briassoulis, “Finite element analysis of a cylindrical silo shell under unsymmetrical pressure distributions,” *Comput. Struct.*, vol. 78, no. 1, pp. 271–281, 2000.
- [171] R. J. Goodey, C. J. Brown, and J. M. Rotter, “Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures,” *Eng. Struct.*, vol. 132, pp. 61–69, Feb. 2017.
- [172] P. Iwicki, J. Tejchman, and J. Chróścielewski, “Dynamic FE simulations of buckling process in thin-walled cylindrical metal silos,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 84, pp. 344–359, 2014.
- [173] Q. Meng, “Numerical analysis of particulate solid flow,” University of Guelph, Canada, 1994.

- [174] G. H. Rong, S. C. Negi, and J. C. Jofriet, "Simulation of flow behaviour of bulk solids in bins. Part 1: model development and validation," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 62, no. 4, pp. 247–256, 1995.
- [175] G. H. Rong, S. C. Negi, and J. C. Jofriet, "Simulation of flow behaviour of bulk solids in bins. Part 2: shear bands, flow corrective inserts and velocity profiles," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 62, no. 4, pp. 257–269, 1995.
- [176] Z. Lu, S. C. Negi, and J. C. Jofriet, "A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 1: Model Development," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 68, no. 3, pp. 223–229, Nov. 1997.
- [177] S. C. Negi, Z. Lu, and J. C. Jofriet, "A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 2: Model Validation," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 68, no. 3, pp. 231–236, Nov. 1997.
- [178] J. C. Jofriet, S. C. Negi, and Z. Lu, "A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 3: Parametric Study," *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 68, no. 3, pp. 237–246, 1997.
- [179] T. W. R. Keiter and G. A. Rombach, "Numerical Aspects of FE Simulations of Granular Flow in Silos," *J. Eng. Mech.*, vol. 127, no. 10, pp. 1044–1050, Oct. 2001.
- [180] C. Dávalos, J. Cante, J. A. Hernández, and J. Oliver, "On the numerical modeling of granular material flows via the Particle Finite Element Method (PFEM)," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 71, pp. 99–125, 2015.
- [181] Q. J. Zheng and A. B. Yu, "Finite element investigation of the flow and stress patterns in conical hopper during discharge," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 129, pp. 49–57, 2015.
- [182] R. J. Goodey and C. J. Brown, "The influence of the base boundary condition in modelling filling of a metal silo," *Comput. Struct.*, vol. 82, no. 7–8, pp. 567–579, Mar. 2004.
- [183] P. Wang, L. Zhu, and X. Zhu, "Flow pattern and normal pressure distribution in flat bottom silo discharged using wall outlet," *Powder Technol.*, vol. 295, pp. 104–114,

2016.

- [184] Q.-B. Bui, J.-C. Morel, S. Hans, and N. Meunier, "Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth," *Mater. Struct.*, vol. 42, no. 8, pp. 1101–1116, Oct. 2009.
- [185] Q. B. Bui, J. C. Morel, B. V. Venkatarama Reddy, and W. Ghayad, "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 5, pp. 912–919, May 2009.
- [186] N. Engin, N. Vural, S. Vural, and M. R. Sumerkan, "Climatic effect in the formation of vernacular houses in the Eastern Black Sea region," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 2, pp. 960–969, 2007.
- [187] M. A. Bahobail, "The Mud Additives and their Effect on Thermal Conductivity of Adobe Bricks," *J. Eng. Sci. Assiut Univ.*, vol. 40, no. 1, pp. 21–34, 2012.
- [188] R. Baskar, K. M. M. S. Begum, and S. Sundaram, "Characterization and Reuse of Textile Effluent Treatment Plant Waste Sludge in Clay Bricks," pp. 473–478, 2006.
- [189] C.-M. Chan, "Effect of Natural Fibres Inclusion in Clay Bricks: Physico-Mechanical Properties," *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1 2011, pp. 52–57, 2011.
- [190] O. Amu, S. Ogunniyi, and O. Oladeji, "Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with sugarcane straw ash," *Am. J. Sci. Ind. Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 323–331, Apr. 2011.
- [191] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. Williams, "Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 314–319, May 2015.
- [192] C. D. F. Rogers and I. J. Smalley, "The adobe reaction and the use of loess mud in construction," *Engineering Geology*, vol. 40, no. 3. pp. 137–138, 1995.
- [193] V. Sharma, B. M. Marwaha, and H. K. Vinayak, "Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing," *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 5, no. 1, pp. 141–155, 2016.

