



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES DU MATERIAU BANCO ET VERIFICATION DE LA RESISTANCE PORTANTE MECANIQUE DES GRENIERS EN TERRE DANS LE NORD BENIN

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2010 par

Issakou AMBARKA

Travaux dirigés par :

- Dr Abibou CISS

Enseignant Chercheur au ZiE

- Dr ing GIBIGAYE Mohamed

Directeur du Bureau d'études DJAOULEY
INGENIEURS-CONSEILS

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Raffaële VINAI

Membres et correcteurs : Ismaïla GUEYE
Abdou LAWANE GANA

Promotion 2008/2010

A mon épouse **Katoumi YERIMA ABDOULAYE**, pour sa patience et sa compréhension
A la famille **AMBARKA** et ma belle-famille **YERIMA**, pour leur conseil et leur soutien
A Monsieur le Maire **Micaël BASSABI DJARA**, qui a été déterminé pour mon Master

L'une des grandes satisfactions que je tire de ce travail est ce propos tenu, après mes recherches, par le paysan constructeur des greniers en terre à Djougou : **«...*Mais je ne savais pas que de nos habitudes traditionnelles peuvent découler des théories des intellectuels !...* »**

REMERCIEMENTS

AU NOM D'ALLAH LE TOUT MISERICORDIEUX LE TRES MISERICORDIEUX

Au terme de ce travail, je voudrais remercier les institutions et personnes ci-après :

En premier lieu, j'aimerais remercier la Coopération Technique Belge pour avoir financé ma formation au 2iE.

J'exprime toute ma gratitude aux Professeurs Abibou CISS et Mohamed GIBIGAYE pour avoir accepté de suivre mes travaux de recherche. Cette thèse s'est déroulée dans de très bonnes conditions, grâce à vos engagements respectifs.

J'adresse mes remerciements chaleureux au Dr. Adolphe TCHEHOUALI de l'EPAC pour son assistance scientifique précieux et déterminant.

Au Bénin, les travaux ont été rendus possibles grâce aux appuis décisifs personnels de Mr François TOLLO, Directeur Général du CNERTP et le personnel du CNERTP. Je remercie tout particulièrement Mr Saturnin COGUE pour son appui scientifique et pour la bibliographie, ainsi que tous les directeurs sectoraux et responsables régionaux du CNERTP. Je remercie toutes les équipes des laboratoires de Mécanique des sols, des routes, des essais spéciaux du CNERTP de Cotonou ainsi que toute l'équipe du laboratoire du CNERTP de Djougou et de Parakou.

Je remercie Mr Alidou KPEMA qui est le principal constructeur de grenier en terre à Soubroukou (Djougou) avec qui j'ai fais tous les prélèvements de matériaux pour les essais de laboratoire.

Au 2iE, je remercie tous nos professeurs de la M1 en M2 pour avoir partagé leurs connaissances avec nous.

Je rends hommage à :

- A mes camarades et amis de Génie Civil du 2iE (2008-2010) et à ceux des autres options de Master d'Ingénierie et de Master Spécialisé de 2iE.
- A tous mes frères en Islam du 2iE avec qui nous avons su concilier les études avec l'adoration.
- A ceux et celles qui ont accepté de lire et corriger ce document, notamment le doyen Yves QUENUM du CNERTP Cotonou.
- A Yacoubou YARTHE et Sanni ALASSANE ainsi qu'à leurs épouses respectives pour leurs divers soutiens à Ouagadougou durant ces deux années d'études.
- Aux amis, connaissances et anonymes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

RESUME

La présente étude vise la lutte contre l'insécurité alimentaire par l'augmentation de la capacité de stockage des greniers en terre dans le nord du Bénin, tout en épousant au maximum la conception architecturale traditionnelle existante. Notre zone d'étude est le département de la Donga, considérée comme le grenier du Bénin en termes de céréales. Mais le surplus des vivres est souvent mal géré à cause des faibles capacités de stockage individuel des paysans. D'où une pénurie endémique. Alors en 2002, nous avons entamé une étude qui a prouvé que le modèle de stockage le plus adéquat pour la conservation des céréales est le grenier en terre.

La présente étude menée sur ces ouvrages de forme tronconique s'intéresse aux améliorations à apporter sur les caractéristiques mécaniques du matériau composite (terre argileuse+paille hachée+fusion de néré) utilisé dans leur construction et au modèle de calcul à appliquer dans le dimensionnement des parois.

Les essais de laboratoire ont montré qu'en faisant varier les proportions de paille du composite, un optimum permettant d'avoir une plus grande résistance en compression se situe à 2%, avec de meilleures performances mécaniques en termes de cohésion C et d'angle de frottement interne ϕ . Par contre la résistance à la traction continue de croître de 1,5 à 3% de paille. Aussi, ces essais ont prouvé que la cohésion du composite croît avec l'âge. Par ailleurs, la détermination en laboratoire du module d'élasticité du composite nous a prouvé que notre matériau n'est pas élastique linéaire. D'où le passage au calcul à la rupture. Enfin, le dimensionnement du grenier communautaire nous a conduits à un grenier de 15 tonnes pendant que sur le terrain nous n'avons que des ouvrages de 2 tonnes. Ce dimensionnement a aussi révélé que les greniers en terre sont sollicités à près de dix fois en traction qu'en compression. Il faudra alors envisager la recherche d'un optimum en paille pour la traction avec la fixation d'un minimum de résistance en compression et de performance en termes de C et ϕ . Nous proposons en guise de vérification la confection d'un prototype du grenier dimensionné sous phase expérimentale avant sa mise en œuvre sur le terrain.

Mots clés : Grenier en terre, Grande capacité, Matériau composite, Coefficients mécaniques, Calcul de structure.

ABSTRACT

The present survey aims the fight against the food insecurity by increasing the storage capacity of the attics earth in the north of Benin while marrying up the existing traditional architectural design. Our zone of study which is the Donga department is considered as the attic of Benin in terms of cereals but the surplus food is often badly managed because of low storage capacity of individual farmers. Surplus foods productions are often sold at low prices at harvest time to rogue traders who sell them at an enormous cost to people, in lean season. This observation induced food insecurity in the area.

That's why in 2002, we started a survey which proved that the most adequate storage model for the conservation of the cereals is the attic. The survey of these works tapered has focused on improvements to bring on the mechanical properties of composite material (clay + straw + fusion of nere) used in their construction and to the determination of a model of structural analysis that will be applied in the design of wall.

In our laboratory tests , we changed the proportions of straw in the composite which allowed us to have an optimum straw (2%) permitting to have a bigger compression resistance and good mechanical performance in terms of cohesion and internal friction angle of the composite; while the traction resistance continuous to grow. It will be interesting to research another optimum straw to the traction resistance by fixing a minimum compression resistance. Therefore, the composite Young module determination in laboratory proved us that our material doesn't have a linear elastic behavior. This justified the conduct of structural analysis of the wall by using cohesion and internal friction angle of the dry composite. Finally, the design of these works tapered revealed that earth attics are appealed nearly ten times in traction than in compression. We propose in manner of verification the confection of our prototype design of the attic in experimental phase before its setting in work on the area.

Keys words: Earth attic, High capacity, Composite material, Mechanic coefficients, Structural analysis.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AG : Analyse Granulométrique

CeRPA : Centre Régionale pour la Promotion Agricole

CNERTP : Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CPU : Collège Polytechnique Universitaire

EPAC : Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi

INRAB : Institut National de Recherches Agronomiques du Bénin

I_p : Indice de plasticité

LA : Limites d'Atterberg

ONG : Organisation Non Gouvernementale

W_L : Limite de Liquidité

W_{op} : Teneur en eau optimum

W_p : Limite de Plasticité

Coefficients mécaniques de matériaux :

C : Cohésion

E : Module d'élasticité ou Module de Young

v : Coefficient de poisson

φ : Angle de frottement interne

Sommaire

Introduction	6
Partie 1 : JUSTIFICATION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	8
Chapitre1 : JUSTIFICATION, OBJECTIFS, APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE	9
1.1. Contexte et justification de l'étude	9
1.2. Objectifs de l'étude	10
1.3. Approche conceptuelle et méthodologique.....	11
Chapitre 2 : SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
2.1. Situation géographique du département de la Donga	13
2.2. Le climat	13
2.3. Hydrographie	13
2.4. Les sols.....	14
2.5. Mode agricole dans le département :	14
2.6. Différents produits vivriers cultivés.....	15
Partie 2 : MATERIELS, METHODES ET RESULTATS.....	16
Chapitre 3 : ETUDE GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ENTRANT DANS LA CONFECTION DES GRENIERS EN TERRE	17
3.1. Les essais d'identification	17
3.1.1. Analyse Granulométrique	17
3.1.2. Limites d'Atterberg	17
3.1.3. Autres essais d'identification	18
3.2. Essais de résistance	19
3.2.1. Compression simple et traction par fendage sur éprouvettes cylindriques	19
3.2.1.1. Essais Proctor modifiés	19
3.2.1.2. Confection des éprouvettes cylindriques	20
3.2.1.3. Ecrasement des éprouvettes cylindriques	20
3.2.2. Compression et traction par flexion sur éprouvettes prismatiques	21
3.2.2.1. Confection des éprouvettes prismatiques	21
3.2.2.2. Ecrasement des éprouvettes prismatiques	24
Chapitre 4 : DETERMINATION DES COEFFICIENTS PHYSICO-MECANIQUE DES DIFFERENTS COMPOSITES	27
4.1. Détermination du module d'élasticité E et du coefficient de poisson ν	27
4.1.1. Détermination de E et de ν du composite à 1,5% de paille	27
4.1.1.1. Essai de chargement sur éprouvettes cylindriques à 1,5% de paille	27
4.1.1.2. Détermination du module d'élasticité E pour le composite à 1,5% de paille	28
4.1.1.3. Détermination du coefficient de poisson ν pour le composite à 1,5% de paille	29
4.1.2. Détermination de E et de ν des composites à 2%, 2,5% et 3% de paille	30
4.1.2.1. Expression des résultats du composite à 2% de paille.....	30
4.1.2.2. Expression des résultats du composite à 2,5 % de paille.....	30
4.1.2.3. Expression des résultats du composite à 3 % de paille.....	31
4.2. Détermination de la cohésion C et de l'angle de frottement interne ϕ des composites.....	32
4.2.1. Préparation des échantillons des différents composites	32
4.2.2. Essai de cisaillement direct sur composite à 1,5% de paille	33
Partie3 : DISCUSSION ET ANALYSES	36

Chapitre 5 : ANALYSE DES RESULTATS DE L'ETUDE GEOTECHNIQUE.....	37
5.1. Essais d'identification.....	37
5.2. Essais de résistance	37
5.2.1. Résistances en compression sur éprouvettes cylindriques et prismatique	37
5.2.2. Résistances en traction par fendage sur éprouvettes cylindriques et en traction par flexion sur éprouvettes prismatiques.....	38
Chapitre 6 : CALACUL DE STRUCTURE	40
6.1. Calcul des contraintes	40
6.1.1. Détermination des contraintes engendrées par le stockage des céréales.....	40
6.1.1.1. Caractéristiques des grains	40
6.1.1.2. Caractéristiques de la coupole inférieure chargée	40
6.1.1.3. Approche méthodologique de calcul	40
6.1.1.4. Expression des contraintes.....	41
6.1.2. Détermination des contraintes internes aux parois du grenier	41
6.1.2.1. Contrainte de traction engendrée par σ_n	41
6.1.2.2. Contrainte de compression engendrée par le poids de la partie supérieure à la cote z donnée	42
6.1.3. Condition de rupture de la paroi du grenier	43
6.2. Vérification de la résistivité des parois du grenier communautaire.....	45
6.2.1. Caractéristiques du grenier communautaire	45
6.2.2. Calcul des contraintes.....	46
6.2.2.1. Caractéristiques des grains	46
6.2.2.2. Contraintes normale et tangentielle à une hauteur z donnée	46
6.2.2.3. Contraintes internes aux parois du grenier	47
6.2.3. Condition de rupture de la paroi du grenier	49
Partie 4 : CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	50
Chapitre 7 : CONCLUSIONS GENERALES.....	51
Chapitre 8 : RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
ANNEXES	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques Proctor modifiés des différents composites	19
Tableau II : Table des valeurs des résistances à la compression et à la traction par fendage sur éprouvettes cylindriques.....	21
Tableau III: Table des valeurs des résistances à la compression et à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques	26
Tableau IV : Valeurs de C et de ϕ par âge et par composite.....	35
Tableau V: Valeurs des contraintes engendrées par les grains le long de la hauteur de la coupole inférieure.....	47
Tableau VI : Distribution de la contrainte interne de traction suivant la hauteur z de la coupole inférieure	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vues de quelques greniers de type Yom construits dans le département de la Donga	10
Figure 2 : Carte du Bénin avec la situation de la zone d'étude	13
Figure 3 : Courbe Granulométrique du sol utilisé.....	17
Figure 4 : Droite la plus probable des opérations de la limite de liquidité	18
Figure 5: Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 1,5% de paille.....	29
Figure 6 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 2% de paille.....	30
Figure 7 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 2,5% de paille.....	31
Figure 8 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 3% de paille.....	31
Figure 9 : Courbes de tendances des résistances en fonction des pourcentages de paille.....	37
Figure 10 : Courbes de tendance de variation de la cohésion en fonction du pourcentage de paille.....	39
Figure 11 : Tronc de cône tangent à la paroi du grenier à une profondeur z donnée	40
Figure 12 : Inclinaison de la paroi de la coupole au point z considéré	41
Figure 13 : Coupe transversale de la coupole inférieure au point z considéré.....	42
Figure 14 : Coupe longitudinale de la coupole inférieure	43

Introduction

La Donga est un département du Nord-Bénin dont la population s'élève à 350062 habitants¹. Sa population rurale est de 123 706 habitants entièrement consacrée à l'agriculture, qui occupe 46% des activités économiques totales du département. Le département est considéré comme le grenier du pays en sorgho, maïs, arachide...

Malgré ces atouts, cette population connaît quelques difficultés d'approvisionnement en cultures vivrières en période de soudure dues à une mauvaise gestion des surplus de production. Le problème est surtout crucial en milieu rural où du fait des faibles capacités de stockage individuel des paysans, les surplus de productions vivrières sont souvent vendus au moment des récoltes à des commerçants peu scrupuleux qui en période de soudure les revendent à des coûts exorbitants aux populations. Cette situation induit une insécurité alimentaire contre laquelle l'Etat béninois consacre plusieurs ressources financières pour apporter quelques solutions. A cet effet, plusieurs programmes de lutte contre l'insécurité alimentaire ainsi que des projets d'appuis au monde rural ont été mis en place.

De nos échanges avec les agents de l'Institut National des Recherches Agronomiques du Bénin (INRAB), il s'est avéré que tous les appuis et contributions apportés jusqu'à ce jour à l'endroit des paysans constructeurs des greniers en terre pour le stockage des céréales se sont limités uniquement sur des améliorations en termes de la forme et de la facilité d'utilisation de ces ouvrages mais aucune étude structurale n'a encore été abordée dans le domaine de la construction des greniers en terre au Bénin.

En 2002 nous avons entamé une étude visant à déterminer le modèle d'ouvrage le plus adéquat pour le stockage des céréales dans la zone d'étude qui est le grenier en terre. A l'aide de quelques caractéristiques mécaniques en occurrence les résistances en compression et en traction du matériau composite, nous avons projeté un grenier de grande capacité sans toutefois aborder l'aspect résistance mécanique des parois.

¹ Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de février 2002.

En effet, Moumouni IDRISSOU en abordant la problématique du dimensionnement des ouvrages de stockage dans son Mémoire de fin de formation en Génie Civil au CPU pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur des Travaux de la 6^{ème} Promotion, est resté dans un contexte beaucoup plus global et ne s'est pas spécialement appesanti sur les greniers en banco. Par ailleurs, le Docteur Ingénieur Pascal FANDOHAN en Février 2010 nous fait remarquer dans l'introduction de sa fiche technique « Guide pratique de construction et d'utilisation du grenier en terre amélioré pour le stockage du maïs », édité par l'Organisation Non Gouvernementale Louvain Coopération au Développement à Cotonou au Bénin ; que : "...les greniers en terre 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...". Cela signifie alors que chercher à améliorer les caractéristiques mécaniques des greniers en terre à l'aide du ciment n'est certainement pas une solution idéale.

Dans la présente étude, nous avons envisagé nous en tenir uniquement aux matériaux locaux communément utilisés par les paysans et de jouer sur les proportions de certains composants du banco pour voir si des améliorations pourraient être apportées en termes de résistance. Alors, dans le souci de mettre le génie civil au service de la sécurité alimentaire, nous nous sommes proposés d'utiliser le calcul de structure en vue d'augmenter la capacité de stockage des greniers en terre tout en épousant au maximum la conception architecturale traditionnelle existante.

L'étude s'articule autour des points suivants :

- Description du cadre;
- Etude géotechnique des matériaux composites entrant dans la confection des greniers en terre ;
- Détermination des coefficients mécaniques des matériaux composites ;
- Calcul de structure des parois du grenier ;
- Vérification de la résistivité des parois du grenier communautaire.

Partie 1 : JUSTIFICATION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Chapitre1 : JUSTIFICATION, OBJECTIFS, APPROCHE CONCEPTUELLE ET METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE

1.1. Contexte et justification de l'étude

Les réalités socio- économiques inhérentes au développement ascendant du monde, surtout celui de l'Afrique et en particulier de nos pays sous développés, impose à l'homme de faire une gestion appropriée des ressources qui sont à sa disposition en vue d'une meilleure protection de l'environnement sans altérer l'économie.

En construction des habitats et diverses infrastructures, il s'agira de mener des réflexions afin de déterminer de nouvelles politiques de construction qui valorisent au mieux les matériaux locaux.

D'après les renseignements recueillis sur les ouvrages de stockage des céréales au nord Bénin, le grenier en terre apparaît comme l'ouvrage le mieux adapté. Son usage n'exige aucun traitement spécial préalable sur les vivres avant leur conservation et leur durée de stockage peut aller au-delà des deux ans tout en conservant l'hygrométrie des grains. La vulgarisation du grenier en terre de grande capacité débouchera sur plusieurs avantages en termes de réduction de pertes des vivres par une meilleure conservation et d'assurance d'une autosuffisance alimentaire de nos populations surtout en période de soudure.

Une utilisation du matériau banco en construction s'inscrit dans une réduction sensible des coûts à cause de la disponibilité du matériau et de la main d'œuvre qualifiée maîtrisant l'usage de ce matériau dans la zone d'étude.

En effet, dans la construction des greniers en terre, la paille tendre est aussi utilisée et joue le rôle d'armature. Alors, en lieu et place du béton armé utilisé dans la construction des magasins de stockage nous aurons du banco armé à la paille (armature végétale). Cela permettra de réduire le dégagement du CO₂ dans l'atmosphère par la réduction de l'utilisation du béton et de l'acier dont la fabrication et l'emploi produisent du CO₂. La vulgarisation de cette construction ira non seulement dans le sens de la capitalisation et du développement du savoir faire traditionnelle, mais jouera surtout sur la durabilité des techniques existantes.

Il faut noter que la présente étude fait suite à notre premier thème de mémoire de fin de formation en Ingénieur des Travaux intitulé : **Etude des ouvrages de stockage de type traditionnel des produits vivriers dans le Département de la Donga** au nord du Bénin ; soutenu en 2002 à l'Ecole Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi.

Les points qui avaient été abordés se présentent comme suit :

- Inventaire des produits vivriers et de leur conservation ;
- Etude architecturale et technologique des greniers en terre ;
- Etude des propriétés physico- mécaniques des matériaux locaux de construction des greniers en terre ;
- Projection d'un grenier communautaire de capacité 22 tonnes.

Les acquis de cette première étude se présentent comme suit :

- L'ouvrage de stockage des céréales le plus adéquat dans la zone d'étude et le grenier en terre dont la durée de vie d'un grenier est d'au moins 40 ans ;
- Le principal matériau de construction des greniers est de la terre argileuse ;
- La paille malaxée dans le test argileux :
 - o lutte contre le phénomène de retrait,
 - o améliore la résistance du composite,
 - o joue le rôle d'armature ;
- Le grenier communautaire a été prédimensionné à l'aide de la formule générale de Laplace en assimilant la paroi du grenier à une membrane.

Dans le présent travail, nous nous proposons de poursuivre nos recherches avec la détermination des autres caractéristiques mécaniques non encore définies d'une part, et de faire la vérification de la résistivité mécanique portante de l'ouvrage d'autre part.

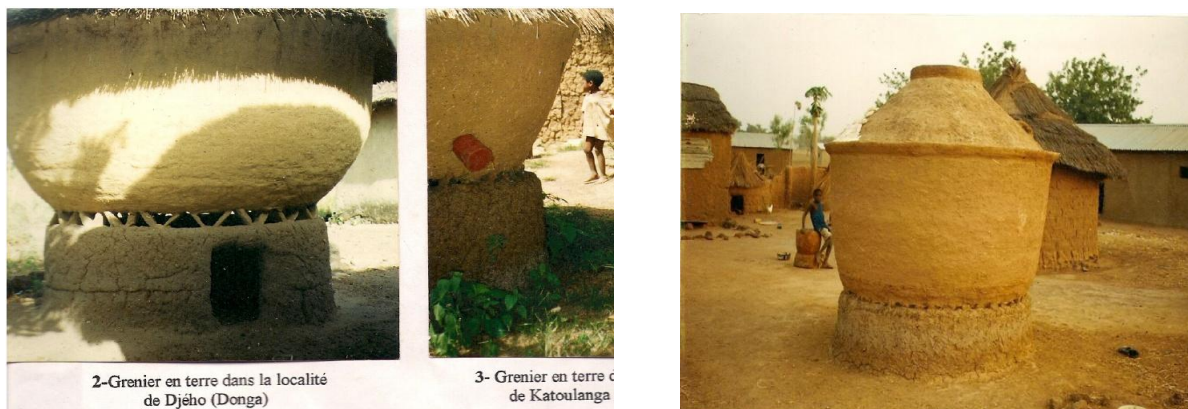


Figure 1 : Vues de quelques greniers de type Yom construits dans le département de la Donga

1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif général de l'étude vise la lutte contre l'insécurité alimentaire par l'augmentation de la capacité de stockage des greniers en terre tout en épousant au maximum la conception architecturale traditionnelle existante.

Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes fixés au départ de la présente étude comme objectifs spécifiques :

- Apprécier les types de contraintes auxquelles sont soumises les parois du grenier;
- Apprécier le mode de mise en œuvre convenable pour une meilleure résistance aux différentes sollicitations;
- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques du matériau composite;
- Ressortir le module de young (E) et le coefficient de poisson puis en déduire les coefficients de Lamé du matériau principal banco ;
- Apprécier d'autres comportements particuliers (thermique....)
- Mettre sur pied un Logiciel de calcul de structure avec la méthode des déformations linéaires.