- [194] R. A. Azar, "Complexation des protéines laitières par les extraits de gousses vertes de caroubier : propriétés technologiques des coagulums obtenus," <http://www.theses.fr>, Jan. 2007.
- [195] A. Guettala, A. Abibsi, and H. Houari, "Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 3, pp. 119–127, Apr. 2006.
- [196] J. Morel, "Performances mécaniques de l' adobe," pp. 17–26, 2009.
- [197] J. E. AUBERT, "Caractérisation des briques de terre crue de {Midi}- {Pyrénées},»," Institut National des sciences Appliquées-Université Paul SABATIER Toulouse III, Toulouse, 2013.
- [198] H. Danso, B. Martinson, M. Ali, and C. Mant, "Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review," *Build. Res. Inf.*, vol. 43, no. 2, pp. 253–262, Mar. 2015.
- [199] A. R. Estabragh, A. T. Bordbar, and A. A. Javadi, "Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 29, no. 5, pp. 899–908, Sep. 2011.
- [200] G. Calatan, A. Hegyi, C. Dico, and C. Mircea, "Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks," *Procedia Technol.*, vol. 22, no. October 2015, pp. 259–265, 2016.
- [201] Y. Millogo, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, and K. Ghavami, "Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with {Hibiscus} cannabinus fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 71–78, Feb. 2014.
- [202] C.-S. Tang, X.-J. Pei, D.-Y. Wang, B. Shi, and J. Li, "Tensile Strength of Compacted Clayey Soil," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 141, no. 4, p. 04014122, Apr. 2015.
- [203] K. M. A. Hossain, M. Lachemi, and S. Easa, "Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 51, no. 4, pp. 711–731, 2007.

- [204] M. S. Chauhan, S. Mittal, and B. Mohanty, "Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre," 2008.
- [205] F. Ahmad, F. Bateni, and M. Azmi, "Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres," *Geotext. Geomembranes*, vol. 28, no. 1, pp. 93–99, Feb. 2010.
- [206] G. Calatan, A. Hegyi, C. Dico, and C. Mircea, "Experimental Research on the Recyclability of the Clay Material Used in the Fabrication of Adobe Bricks Type Masonry Units," *Procedia Eng.*, vol. 181, pp. 363–369, 2017.
- [207] IS 2720(X), "Determination of Unconfined Compressive Strength," *Indian Stand.*, 2006.
- [208] D. ASTM, "2166. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil," *West Conshohocken, PA, USA*, 1998.
- [209] R. Illampas, I. Ioannou, and D. C. Charmpis, "Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 83–90, Feb. 2014.
- [210] J. C. Morel and A. Pkla, "A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the '3 points bending test,'" *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 5, pp. 303–310, Jul. 2002.
- [211] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 59, pp. 161–168, May 2014.
- [212] J. E. Oti, J. M. Kinuthia, and J. Bai, "Engineering properties of unfired clay masonry bricks," *Eng. Geol.*, vol. 107, no. 3, pp. 130–139, 2009.
- [213] J. E. Oti, J. . Kinuthia, and J. Bai, "Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks," *Eng. Geol.*, vol. 109, pp. 230–240, Nov. 2009.
- [214] F. Sariosseiri, M. Razavi, K. Carlson, and B. Ghazvinian, "Stabilization of Soils with Portland Cement and CKD and Application of CKD on Slope Erosion Control," in *Geo-Frontiers 2011*, 2011, pp. 778–787.