Au démarrage de l'étude en mars 2010, l'état des lieux effectués dans la zone d'étude, le point du matériel d'essais disponible au Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP) du Bénin et aussi le délai imparti pour les recherches nous ont amené à redéfinir nos objectifs spécifiques en quatre points qui sont :

- Caractériser le matériau composite sur le plan physico-mécanique ;
- Déterminer les coefficients mécaniques du composite ;
- Définir le modèle de calcul à appliquer aux greniers en terre de la zone d'étude ;
- Vérifier la résistance mécanique du grenier communautaire.

1.3. Approche conceptuelle et méthodologique

Pour atteindre les différents objectifs spécifiques ci-dessus énumérés, notre approche conceptuelle s'est focalisée autour des points ci-après :

- Viser une amélioration de la résistance à la compression et/ou à la traction du matériau composite en jouant sur le pourcentage de la paille par rapport au sol argileux ;
- Identifier les paramètres à la rupture du matériau composite ;
- Définir les caractéristiques des différentes contraintes auxquelles sont soumises les parois de notre ouvrage.

Pour opérationnaliser l'approche conceptuelle à trois piliers ci-dessus décrite, nous avons combiné à la fois certains de nos résultats de 2002, des informations recueillies au sein du CNERTP dans le domaine des greniers en terre et aussi et surtout le matériel disponible au sein du CNERTP pour mener les essais de laboratoire.

Il faut noter que, par rapport au constat fait au niveau de notre première étude sur l'amélioration de la résistance apportée par la paille dans le matériau argileux, nous nous sommes dit qu'il aura une quantité optimum de paille qui apporterait plus de résistance à notre matériau composite. Alors la recherche de cet optimum a été intégrée dans nos recherches.

Afin de mener à bien l'étude des différents comportements du matériau composite de notre ouvrage, nous avons réalisé des essais de chargement qui nous ont permis de déterminer les caractéristiques du matériau que sont : le Module d'élasticité, le coefficient de poisson, la cohésion et l'angle de frottement interne. L'analyse des résultats de ces essais nous a permis de définir la conception structurale de la paroi du grenier.

Les contraintes auxquelles seront soumises les parois de l'ouvrage seront fonction du contenu de la coupole inférieure ; donc du type de grains. Nous avons alors appliqué la mécanique des sols à nos grains en prenant en compte leur densité apparente moyenne ainsi que l'angle de frottement interne et éventuellement leur cohésion.

Le souci de rendre indépendants les essais de laboratoire effectués ainsi que la lecture et l'exploitation de chacun des chapitres, nous a conduit à quelques redondances dans le texte (matériel, mode opératoire, expression des résultats).

La démarche globale de planification du travail effectué comprend les étapes suivantes : recherches bibliographiques, descentes dans le milieu d'étude, essais de laboratoire.

Les différents essais réalisés sont :

- Essais d'identification ;
- Essais de compression simple ;
- Essais de traction par fendage et par flexion ;
- Essais de chargement avec mesures des déformations à l'aide des comparateurs ;
- Essai de cisaillement direct sur le matériau composite sec.

Tous les essais ont été réalisés au CNERTP ; les uns dans l'annexe de Djougou et d'autres au siège à Cotonou.

Chapitre 2 : SITUATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Situation géographique du département de la Donga

La Donga est un département de la République du Bénin situé entre le 9^{èm} et le 10^{èm} parallèle au Nord-Ouest du pays et couvrant une superficie de 11 126 km². Il est composé de quatre communes que sont : Djougou, Ouaké, Bassila et Copargo. Le pourcentage des superficies cultivables varie entre 50 et 67%, ce en fonction de chaque commune avec Djougou en tête. Ses limites géographiques sont :

- au Nord par le département de l'Atacora ;
- au Sud par le département des Collines ;
- à l'Est par le département du Borgou ;
- à l'Ouest par la République du Togo.

Ce département possède un écosystème diversifié.



**Figure 2 : Carte du Bénin avec la
situation de la zone d'étude**

2.2. Le climat

Dans la Donga, le climat est de type Soudano- Guinéen. La température moyenne est autour des 27°C avec les variations de 17°C à 35°C. Pendant l'harmattan, l'amplitude thermique peut atteindre 8°C. La saison sèche couvre normalement la période de mi-octobre à mi-avril. La saison des pluies quant à elle, s'étend de mi-avril à mi-octobre et est caractérisée par d'importantes variations pluviométriques d'une zone à une autre.

La normale des précipitations se situe entre 1 200mm et 1 300mm et le mois d'Août est en général le mois le plus arrosé.

2.3. Hydrographie

L'hydrographie est caractérisée par le bassin versant orienté " Centre - Sud". Dans la Donga, on retrouve le fleuve Ouémé qui coule vers l'Océan Atlantique au Sud du Bénin. En saison pluvieuse, les cours d'eau entraînent des submersions favorables à la pratique de la riziculture dans les bas-fonds. Par contre en saison sèche, les cours d'eau permanentes sont rares du fait,

entre autre, du déboisement prononcé des berges. Néanmoins à certains endroits où les berges gardent le couvert boisé, les poches d'eau desservent les populations pour leurs diverses activités de contre saison.

2.4. Les sols

Les sols sont de type minéraux bruts, ferrugineux tropicaux indurés et hydromorphe. Ces sols sont favorables pour la culture mais souffrent actuellement des problèmes de fertilité et ont besoin d'importants apports en matières organiques pour la reconstruction de la couche arable sur les parcelles mises en culture. La plupart de ces sols ont besoin aujourd'hui d'être protégés contre l'érosion par des plantations d'arbres et la mise en place des ouvrages antiérosifs.

2.5. Mode agricole dans le département :

C'est une agriculture basée sur l'exploitation extensive. On assiste a :

- L'utilisation insuffisante et parfois inadéquate des engrais ;
- La pratique exclusive de la jachère naturelle et un système d'assolement rotation généralement inadéquat.

L'accroissement des rendements est fonction de l'accroissement des superficies cultivées.

Les pratiques agricoles restent encore traditionnelles par endroit avec l'agriculture itinérante sur brûlis et l'utilisation d'instruments rudimentaires comme la houe. Les buttes et billons sont confectionnés pour préparer le sol à recevoir les semis. Le labour à plat est aussi utilisé. Par les efforts du gouvernement actuel, près de 40% des paysans utilisent la culture attelée dans la Donga. Il faut noter que la mécanisation de l'agriculture n'est pas aussi développée.

Pour favoriser l'autosuffisance alimentaire et rendre la production agricole plus compétitive sur le plan international, le Centre Régionale pour la Promotion Agricole (CeRPA):

- Encadre techniquement les paysans ;
- Suscite leur regroupement ;
- Les appuie pour l'obtention de crédits de campagne (semences, engrais...).

Cela contribue à l'accroissement de la production et à l'amélioration des revenus des agriculteurs. Mais aujourd'hui le besoin en suivi- appui des producteurs dépasse le potentiel en ressources des CeRPA. D'où la nécessité des interventions spécifiques de certains projets et parfois des Organisations Non Gouvernementales (ONG).

2.6. Différents produits vivriers cultivés

Les produits vivriers cultivés se classent en trois grands groupes à savoir : les céréales, les légumineuses et les racines / tubercules.

Les produits céréaliers sont essentiellement le maïs, le riz, le fonio, le sorgho, le mil et le petit mil qui est un bon aliment de soudure parce qu'il peut être cultivé à toute période de l'année.

Les légumineuses regroupent le haricot avec toutes ses variétés (le haricot blanc, le niébé...), le voandzou et l'arachide qui est en général un produit de rente.

Les céréales et les légumineuses ont un cycle de production variant entre 3 et 4 mois. Dans la zone d'étude, les céréales et les légumineuses sont conservés dans les greniers en terre.

Les racines/ tubercules regroupe l'igname, le manioc et la patate douce. Leur cycle de production est entre 6 et 12 mois.

Partie 2 : MATERIELS, METHODES ET RESULTATS

Chapitre 3 : ETUDE GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ENTRANT DANS LA CONFECTION DES GRENIERS EN TERRE

3.1. Les essais d'identification

3.1.1. Analyse Granulométrique

L'Analyse Granulométrique s'est exécutée en trois phases distinctes à savoir :

- La préparation de l'échantillon ;
- Le tamisage des grains de dimension supérieurs à 80 microns ;
- Et la Sédimentométrie qui nous a permis de déterminer la distribution des grains de limon ainsi que le pourcentage d'argile.

Le matériel utilisé et le mode opératoire pour ces trois phases ont été pratiquement les mêmes qu'en 2002 (AMBARKA I., 2002).

La courbe granulométrique se présente comme suit :

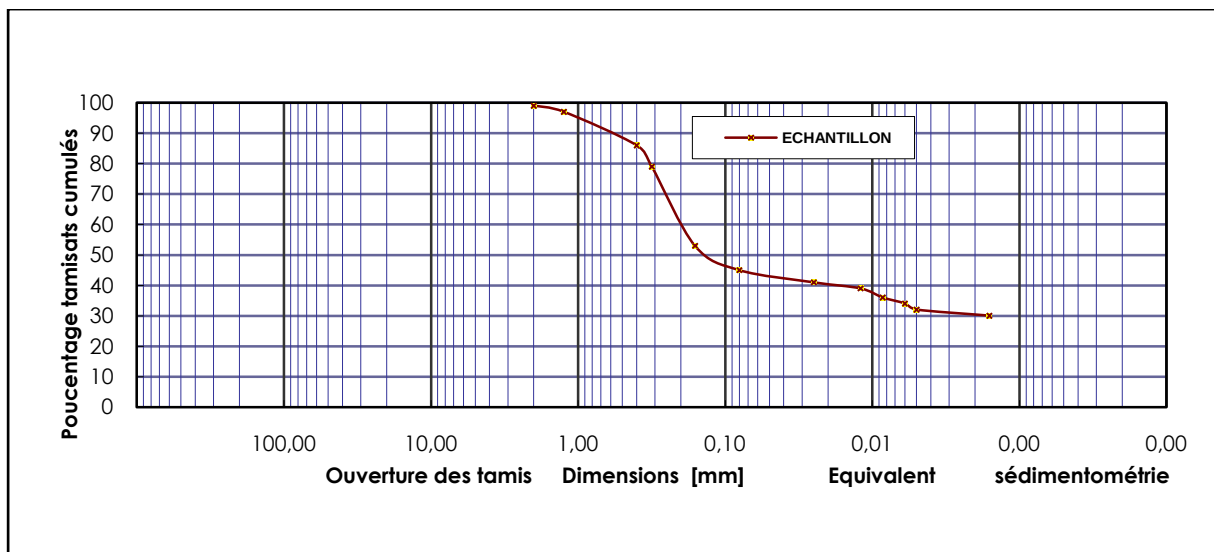


Figure 3 : Courbe Granulométrique du sol utilisé

La courbe révèle que les grains se répartissent à peu près de la même façon dans toutes les dimensions exceptée la zone de maille comprise entre 0,315 mm et 0,160 mm. Nous avons alors à faire à une granularité étalée.

3.1.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ont consisté à déterminer la Limite de Liquidité, la Limite de Plasticité et l'Indice de Plasticité. Le matériel et le mode opératoire pour la détermination des limites de liquidité et de plasticité ont été les mêmes qu'en 2002 (AMBARKA I., 2002).

La courbe de détermination de la limite de liquidité se présente comme suit :

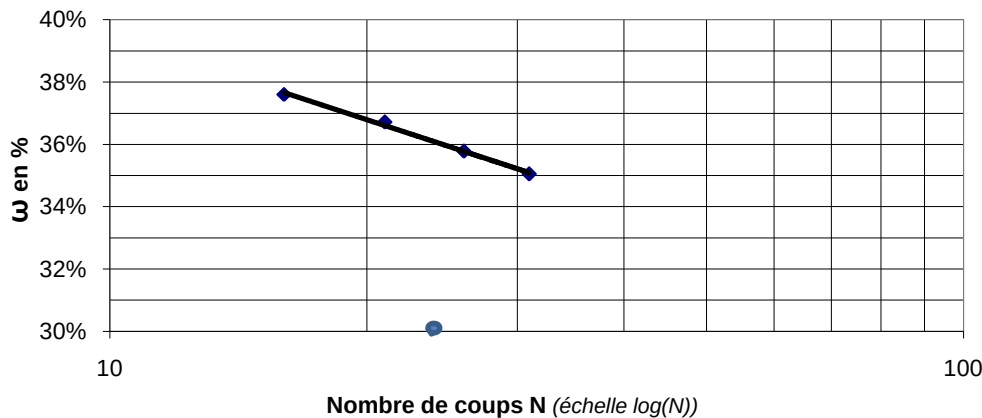


Figure 4 : Droite la plus probable des opérations de la limite de liquidité

Le point d'intersection de cette droite avec l'abscisse 25 chocs donne la teneur en eau qui correspond à la Limite de Liquidité. Ici, nous avons $W_L = 36,0\%$.

Pour la limite de plasticité, la manipulation nous a donné $W_p = 17,89$.

L'Indice de Plasticité I_p est revenu à :

$$I_p = W_L - W_p = 36 - 17,89 = 18,11$$

$I_p = 18,11$

3.1.3. Autres essais d'identification

Les autres essais effectués regroupent :

- Le poids apparent du matériau : qui est la masse de matériau par unité de volume foisonné ;
- Le poids spécifique du matériau : qui se définit comme la masse du matériau par unité de volume qu'occupent ses particules solides. Sa détermination nous a amené essentiellement à chasser les bulles d'air qui se trouvaient entre les particules solides du matériau en portant une quantité déterminée de matériau et d'eau à ébullition dans des pycnomètres.
- ❖ Pour le sol argileux, la densité apparente est $\gamma_a = 1,09 \text{ g/cm}^3$ et le poids spécifique est $\gamma_s = 2,64 \text{ T/m}^3$.
- ❖ Pour la paille hachée, le poids apparente est $\gamma_p = 0,036 \text{ g/cm}^3$.
- ❖ Pour la fusion de néré, le poids apparent est $\gamma_n = 1,05 \text{ g/cm}^3$

3.2. Essais de résistance

3.2.1. Compression simple et traction par fendage sur éprouvettes cylindriques

Ces essais ont consisté à confectionner des séries d'éprouvettes cylindriques normalisées (normes NF P 18-400) ; lesquelles briquettes ont été soumises aux différents écrasements.

Les briquettes devant être confectionnées avec la plus grande compacité possible, la détermination de la densité sèche du matériau a été nécessaire. Cela nous a conduits à faire une série d'essais Proctor modifié.

Il faut noter que, par rapport au constat fait au niveau de notre première étude sur l'amélioration de la résistance apportée par la paille dans le matériau argileux, nous nous sommes dit qu'il aurait une quantité optimum de paille qui apporterait plus de résistance à notre matériau composite. Alors nous avons réalisé plusieurs séries d'essais Proctor Modifié avec quatre pourcentages différents de paille par rapport à la quantité de sol argileux. Ce sont respectivement 1,5%, 2%, 2,5% et 3%.

3.2.1.1. Essais Proctor modifiés

Les essais Proctor nous ont amené à déterminer la relation existant entre la teneur en eau et la densité sèche de nos différentes compositions en matériaux. Cela nous a permis d'obtenir la teneur en eau pour laquelle la densité sèche est maximale, ce qui revient à la teneur en eau optimum permettant d'avoir le maximum de serrage des particules du matériau composite.

Le matériel, la préparation des échantillons et le mode opératoire des essais Proctor modifiés des différents composites ont été exécutés de la même manière qu'en 2002 (AMBARKA I., 2002).

Les résultats se présentent comme suit :

Tableau I : Caractéristiques Proctor modifiés des différents composites

Caractéristiques Proctor modifié	Composite à 1,5% de paille	Composite à 2% de paille	Composite à 2,5% de paille	Composite à 3% de paille
Teneur en eau optimum (W_{op})	12,5%	14,0%	13,0%	12,8%
Densité sèche maximale (γ_{dmax})	1,86T/m ³	1,82T/m ³	1,75T/m ³	1,77T/m ³

Les expressions des calculs sont consignées à l'Annexe II et le tracé des courbes Proctor en Annexe III.

3.2.1.2. Confection des éprouvettes cylindriques

Il s'agit des briquettes cylindriques de dimensions : 10cm de diamètre et de 20cm de hauteur.

Pour la confection des briquettes des quatre composites, la procédure a été la même en termes de détermination des quantités nécessaires, du matériel utilisé et du mode opératoire qu'en 2002 (AMBARKA I., 2002); mais avec prise en compte des pourcentages respectifs en paille et les valeurs correspondantes des résultats des essais Proctor modifiés.

Pour chaque composite, nous avons confectionné au total 25 briquettes cylindriques.

Les références des briquettes des différentes séries sont consignées dans le tableau de l'

3.2.1.3. Ecrasement des éprouvettes cylindriques

Toutes les éprouvettes que nous avons confectionnées ont été enveloppées dans des toiles cirées pendant 7 jours afin d'éviter un retrait rapide. Ces éprouvettes ont été écrasées à la compression simple et à la traction par fendage après 28 jours d'âge. Il faut noter que ces 28 jours ont été pris de façon indicative en tenant compte du fait qu'après 3 à 4 semaines de construction des greniers en terre dans la zone d'étude, les grains pourraient déjà être stockés.

a. Ecrasement des éprouvettes cylindriques à la compression simple

L'essai d'écrasement a été fait de la même manière qu'en 2002 (AMBARKA I., 2002).

Au total, quatre éprouvettes de chaque composite ont été écrasées à la compression simple. Les valeurs des charges à la rupture sont consignées dans le tableau de l'Annexe V.

Le calcul de la résistance à la compression s'exprime par l'expression :

$$R_C = \frac{P}{\pi R^2}$$

Où :

- **P** : Charge moyenne de rupture à la compression (en N)
- **πR^2** : Section de l'éprouvette (en mm²)
- **R_C** = Résistance à la compression (MPa)

b. Ecrasement des éprouvettes cylindrique à la traction par fendage

L'essai d'écrasement a été fait de la même manière qu'en 2002 (Issakou A., 2002).

Au total, quatre éprouvettes de chaque composite ont été écrasées à la traction par fendage.

Les valeurs des charges à la rupture sont consignées dans le tableau de l'Annexe VI.

Le calcul de la résistance à la traction par fendage s'exprime par l'expression :

$$R_t = \frac{P}{\pi * R * h}$$

Où :

- **P** : Charge de rupture à la traction (en N) ;
- **R** : Rayon de base de l'éprouvette (mm) ;
- **h** : Longueur de l'éprouvette (mm) ;
- **R_t** : Résistance à la traction (MPa).

c. Expression des résultats des résistances sur éprouvettes cylindriques

Les valeurs des résistances à la compression simple et à la traction par fendage par composite se présentent comme suit :

Tableau II : Table des valeurs des résistances à la compression et à la traction par fendage sur éprouvettes cylindriques

Composite	Résistance à la compression simple (MPa)	Résistance à la traction par fendage (MPa)
1,5% de paille	2,292	0,456
2% de paille	2,801	0,491
2,5% de paille	2,546	0,540
3% de paille	1,859	0,583

3.2.2. Compression et traction par flexion sur éprouvettes prismatiques

Ces essais ont consisté à confectionner des séries d'éprouvettes prismatiques normalisées (normes NF P 18-401) qui ont été soumises aux différents écrasements.

Les résultats des essais Proctor Modifiés précédents nous ont aussi servi dans la détermination des quantités nécessaires entrant dans la confection des éprouvettes. Nous avons également réalisé quatre séries d'éprouvettes aux pourcentages respectifs de 1,5%, 2%, 2,5% et 3% de paille par rapport au sol argileux.

3.2.2.1. Confection des éprouvettes prismatiques

Il s'agit des briquettes prismatiques de dimensions : 4cmx4cmx16cm.

a. Série de briquettes à 1,5% de paille par rapport au sol argileux

♦ Détermination des quantités nécessaires pour chaque brique

Les constituants du mélange sont le sol argileux séché, la paille hachée sèche, la fusion de néré et l'eau.

- Les références Proctor du composite sont : $\gamma_{dmax} = 1,86 \text{ g/cm}^3$ et $W_{op} = 12,5\%$;
- Caractéristique de l'éprouvette : volume $V = 256 \text{ cm}^3$;
- Caractéristique de la fusion de néré : poids apparent $\gamma_n = 1,05 \text{ g/cm}^3$.

La masse totale humide d'une éprouvette s'exprime par :

$$M_{th} = \frac{V * (100 + W_{op}) \gamma_{dmax}}{100}$$

$$M_{th} = \frac{256 * (100 + 12,5) * 1,86}{100} = 535,68 \text{ g}$$

La masse totale d'eau est s'exprime par :

$$M_{te} = \frac{\gamma_{dmax} * V * (100 + W_{op})}{100} - \gamma_{dmax} * V$$

$$M_{te} = \frac{1,86 * 256 * (100 + 12,5)}{100} - 1,86 * 256 = 59,52 \text{ g}$$

En désignant par M la masse de sol argileux sec et M_e la masse d'eau de gâchage;

Nous avons : $M + 0,015M + 0,06M + M_e = M_{th}$

Soit **$1,075M + M_e = 535,68$** [1]

En considérant le volume de la fusion comme le volume d'eau V_e que renferme la fusion ;

Nous avons :

$$V_e = \frac{\text{Poids fusion}}{\text{Densité apparent fusion}}$$

Soit $V_e = \frac{0,06M}{1,05} = 0,057M$

Nous avons : $V_e + M_e = M_{te}$

Soit **$0,057M + M_e = 59,52$** [2]

La résolution des équations [1] et [2] nous donne :

$M = 467,74$;

$M_e = 32,86$;

Le poids de la fusion **$M_n = 0,06M = 0,06 * 2868,56 = 28,06$;**

Le poids de la paille **$M_p = 0,015M = 0,015 * 2868,56 = 7,02$.**

Les quantités nécessaires pour mouler chaque brique prismatique sont respectivement de :

- 467,74 grammes de sol argileux ;
- 7,02 grammes de pailles hachée ;
- 28,06 grammes de fusion de néré ;
- 32,86 grammes d'eau de gâchage.

♣ **Matériel**

L'appareillage comprend essentiellement :

- Un moule prismatique en acier à trois ouvertures de 4cmx4cmx16cm chacune muni d'une hausse à trois ouvertures ;
- Une balance électronique de précision 0,1gramme ;
- Un appareil à choc ;
- Un appareil malaxeur ;
- Une règle en acier biseautée.

♣ **Mode opératoire**

Les opérations ont été les suivantes :

- Prise de 1403,2 grammes de sol argileux sec, 21,0 grammes de pailles hachée séchée, 84,2 grammes de fusion de néré et 98,6 grammes d'eau de gâchage pour chaque moule trois ouvertures ;
- Malaxage vigoureuse du composite humidifié à l'aide de l'appareil à malaxer sans perte de particules solides ;
- Onction de l'intérieur du moule muni de la hausse avec du gas-oil ou d'huile à moteur et installation du moule dans l'appareil à choc ;
- Encastrement du composite malaxé dans le moule jusqu'à ras ;
- Mise en marche de l'appareil à choc et implémenter 60 chocs au moule contenant le composite aux fins d'assurer un serrage des particules du composite ;
- Encastrement du reste du composite malaxé et mise en marche de l'appareil à choc pour une deuxième série de 60 chocs sur le composite ;
- Retrait du moule de l'appareil à choc ;
- Retrait de la hausse du moule et surfacage du composite à l'aide de la règle à racler ;
- Pesé de l'ensemble et laisser le moule contenant le composite séjourner avant le démoulage ;

- Inscription sur une fiche, des références du moule à savoir : numéro identifiant, poids du contenu après soustraction du poids du moule, type de composite, date de confection ;
- Exposition des éprouvettes démoulées le lendemain dans une chambre froide.