- [215] P. Vidal, E. Gallego, M. Guaita, and F. Ayuga, "Finite element analysis under different boundary conditions of the filling of cylindrical steel silos having an eccentric hopper," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 64, no. 4, pp. 480–492, 2008.
- [216] Y. Wang, Y. Lu, and J. Y. Ooi, "A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo," *Powder Technol.*, vol. 282, pp. 43–54, 2015.
- [217] A. G. Bishara, K. Chandrangsu, and M. H. Mahmoud, "Finite element formulation for farm silo analysis," *J. Struct. Div.*, vol. 103, no. 10, pp. 1903–1919, 1977.
- [218] C. González-Montellano, F. Ayuga, and J. Y. Ooi, "Discrete element modelling of grain flow in a planar silo: influence of simulation parameters," *Granul. Matter*, vol. 13, no. 2, pp. 149–158, Apr. 2011.
- [219] L. LOUETRI, "Contribution a la modelisation numerique du comportement des silos a tremie lors du remplissage et de la vidange -," 2009.
- [220] M. M. Moya, F. F. Ayuga, M. M. Guaita, and P. P. Aguado, "Mechanical properties of granular agricultural materials," *Trans. ASAE*, vol. 45, no. 5, p. 1569, 2002.
- [221] W. R. Ketterhagen and B. C. Hancock, "Optimizing the design of eccentric feed hoppers for tablet presses using DEM," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 34, no. 7, pp. 1072–1081, 2010.
- [222] C. Y. Song and J. G. Teng, "Buckling of circular steel silos subject to code-specified eccentric discharge pressures," *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 11, pp. 1397–1417, Sep. 2003.
- [223] Y. Wang and J. Y. Ooi, "A Study of Granular Flow in a Conical Hopper Discharge Using Discrete and Continuum Approach," *Procedia Eng.*, vol. 102, pp. 765–772, Jan. 2015.
- [224] Y. Wang, Y. Lu, and J. Y. Ooi, "Numerical modelling of dynamic pressure and flow in hopper discharge using the Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation," *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 1308–1320, Nov. 2013.
- [225] Q. Meng, J. C. Jofriet, and S. C. Negi, "Finite Element Analysis of Bulk Solids Flow: Part 1, Development of a Model Based on a Secant Constitutive Relationship," *J.*

- Agric. Eng. Res.*, vol. 67, no. 2, pp. 141–150, Jun. 1997.
- [226] C. . Brown, E. . Lahlouh, and J. . Rotter, “Experiments on a square planform steel silo,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 55, no. 20, pp. 4399–4413, 2000.
- [227] R. . Goodey, C. . Brown, and J. . Rotter, “Verification of a 3-dimensional model for filling pressures in square thin-walled silos,” *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 14, pp. 1773–1783, Dec. 2003.
- [228] M. Moya, “Determinación de parámetros físicos de materiales agrícolas granulares utilizados en el cálculo de silos por métodos numéricos,” 2001.
- [229] J. Teng and J. M. Rotter, “Buckling of Pressurized Axisymmetrically Imperfect Cylinders under Axial Loads,” *J. Eng. Mech.*, vol. 118, no. 2, pp. 229–247, Feb. 1992.
- [230] J. M. Fuentes and F. Ayuga, “Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations,” vol. 111, pp. 553–562, 2012.
- [231] F. J. Hatfield and E. H. Bartali, “Static forces and moments in a grain silo,” *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 12, pp. 2814–2819, 1988.
- [232] E. Ragneau and J.-M. Aribert, “MEF adaptée à l'évaluation des actions exercées par un matériau pulvérulent aux parois d'un silo,” *Rev. Eur. des Éléments Finis*, vol. 4, no. 2, pp. 209–259, Jan. 1995.
- [233] G. Gusic, A. Combescure, and J. F. Jullien, “The influence of circumferential thickness variations on the buckling of cylindrical shells under external pressure,” *Comput. Struct.*, vol. 74, no. 4, pp. 461–477, 2000.
- [234] I. Chaieb, “Analyse et simulation des contraintes résiduelles induites par des traitements mécaniques de précontrainte en grenailage et choc laser,” <http://www.theses.fr>, Jan. 2004.
- [235] P. Vidal, M. Guaita, and F. Ayuga, “Analysis of Dynamic Discharge Pressures in Cylindrical Slender Silos with a Flat Bottom or with a Hopper: Comparison with Eurocode 1,” *Biosyst. Eng.*, vol. 91, no. 3, pp. 335–348, Jul. 2005.
- [236] C. González-Montellano, E. Gallego, Á. Ramírez-Gómez, and F. Ayuga, “Three

- dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 40, pp. 22–32, May 2012.
- [237] E. Gallego, A. Ruiz, and P. J. Aguado, "Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 118, pp. 281–289, Oct. 2015.
- [238] J. A. F. Compton, P. S. Tyler, P. S. Hindmarsh, P. Golob, R. A. Boxall, and C. P. Haines, "Reducing losses in small farm grain storage in the tropics," *Trop. Sci.*, vol. 33, pp. 283–318, 1993.
- [239] D. Richard-Molard, B. Cahagnier, and J. L. Multon, "Pilot scale experiments on half-wet maize storage under airtight conditions: microbiological and technological aspects," *Control. Atmos. Fumigation Grain Storages. Elsevier Sci. Publ. Amsterdam, Netherlands*, pp. 85–104, 1984.
- [240] A. Karunarathne, W. Mampearachchi, and A. Nanayakkara, "Modelling of Thermal Effects due to Solar Radiation on Concrete Pavements."
- [241] T. Ashour, H. Georg, and W. Wu, "An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 293–303, 2011.
- [242] T. Ashour, H. Wieland, H. Georg, F.-J. Bockisch, and W. Wu, "The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10, pp. 4676–4685, 2010.
- [243] D. Maillet, *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [244] R. S. Carmichael, *Physical properties of rocks and minerals*. CRC press Boca Raton, 1989.
- [245] J. H. Huang, "Effective thermal conductivity of porous rocks," *J. Geophys. Res.*, vol. 76, no. 26, pp. 6420–6427, 1971.
- [246] C. Clauser and E. Huenges, "Thermal conductivity of rocks and minerals," *Rock Phys. phase relations a Handb. Phys. constants*, pp. 105–126, 1995.

- [247] J. Gan, Z. Zhou, and A. Yu, "Effect of particle shape and size on effective thermal conductivity of packed beds," *Powder Technol.*, vol. 311, pp. 157–166, 2017.
- [248] E. S. Huetter, N. I. Koemle, G. Kargl, and E. Kaufmann, "Determination of the effective thermal conductivity of granular materials under varying pressure conditions," *J. Geophys. Res.*, vol. 113, no. E12, p. E12004, Dec. 2008.
- [249] P. Zehner and E. U. Schlunder, "Thermal conductivity of packings at moderate temperatures," *Chemie Ing. Tech.*, vol. 42, no. 14, p. 933–+, 1970.
- [250] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Clarendon press, 1881.
- [251] Weather Spark, "Météo habituelle à Natitingou, Bénin." [Online]. Available: <https://fr.weatherspark.com/y/45810/Météo-habituelle-à-Natitingou-Bénin>. [Accessed: 13-May-2018].
- [252] A. Couto, A. Ruiz, L. Herráez, J. Moran, and P. J. Aguado, "Measuring pressures in a slender cylindrical silo for storing maize. Filling, static state and discharge with different material flow rates and comparison with Eurocode 1 part 4," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 96, pp. 40–56, 2013.
- [253] P. Aguado, P. Gutierrez, F. Ayuga, and M. Guaita, "Predicting stress fields in agricultural silos during discharge," in *AgEng Oslo 98, International Conference on Agricultural Engineering, Oslo (Norway), 24-27 Aug 1998*, 1998.
- [254] P. J. A. Rodríguez, "Métodos avanzados de cálculo de presiones en silos agrícolas mediante la técnica de los elementos finitos. El vaciado de silos y las paredes de chapa ondulada," *Inf. la Construcción*, vol. 49, no. 454, p. 85, 1998.
- [255] P. Krysl, "Finite Element Modeling with Abaqus and Python for Thermal and Stress Analysis," 2015.
- [256] J. M. Morán, A. Juan, R. Robles, and P. J. Aguado, "Effects of Environmental Temperature Changes on Steel Silos," *Biosyst. Eng.*, vol. 94, no. 2, pp. 229–238, Jun. 2006.
- [257] J. M. Moran, A. Juan, F. Ayuga, R. Robles, and P. Aguado, "Analysis of thermal load calculations in steel silos: A comparison of Eurocode 1, classical methods, and