Au total, nous avons confectionné deux séries de trois briquettes de ce composite.

Pour les trois autres composites, la procédure a été la même en termes de détermination des quantités nécessaires, du matériel utilisé et du mode opératoire que celle du composite à 1,5% ; mais avec prise en compte des pourcentages respectifs en paille et les valeurs correspondantes des résultats des essais Proctor modifiés. Les quantités nécessaires de composant pour mouler chaque briquette des autres composite se trouvent en Annexe I

b. Expression des résultats de la confection des éprouvettes prismatiques

Pour chaque composite, nous avons confectionné deux séries de trois briquettes.

Les références des différentes séries d'éprouvettes prismatiques sont consignées dans le tableau de l'Annexe VII.

3.2.2.2.Ecrasement des éprouvettes prismatiques

Toutes les éprouvettes que nous avons confectionnées ont séjournées dans une chambre froide pendant 28 jours ; durée prise de façon indicatif comme précisé plus haut. Ces éprouvettes ont été écrasées à la traction par flexion et à la compression simple.

a. Ecrasement des éprouvettes à la traction par flexion

♦ Matériel

Le matériel est essentiellement composé d'une presse universelle munie à sa droite d'un système de chargement à trois génératrices pour la traction par flexion: deux génératrices en bas avec un empâtement de 12 cm sur lesquelles reposera l'éprouvette sur sa longueur et une génératrice en haut qui appuiera sur l'éprouvette en son centre. La précision du cadran de la presse réservé pour la lecture des charges à la traction par flexion est de 0,05kN et la mise en charge s'effectue à la vitesse de 0,5 bars par seconde avec une tolérance de $\pm 0,1$ bar.

♦ Mode opératoire

Le procédé a été le suivant :

- Marquage unitaire de chaque éprouvette prismatique par rapport à la fiche de remplissage des séries d'éprouvettes ;
- Pesé de chaque éprouvette et marquage des différents poids ;
- Mise de l'éprouvette sous presse sur les deux génératrices du bas de façon à laisser 2cm en bouts de l'éprouvette de part et d'autre de deux génératrices;
- Mise en marche de la presse et lecture de la charge à la rupture ;
- Retrait de l'éprouvette sectionnée en deux de la presse et insertion de l'éprouvette suivante par série : les deux bouts de chaque éprouvette sectionnée ont servi pour l'essai de compression sur éprouvettes prismatiques.

Au total donc, six éprouvettes de chaque composite ont été écrasées à la traction par flexion.

♦ *Expression des résultats*

Les valeurs des charges à la rupture des écrasements à la traction par flexion sont consignées dans le tableau de l'Annexe VIII.

Le calcul de la résistance à la traction par flexion s'exprime par l'expression :

$$R_t = \frac{3,6P}{a^2}$$

Où :

- **P** : Charge moyenne de rupture à la traction par flexion (en N)
- **a** : coté de la section carrée de l'éprouvette (en mm)
- **R_t** = Résistance à la traction par flexion (MPa)

b. Ecrasement des éprouvettes prismatiques à la compression

♦ *Matériel*

Le matériel est essentiellement composé d'une presse universelle munie à sa gauche d'un système de chargement à deux plaquettes pour la compression simple: une plaquette fixe en bas et une seconde amovible en haut par le biais de laquelle la charge est implémentée sur l'éprouvette. La section de chacune des plaquettes est de 25,2 cm². La précision du cadran de la presse réservé pour la lecture des charges à la compression simple est de 1kN et la mise en charge s'effectue à la vitesse de 5 bars par seconde avec une tolérance de ± 2 bars.

♦ *Mode opératoire*

Le procédé a été le suivant :

- Stockage des demi-éprouvettes par couple et par série à l'issue de l'essai de traction par flexion ;
- Mise de chaque demi-éprouvette sous presse, centrée entre les plaquettes du système de chargement à la compression simple ;
- Mise en marche de la presse et lecture de la charge à la rupture ;
- Retrait de la demi-éprouvette après écrasement et insertion de la seconde demi-éprouvette du même couple puis insertion des autres demi-éprouvettes par série.

Au total donc, douze demi-éprouvettes de chaque composite ont été écrasées à la compression simple.

♦ *Expression des résultats*

Les valeurs des charges à la rupture des écrasements à la compression sont consignées dans le tableau de l'Annexe IX

Le calcul de la résistance à la compression simple s'exprime par l'expression :

$$R_c = \frac{P}{S}$$

Où :

- **P** : Charge moyenne de rupture à la compression simple (en N)
- **S** : Section des plaquettes de la presse (en mm)
- **R_c** = Résistance à la traction par flexion (MPa)

c. Valeurs des résistances sur éprouvettes prismatiques

Les valeurs des résistances se présentent comme suit :

Tableau III: Table des valeurs des résistances à la compression et à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques

Composite	Résistance à la compression simple (MPa)	Résistance à la traction par flexion (MPa)
1,5% de paille	2,844	0,487
2% de paille	3,340	0,619
2,5% de paille	2,844	0,712
3% de paille	2,745	0,788

Chapitre 4 : DETERMINATION DES COEFFICIENTS PHYSICO-MECANIQUE DES DIFFERENTS COMPOSITES

Le grenier, après sa confection est soumis à des charges énormes des différents produits vivriers qu'il est amené à conserver. La résistance de ses parois face aux différentes contraintes sera fonction des caractéristiques propres du matériau composite entrant dans la confection du grenier.

L'étude des coefficients physico-mécaniques du matériau composite vise essentiellement à déterminer le module d'élasticité E du matériau, son coefficient de poisson ν , sa cohésion C et son angle de frottement interne ϕ .

Pour ce faire, les essais de laboratoire effectués sont les essais de chargement sur éprouvettes avec mesures des résistances et des déformations (pour E et ν) et l'essai de cisaillement direct (pour C et ϕ).

4.1. Détermination du module d'élasticité E et du coefficient de poisson ν

4.1.1. Détermination de E et de ν du composite à 1,5% de paille

Pour ces essais, nous avons soumis le reste des éprouvettes cylindriques à des chargements statiques directs progressifs et avons enregistré les différentes charges avec leurs déformations correspondantes. Les résultats nous ont servi dans la détermination de E et de ν .

4.1.1.1. Essai de chargement sur éprouvettes cylindriques à 1,5% de paille

♦ Matériel

Le matériel est essentiellement composé de :

- Une presse munie d'un comparateur ;
- Des comparateurs : un comparateur dans le sens longitudinal pour la mesure de la déformation longitudinale (incorporé à la presse) et quatre comparateurs dans le sens transversal pour la mesure des déformations transversales ;
- Un piston ;
- Un dispositif monté à cet effet (Annexe X) pour permettre la bonne fixation des comparateurs transversaux à mi-hauteur de l'éprouvette.

♦ Mode opératoire

L'opération a consisté à :

- Mise l'éprouvette dans le dispositif de fixation des comparateurs transversaux ;
- Mise de l'ensemble sous presse ;
- Pose du piston au-dessus de l'éprouvette ;
- Prise de contact entre le bout du piston et la pointe de la presse ;
- Réglage des cinq comparateurs à zéro ;
- Tournage de la manivelle de la presse à vitesse constante et lectures des valeurs de chaque comparateur à toutes les charges de 100Kg ;
- Enregistrement des fiches établies à cet effet (voir model en Annexe XI) à raison d'une fiche par éprouvette.

Au total, 14 éprouvettes du composite à 1,5% de paille ont subi l'essai de chargement.

♦ *Expression des résultats*

Au total, nous avons remplis quatorze fiches suivant le model de l'Annexe XI.

4.1.1.2. Détermination du module d'élasticité E pour le composite à 1,5% de paille

Le module d'élasticité E se définit comme le rapport de la contrainte unitaire par la déformation longitudinale relative. Cela revient à la pente de la courbe contrainte-déformation dans le domaine élastique du matériau ayant subi l'essai de chargement. Si le matériau a un comportement élastique linéaire, la courbe contrainte-déformation doit se présenter comme une droite dans le domaine élastique.

Les résultats des essais de chargement sur éprouvettes cylindriques concernant les différentes charges appliquées et la lecture du comparateur longitudinal nous ont permis de tracer les courbes contrainte-déformation des quatorze éprouvettes du composite à 1,5% de paille.

Ces courbes se présentent comme l'indique la Figure 5 ci-dessous.

Au vue de ces courbes, nous constatons que nous ne pouvons pas les assimiler à des droites. Notre matériau du composite à 1,5% de paille ne présente donc pas un comportement élastique linéaire. La détermination du module d'élasticité reviendra alors fastidieuse.

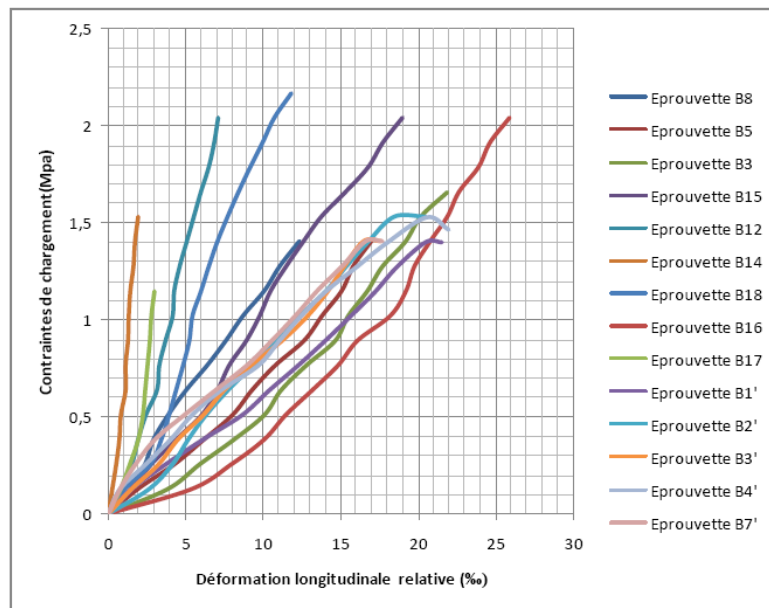


Figure 5: Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 1,5% de paille

4.1.1.3. Détermination du coefficient de poisson ν pour le composite à 1,5% de paille

Le coefficient de poisson se définit comme le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale en valeurs relatives.

Cela reviendra avec les résultats de nos essais de chargement à faire le rapport de variation relative du rayon (moyenne des lectures des quatre comparateurs transversaux) par la déformation relative longitudinale.

La formule de calcul est :

$$\nu = \frac{\Delta_R/R}{\Delta_h/h}$$

Où :

- Δ_R = moyenne des lectures des quatre comparateurs transversaux ;
- R = rayon de l'éprouvette ;
- Δ_h = lecture du comparateur longitudinal ;
- ν = coefficient de poisson.

Pour chaque éprouvette, nous avons fait la moyenne des différentes valeurs calculées pour les différentes charges de 100Kg. Les valeurs sont présentées dans le tableau de l'Annexe XII.

Le coefficient de poisson du composite à 1,5% de paille est revenue a la moyenne des coefficients de toutes les éprouvettes soit $\nu = 0,52$.