- finite element methods," *Trans. ASAE*, 2005.
- [258] J. M. Morán, A. De Juan Valdés, P. J. Aguado, and P. J. Aguado, "Analysis of thermal loads calculus in steel silos using the Eurocode 1, the classic methods and finite elements method," *Inf. la Construcción*, vol. 54, no. 479, pp. 61–69, Jun. 2002.
- [259] M. Lawrence, A. Heath, and P. Walker, "Determining moisture levels in straw bale construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2763–2768, 2009.

# Table des matières

Introduction générale .....	1
Étude bibliographique .....	5
1. Introduction .....	6
2. Stratégies de stabilisation de la récolte .....	6
2.1. Les variations des stocks vivriers.....	7
2.2. Les actions .....	8
3. Les greniers traditionnels .....	10
4. Facteurs influençant la construction des greniers en terre .....	12
5. Critères de sélection de la terre pour le banco .....	12
5.1. Bar shrinkage test .....	12
5.2. La terre de termitière.....	13
6. La paille .....	14
7. La décoction de néré .....	16
8. Propriétés mécaniques du banco .....	18
8.1. Densité sèche .....	18
8.2. Résistance à la compression.....	20
8.3. Résistance à la traction .....	24
8.4. Module de d'Young et Coefficient de poisson.....	25
9. Les silos .....	26
9.1. Conception des silos .....	26
9.2. Essais expérimentaux dans les silos .....	27
9.3. Comportement des matériaux granulaires.....	27
9.4. Méthodes numériques de calcul des silos.....	28
10. Synthèse .....	29
Comportement mécanique du composite argile-paille .....	31
1. Introduction .....	32

2. Propriétés physiques et mécaniques de la paille de riz .....	32
3. Propriétés physiques de la terre de barre.....	35
3.1. Composition granulaire.....	35
3.2. Limites d'Atterberg.....	36
3.3. Les masses volumiques .....	37
3.4. Classification géotechnique .....	37
3.5. Essai de retrait.....	38
4. La décoction de néré .....	38
5. Confection des échantillons.....	39
5.1. Matériel spécifique.....	39
5.2. Mélanges.....	40
6. Effet de la teneur en paille de riz sur la masse volumique et le retrait au séchage du banco.....	41
7. Influence de la proportion de paille sur les propriétés mécaniques du banco .....	42
8. Influence de la décoction de néré sur les propriétés mécaniques du banco .....	46
9. Proportion optimale de mélange .....	47
10. Conclusion.....	50
Modélisation mécanique de la paroi du silo en banco .....	53
1. Introduction .....	54
2. Géométrie du grenier.....	55
3. Actions entrant en jeu dans le comportement des silos .....	57
3.1. Les composantes du silo .....	57
3.1.1. La coupole supérieure .....	57
3.1.2. La coupole inférieure .....	58
3.1.3. La transition.....	58
3.2. Pressions dans le silo .....	59
3.3. Actions particulières lors de remplissage et de la vidange des silos.....	59
3.4. Les sollicitations externes.....	61
4. Calcul numérique du silo .....	61
4.1. Modèle éléments finis sous Abaqus .....	62
4.1.1. Modèle d'éléments finis .....	63
4.1.2. Taille des éléments.....	64
4.2. Loi de comportement.....	65

4.3. Interaction paroi - grains .....	67
4.4. Analyse statique .....	69
4.5. Analyse dynamique.....	71
4.5.1. Remplissage .....	71
4.5.2. Vidange.....	73
4.5.3. Synthèse analyse dynamique.....	75
5. Condition de résistance .....	75
6. Conclusion.....	77
<b>Simulation des transferts de chaleur dans la paroi du grenier .....</b>	<b>79</b>
1. Introduction .....	80
2. Caractérisation thermophysique des parois en banco.....	80
2.1. Conductivité thermique et capacité thermique massique.....	81
2.2. Diffusivité thermique et effusivité thermique .....	83
2.3. Caractéristiques thermiques dynamiques en fonction de l'épaisseur de la paroi.....	84
3. Conductivité thermique des céréales .....	87
4. Conditions climatiques .....	90
4.1. Température .....	91
4.2. Rayonnement solaire.....	92
4.2.1. Données climatiques.....	92
4.2.2. Rayonnement direct reçu par la paroi suivant l'orientation et l'inclinaison .....	93
5. Modélisation des transferts de chaleur .....	95
5.1. Analyse thermique.....	96
5.1.1. Profil de température de paroi suivant l'orientation.....	97
5.1.2. Variation de la température de paroi intérieure .....	100
5.2. Échauffement des grains.....	102
6. Déformations induites par la variation de température .....	104
7. Conclusion.....	107
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>113</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>137</b>

# MODELISATION THERMO- MECANIQUE DES GRENIERS DE STOCKAGE DE CEREALES EN BANCO

## RÉSUMÉ

Le stockage des céréales se fait en milieu rural au nord du Bénin dans des greniers (silo) en terre qui ont une contenance limitée. Les nombreuses tentatives d'introduction de magasins modernes ont essuyé le rejet des populations.

Le présent travail a pour but d'étudier la possibilité d'augmenter le volume de stockage du grenier de type Yom sans changer ni sa forme architecturale, ni le composite argile-paille-décoction de néré.

La caractérisation expérimentale du comportement mécanique du banco, matériau de construction de ces greniers a permis de définir le meilleur dosage pour des caractéristiques maximales. En faisant varier la proportion de paille et de décoction de néré, l'influence sur la terre crue de la paille et de la décoction est mise en évidence.

La simulation de l'action des grains, à la vidange et au remplissage sur la paroi du grenier et l'analyse des déformations induites montrent qu'il y a possibilité de construire des greniers de plus grande taille. Une optimisation paramétrique des dimensions a été faite.

L'effet des échauffements successifs sur la paroi du grenier a été pris en compte à travers la modélisation des transferts thermiques. La modélisation des profils de température dans diverses coupes orientées du silo montre que le flux est bien amorti et les conditions d'ambiance dans le grenier garantissent une bonne conservation.

Il est donc possible de construire des greniers de grande capacité de stockage qui serviraient de greniers communautaires ou banques de céréales à disposition des coopératives villageoises. Cette solution réglerait le problème de l'insécurité alimentaire au niveau du monde rural.

Mots clés : Grenier en terre ; banco ; grain ; méthode des éléments finis ; contrainte mécanique ; contrainte thermique

# THERMO- MECHANICAL MODELING OF BANCO GRAIN

## ABSTRACT

The storage of cereals is done in rural areas in northern Benin in earth silo that have a limited capacity. The numerous attempts to introduce modern shops have been rejected by the population.

This work aims to study the possibility of increasing the storage volume of Yom type silo without changing its architectural form, nor the clay-straw-nere composite.

The experimental characterization of the mechanical behaviour of the banco, the construction material of these silo made it possible to define the best dosage for maximum characteristics. By varying the proportion of straw and decoction of nere, the influence on the raw earth of the straw and the decoction is highlighted.

The simulation of grain action (filling and discharging) on the silo wall and the analysis of the induced deformations shows that there is a possibility of building larger earth silo. A parametric optimization of the dimensions was made.

The effect of successive heating on the silo wall has been considered by modelling heat transfer. The modelling of the temperature profiles in various silo-oriented sections shows that the flow is well damped and the ambient conditions in the attic guarantee good conservation.

It is therefore possible to build earth silo with large storage capacity that could be used as community silo or cereal banks for village cooperatives. This solution would solve the problem of food insecurity in rural areas.

Key words: earth silo; banco; grain; finite element analysis; mechanical stress; thermal stress