4.1.2. Détermination de E et de ν des composites à 2%, 2,5% et 3% de paille

Ces déterminations se sont faites de la même manière que pour le composite à 1,5%.

4.1.2.1. Expression des résultats du composite à 2% de paille

Au total ici, 16 éprouvettes du composite à 2% de paille ont subi l'essai de chargement.

Les courbes se présentent comme suit :

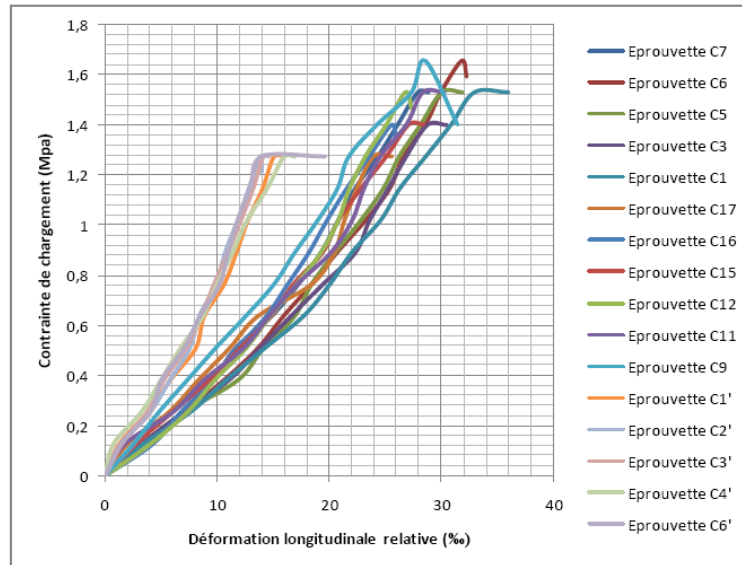


Figure 6 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 2% de paille

Au vue de ces courbes, nous ne pouvons non plus les assimiler à des droites. Notre matériau du composite à 2% de paille ne présente donc pas un comportement élastique linéaire.

Les valeurs des coefficients de poisons par éprouvette sont présentées dans le tableau de l'Annexe XIII.

Le coefficient de poisson du composite à 2% de paille revient à la moyenne des coefficients de toutes les éprouvettes soit $\nu = 0,37$.

4.1.2.2. Expression des résultats du composite à 2,5 % de paille

Au total ici, 16 éprouvettes du composite à 2,5% de paille ont subi l'essai de chargement.

Les courbes contrainte-déformation des seize éprouvettes du composite à 2,5% de paille se présentent comme suit :

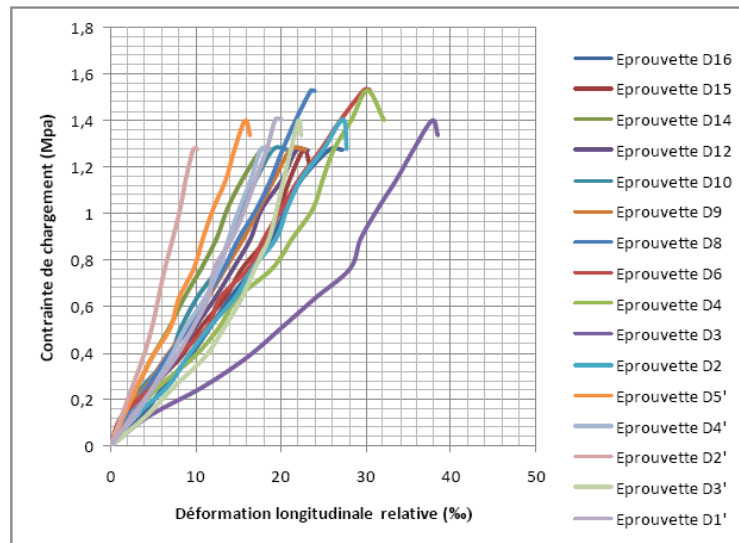


Figure 7 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 2,5% de paille

Le composite à 2,5% de paille ne présente non plus un comportement élastique linéaire.

Les valeurs des coefficients de poisons par éprouvette sont présentées dans le tableau de l'Annexe XIV. Le coefficient de poisson du composite à 2,5% revient à $\nu = 0,33$.

4.1.2.3. Expression des résultats du composite à 3 % de paille

Au total ici, 17 éprouvettes du composite à 3% de paille ont subi l'essai de chargement.

Les courbes contrainte-déformation se présentent comme suit :

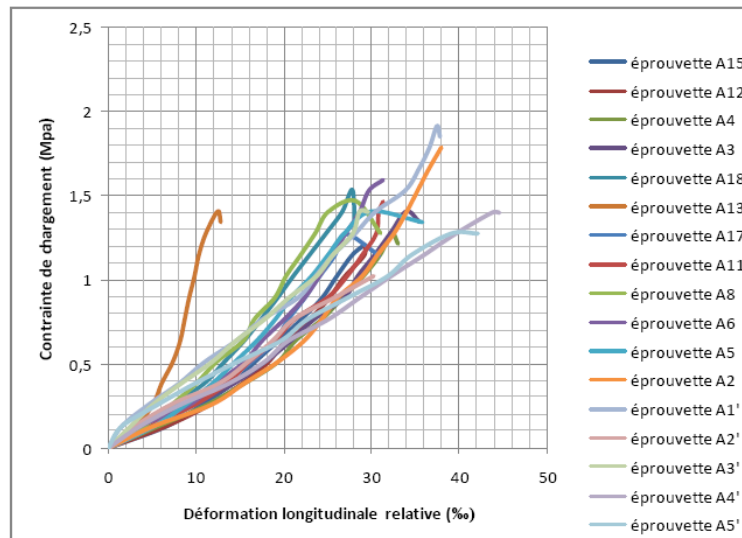


Figure 8 : Courbes Contrainte-déformation des éprouvettes à 3% de paille

Le composite à 3% de paille ne présente non plus un comportement élastique linéaire.

Les valeurs des coefficients de poisons par éprouvette sont présentées dans le tableau de l'Annexe XV. Le coefficient de poisson du composite à 3% revient à $\nu = 0,33$.

4.2. Détermination de la cohésion C et de l'angle de frottement interne ϕ des composites

Pour la détermination de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau, nous avons procédé à l'essai de cisaillement direct sur les différents composites étudiés plus haut à savoir : 1,5% ; 2% ; 2,5% et 3% de paille par rapport au sol argileux. Le dimensionnement de notre paroi du grenier devant se faire à long terme ; donc à partir de l'âge de stockage des céréales, alors la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau composite doivent être déterminés à 28 jours d'âge après le moulage du composite sous la base des résultats des Proctor modifiés. Aussi, soucieux de savoir si ces caractéristiques du matériau évoluent avec l'âge, nous nous sommes proposé de réaliser des cisaillements sur les différents composites à des dates intermédiaires. De façon indicative, nous avons choisi 3jours, 7jours et 14jours.

4.2.1. Préparation des échantillons des différents composites

La préparation des échantillons a consisté essentiellement à mouler des plaquettes de composite de dimensions 60mmx60mmx40mm qui devront pouvoir être insérées dans la boîte de Casagrande pour subir le cisaillement.

♦ Matériel

Le matériel est composé de :

- Un carottier de diamètre 70mm et de hauteur 40mm ;
- Une plaquette carrée en acier de section 60mmx60mm ;
- Un outil à tailler ;
- Une goupille servant de pilon ;
- Une règle en acier biseautée ;
- Une main (en forme de cuillère) ;
- Un flacon d'eau muni d'une pissette pour mesure ;
- Des tares pour les pesées
- Une balance électronique de précision 0,1g.

♦ Mode opératoire

Le moulage a consisté à :

- Faire la pesée des différentes proportions des matériaux du composite suivant les résultats des essais Proctor modifiés et ceci par type de composite ;
- Mouiller et malaxer chaque composite ;

- Mouler le composite dans le carottier en trois couches compactées à 25 coups chacune ;
- Démouler le carottier et tailler l'échantillon en des sections latérales planes de 60mmx40mm à l'aide de la plaquette carrée en acier et de l'outil à tailler.

Nous obtenons alors des plaquettes prismatiques d'échantillons de 60mmx60mmx40mm.

Pour chaque composite, douze (12) plaquettes prismatiques ont été moulées au total à raison de trois plaquettes par cisaillement aux différents âges énoncés plus haut.

4.2.2. Essai de cisaillement direct sur composite à 1,5% de paille

♦ Matériel

Le matériel est essentiellement composé de :

- Une boîte de Casagrande composée d'une demi-boîte supérieure appelée fourreau munie d'un piston tapissé à sa base par une pierre poreuse, et une demi-boîte inférieure appelée embase avec une autre pierre poreuse incorporée ;
- Une machine à cisailier de douze vitesses : pour l'essai de cisaillement direct en laboratoire, on utilise de façon classique la vitesse de 1mm/mn ;
- Un chronomètre sportif.

♦ Mode opératoire

Le mode opératoire se présente comme suit :

- Insertion de l'échantillon déjà préparé comme indiqué plus haut dans la boîte de Casagrande ;
- Installation de l'ensemble sur la machine à cisailier ;
- Mise en charge verticale de un (1) bar sur l'échantillon (effort de compression) par le biais du piston de la demi-boîte supérieure ;
- Mise en marche de la machine à cisailier et lecture de l'effort horizontal de traction sur le dynamomètre de la machine : au démarrage de l'essai, les lectures du dynamomètre commencent dès que l'aiguille commence à bouger et elles sont faites toutes les 10 secondes jusqu'à ce que l'aiguille se stabilise pendant un temps et même se met à régresser ; signe de cisaillement de l'échantillon ;
- Enregistrement au crayon des lectures directement sur des fiches de labo établies à cet effet: ces fiches sont faites d'un repère semi-logarithmique dont l'axe des abscisses

est gradué en mm/mn et l'axe des ordonnées est gradué en 1/100^{ème} de mm (lecture du dynamomètre) ;

- Démontage du premier échantillon après la rupture et montage du deuxième échantillon ;
- Mise en charge vertical de deux (02) bars sur l'échantillon ;
- Mise en marche de la machine et enregistrement des lectures du dynamomètre au bleu dans le même repère ;
- Reprise de la même opération avec le troisième échantillon avec une mise en charge de trois (03) bars et enregistrement des lectures au rouge dans le même repère.

Nous obtenons alors trois courbes dans le même repère dont les maxima sont les charges de rupture sous chargement vertical respectifs de 1 bar, 2 bars et 3 bars.

Au total, quatre séries d'essais de cisaillement ont été faites sur le composite à 1,5% de paille à 3 jours, à 7 jours, à 14 jours et à 28 jours.

4.2.3. Essai de cisaillement direct sur les composites à 2%, 2,5% et 3% de paille

Le matériel et le mode opératoire ont été les mêmes que pour le composite à 1,5%.

4.2.4. Expression des résultats des essais de cisaillement sur les quatre composites

Le traitement des fiches remplies lors de l'opération consiste à poser un calque de laboratoire (comportant un repère orthonormé) sur chacune des fiches en faisant coïncider les origines des deux repères. Il faut noter que le repère du calque est gradué en contraintes normales (en bar) sur l'axe des abscisses et en contraintes tangentielles (en bar) sur l'axe des ordonnées.

Le maximum de la première courbe est reporté au-dessus de la marque de 1 bar de l'axe des abscisses, celui de la deuxième courbe au-dessus de 2 bars et celui de la troisième courbe au-dessus de la marque de 3 bars de l'axe des abscisses.

Nous avons constaté que par ces trois points marqués sur le calque, il passe une droite ; cela pour toutes les seize séries d'essais réalisés: c'est la droite intrinsèque de Coulomb. Cette droite coupe l'axe des ordonnées en une valeur de contrainte qui est la cohésion du composite et l'angle que fait la droite avec l'horizontal est l'angle de frottement interne du composite.

Les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne par âge et par composite se présentent comme suit :

Tableau IV : Valeurs de C et de ϕ par âge et par composite

Composite	Date de moulage	Date de cisaillement	Age (jour)	Cohésion C (daN/cm ²)	Angle de frottement interne ϕ (°)
1,5% de paille	15/04/2010	18/04/2010	3jours	0,50	23
	15/04/2010	22/04/2010	7jours	0,65	14
	15/04/2010	29/04/2010	14 jours	0,70	25
	15/04/2010	13/05/2010	28 jours	0,95	25
2% de paille	16/04/2010	19/04/2010	3jours	0,60	28
	16/04/2010	23/04/2010	7jours	0,80	21
	16/04/2010	30/04/2010	14 jours	0,95	20
	16/04/2010	14/05/2010	28 jours	1,15	21
2,5% de paille	16/04/2010	19/04/2010	3jours	0,60	25
	16/04/2010	23/04/2010	7jours	0,70	25
	16/04/2010	30/04/2010	14 jours	0,80	20
	16/04/2010	14/05/2010	28 jours	1,10	23
3% de paille	16/04/2010	19/04/2010	3jours	0,55	19
	16/04/2010	23/04/2010	7jours	0,60	17
	16/04/2010	30/04/2010	14 jours	0,70	20
	16/04/2010	14/05/2010	28 jours	1,00	17

Partie3 : DISCUSSION ET ANALYSES

Chapitre 5 : ANALYSE DES RESULTATS DE L'ETUDE GEOTECHNIQUE

5.1. Essais d'identification

La granularité étalée ($C_u = 200$) du sol de la présente étude confirme que notre matériau est pratiquement de la même granularité que le matériau utilisé dans nos essais en 2002.

Les Limites d'Atterberg nous ont conduits à un indice de plasticité de 18,11 ; ce qui est pratiquement proche de la valeur trouvée en 2002 ($I_p = 19,5$).

Pour la classification de notre sol, nous avons utilisé les méthodes suivantes :

- ▶ D'après l'Abaque de Plasticité de Casagrande (Annexe XX), un indice de plasticité de 18 et une limite de liquidité de 36 met notre sol dans le groupe des argiles inorganiques de plasticité moyenne.
- ▶ La classification USCS des sols grenus confère à notre sol la classe SA (Sable Argileux).

Les essais d'identification ont montré que le matériau est de l'argile à plasticité moyenne. En termes de résistance, ce matériau tout seul ne fournira pas de bonnes caractéristiques mécaniques.

5.2. Essais de résistance

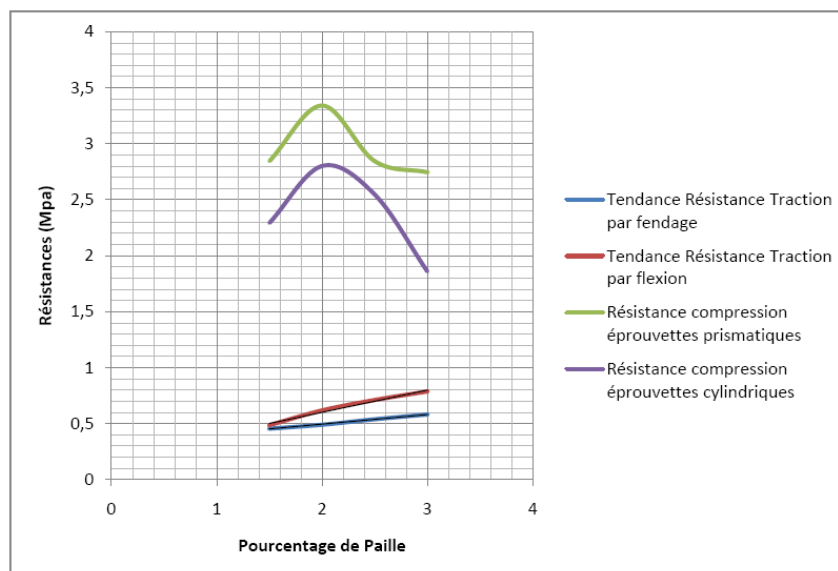


Figure 9 : Courbes de tendances des résistances en fonction des pourcentages de paille

5.2.1. Résistances en compression sur éprouvettes cylindriques et prismatique

Les résultats des résistances en compression sur éprouvettes cylindriques comme prismatiques montrent que ces résistances se sont accrues lorsqu'on passe d'un taux de 1,5% de paille à

2%. A 2,5%, ces résistances ont chuté et encore plus à 3% (confère Figure 9). Nous obtenons alors pour chacune des résistances un optimum de 2% en paille.

5.2.2. Résistances en traction par fendage sur éprouvettes cylindriques et en traction par flexion sur éprouvettes prismatiques

Les résultats des résistances en traction par fendage comme en traction par flexion montrent que ces résistances s'accroissent pratiquement de façon linéaire avec le pourcentage de paille (confère Figure 9). Nous pourrions alors déduire que l'utilisation de la paille dans les constructions traditionnelles joue le même rôle que l'utilisation des armatures dans les constructions en béton. Par ailleurs, il sera intéressant de voir plus tard l'évolution de cette tendance à la croissance en liaison avec la quantité de paille. Le pourcentage maximum de paille sera obtenu par la contrainte de compression minimale qu'on désire avoir car au-delà de 2% de paille ; plus il y a la paille moins grande est la résistance en compression.

Les valeurs des résistances à la compression comme à la traction des éprouvettes prismatiques sont plus significatives que les valeurs des résistances à la compression comme à la traction des éprouvettes cylindriques. Convenons de prendre les résultats des éprouvettes prismatiques pour la suite de l'étude.

5.3. Module d'élasticité et coefficient de poisson

- ▶ Les résultats des courbes contrainte-déformation de tous les composites montrent que notre matériau ne présente pas un comportement élastique linéaire. Cela reviendra fastidieux de déterminer le module d'élasticité ; et dans le cas échéant, cela serait un module d'élasticité non linéaire ; encore qu'il faudra poursuivre les essais pour savoir le caractère élastique ou non de notre matériau composite.
- ▶ Le coefficient de poisson est passé de 0,52 à 0,33. Nous constatons alors que l'effet poisson diminue avec le pourcentage élevé de la paille dans le composite.
- ▶ Pour la détermination des coefficients physico-mécaniques(E , ν), le module d'élasticité n'étant pas linéaire, nous ne pourrions pas appliquer les théories linéaires de calcul de structure pour les parois des greniers en terre ; à moins que cela ne soit par approximation. Nous nous proposons alors de mener le calcul de notre paroi à la rupture.

5.4. Cohésion et angle de frottement interne

- ▶ Les résultats des essais de cisaillement direct sur chaque composite prouvent que la cohésion augmente avec l'âge ; même si l'angle de frottement interne ne varie pas dans un sens précis. Que se soit pour l'équation de la demi-droite de Coulomb : $\tau = \sigma * tg\varphi + C$ ou pour la condition de Coulomb faisant intervenir les contraintes principales : $\sigma_1 = tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) * \sigma_3 + 2 * tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) * C$; nous constatons avec des valeurs prises pour τ d'une part, et d'autres valeurs prises aussi pour σ_3 d'autre part que les caractéristiques globales (C ; φ) de tous les composites se sont améliorées entre 3 jours et 28 jours malgré l'ordre de variation de l'angle de frottement interne. Nous pourrions alors dire que les coefficients mécaniques (C ; φ) du composite s'améliorent à l'air libre avec l'âge. Il sera alors intéressant d'envisager des essais de cisaillement direct sur le composite au-delà de 28 jours de séchage pour voir la date de stabilité de cette croissance de performance due à C et φ .
- ▶ Les résultats montrent également qu'à chaque âge donné, la cohésion du composite à 2% de paille est optimale (confère Figure 10). Cela confirme alors que 2% de paille apparaît comme l'optimum de la quantité de paille pour obtenir aussi de meilleures performances en termes des coefficients mécaniques (C ; φ) du matériau composite.

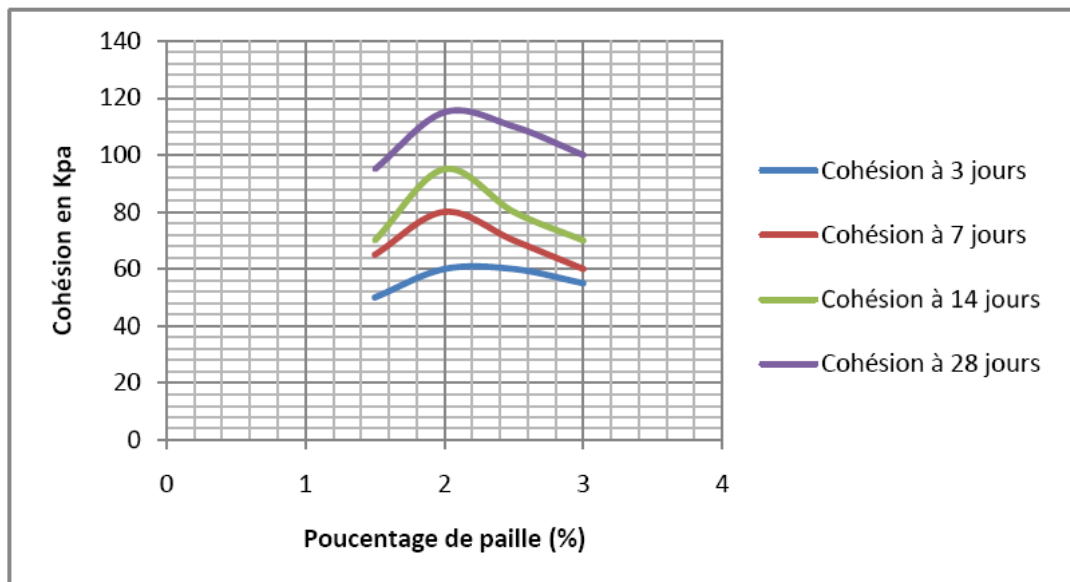


Figure 10 : Courbes de tendance de variation de la cohésion en fonction du pourcentage de paille

Chapitre 6 : CALCUL DE STRUCTURE

6.1. Calcul des contraintes

6.1.1. Détermination des contraintes engendrées par le stockage des céréales

6.1.1.1. Caractéristiques des grains

- Angle de frottement interne φ ;
- Cohésion $C=0$;
- Poids apparent γ_g ;

6.1.1.2. Caractéristiques de la coupole inférieure chargée

- Hauteur de la coupole H ;
- Repère associé (OZ) ;
- Angle d'inclinaison au point z

considéré θ ;

- Contraintes engendrées par les grains
à la facette de la paroi : σ_1 verticale et σ_3
horizontale.

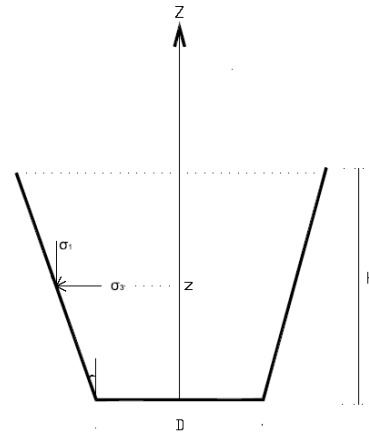


Figure 11 : Tronc de cône tangent à la paroi
du grenier à une profondeur z donnée

6.1.1.3. Approche méthodologique de calcul

Dans un premier état, supposons que la paroi du silo n'existe pas et que les grains sont donc sur une épaisseur z et à l'infini dans le sens perpendiculaire à z .

Dans un deuxième état où la paroi est en place et si le silo supporte les efforts exercés par les des grains au-dessus tout en assurant son équilibre, alors il sera correctement dimensionné.

En appliquant la mécanique des sols aux grains du silo, nous pouvons donc assimiler les contraintes σ_1 et σ_3 à des contraintes principales avec σ_1 la contrainte majeure et σ_3 la contrainte mineure.

6.1.1.4. Expression des contraintes

L'effet du poids propre des grains à un point z de la paroi nous donne

$$\sigma_1 = \gamma_g * (H - z) \quad [3]$$

A l'équilibre limite du point considéré (dans le cas où les grains sont à l'infini dans les directions transversales à celle de z) nous aurons :

$$\sigma_3 = K_a * \sigma_1 \quad [4]$$

Où :

$$- K_a = \frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{est le coefficient de poussée.}$$

La projection des contraintes principales sur la paroi inclinée nous donne respectivement :

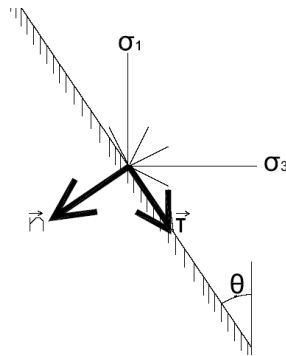


Figure 12 : Inclinaison de la paroi de la coupole au point z considéré

$$\begin{aligned} \sigma_n &= (\sigma_1 * \sin \theta + \sigma_3 * \cos \theta) = \sigma_1 * [\sin \theta + K_a * \cos \theta] \\ \tau &= (\sigma_1 * \cos \theta - \sigma_3 * \sin \theta) = \sigma_1 * [\cos \theta - K_a * \sin \theta] \\ \sigma_n &= \gamma_g * (H - z) * \cos \theta * [\tan \theta + \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)] \quad [5] \\ \tau &= \gamma_g * (H - z) * \cos \theta * [1 - \tan \theta * \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)] \quad [6] \end{aligned}$$

Ainsi, en chaque point donné de la paroi du grenier de hauteur H et d'angle d'inclinaison θ connus, nous pourrions en déduire les valeurs des contraintes normale σ_n et tangentielle τ engendrées par le contenu des grains au niveau de la paroi.

6.1.2. Détermination des contraintes internes aux parois du grenier

6.1.2.1. Contrainte de traction engendrée par σ_n

Une coupe transversale de la coupole inférieure à une hauteur z donnée, se présente comme un anneau circulaire soumis à la pression σ_n des grains. Cette contrainte est constante sur une couronne correspondante à une valeur fixe de z. Par contre elle varie suivant le diamètre D(z) qui est différent selon la position de z.

Soit le schéma de principe suivant :

a. Caractéristiques de la section

- e : épaisseur de la paroi du grenier
- $ds = R(z)d\alpha * dz$: section infinitésimale de la paroi intérieure engendrée par un angle d'ouverture $d\alpha$ et une hauteur dz ;
- α : angle d'ouverture de la section ds ;
- $df = -\sigma_n * ds$: force engendrée par σ_n sur la section ds ;
- T : effort de traction engendré par un demi-anneau sur l'autre.

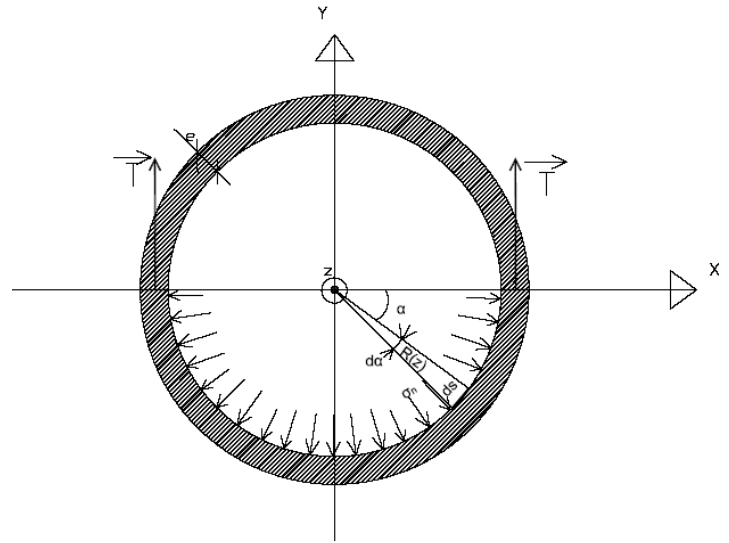


Figure 13 : Coupe transversale de la coupole inférieure au point z considéré

b. Expression de la contrainte

A l'équilibre, nous aurons en valeur absolue

$$2 * T = \int_0^\pi \sigma_n * \sin \alpha * R(z) d\alpha dz = R dz * \sigma_n * \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = 2R(z) dz \sigma_n = D * \sigma_n dz$$

$$\text{Soit : } T = \frac{1}{2} D(z) * \sigma_n dz$$

La contrainte à la traction revient à :

$$\sigma_{trac} = \frac{T}{e * dz} = \frac{D(z) * \sigma_n}{2 * e} \quad [7]$$

Cette contrainte devra être inférieure à la contrainte de calcul à la traction obtenue à partir de la contrainte de traction par les essais en laboratoire.

Comme valeur de la contrainte de calcul, nous convenons d'appliquer un coefficient de sécurité de 0,6 sur la valeur de la contrainte obtenue par les essais en laboratoire ; cela pour tenir compte des erreurs qui entourent les essais (erreurs de lecture, de manipulation...)

6.1.2.2. Contrainte de compression engendrée par le poids de la partie supérieure à la cote z donnée

a. Caractéristiques de la coupole inférieure

- R_m : rayon méridien de la coupole inférieure ;
- $R(z)$: rayon circonférentielle de la coupole inférieure à une hauteur z donnée ;
- Δ_θ : variation de l'angle d'inclinaison θ de la paroi entre la cote z et la hauteur totale H de la coupole inférieure ;

- Γ_{par} : poids volumique de la paroi du grenier.

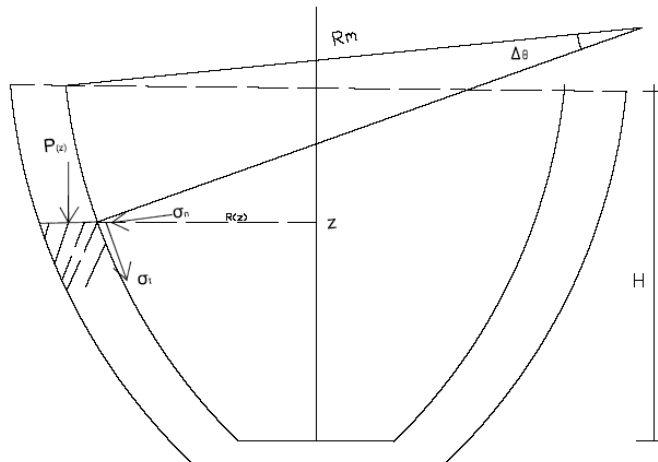


Figure 14 : Coupe longitudinale de la coupole inférieure

b. Expression de la contrainte de compression

Le poids $p(z)$ de la partie supérieure à la section infinitésimale $e * R(z)d\alpha$ (Figure 13 et Figure 14) s'exprime par :

$$p(z) = \Gamma_{\text{par}} * dv$$

Où :

$$- dv = e * Rm \Delta\theta * R(z)d\alpha = e * Rm(\theta_z - \theta_H) * R(z)d\alpha$$

Soit le poids : $p(z) = \Gamma_{\text{par}} * e * Rm * (\theta_z - \theta_H) * R(z)d\alpha$

La contrainte de compression revient à :

$$P(z) = \frac{p(z)}{e * R(z)d\alpha} = \Gamma_{\text{par}} * Rm * (\theta_z - \theta_H)$$

$$P(z) = \Gamma_{\text{par}} * Rm * (\theta_z - \theta_H) \quad [8]$$

Cette contrainte devra être inférieure à la contrainte de calcul à la compression obtenue à partir de la contrainte de traction par essai en laboratoire.

Comme valeur de la contrainte de calcul, nous convenons d'appliquer un coefficient de sécurité de 0,6 sur la valeur de la contrainte obtenue par les essais en laboratoire ; cela pour tenir compte des erreurs qui entourent les essais (erreurs de lecture, de manipulation...)

6.1.3. Condition de rupture de la paroi du grenier

Soit un point isolé de la paroi soumis aux contraintes internes comme indiqué ci-dessous:

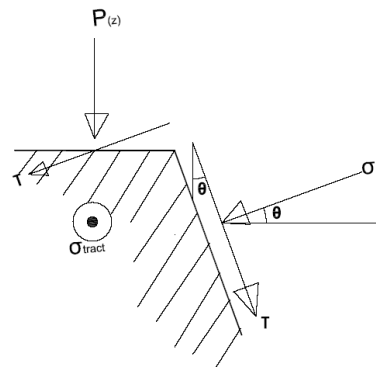


Figure 14: Point isolé de la paroi soumis aux contraintes internes

En considérant un chargement de révolution de notre coupole inférieure, les efforts intérieurs resteront constants le long d'une parallèle ; donc ce chargement aura moins d'effet parasite dans la direction de la contrainte σ_{trac} . Alors le plan critique autour de notre point considéré sera celui engendré par σ_n et $P(z)$.

Dans le plan engendré par σ_n et $P(z)$ la distribution des contraintes autour de notre point considéré s'exprimera par le cercle de Mohr ci-dessous :

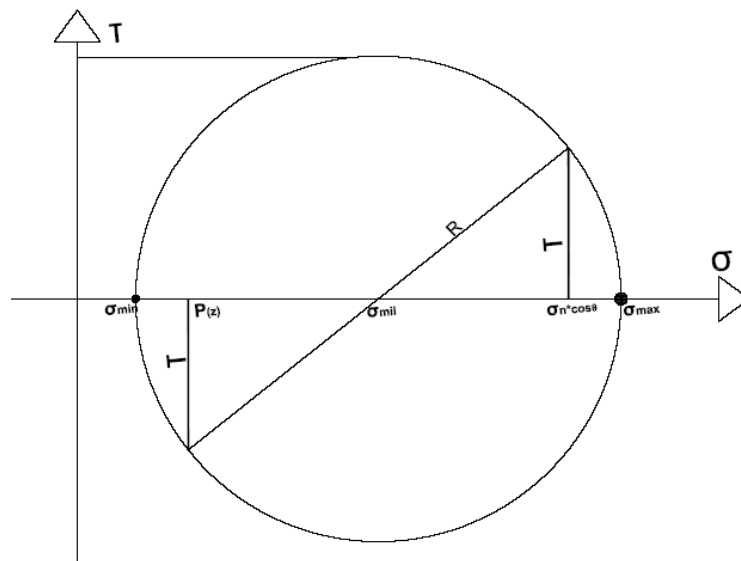


Figure 15: Cercle de Mohr des contraintes autour du point isolé

Les contraintes maximale et minimale qui seront engendrées autour de notre point s'exprimeront respectivement par :

$$\sigma_{max} = \sigma_{mil} + R$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{mil} - R$$

Où

$$- \sigma_{mil} = \frac{1}{2} * [\sigma_n \cos \theta + P(z)]$$

Nous avons la relation : $R^2 = (\tau)^2 + \left(\frac{\sigma_n \cos \theta - P(z)}{2}\right)^2$

Soit : $4 * R^2 = 4 * (\tau)^2 + (\sigma_n \cos \theta - P(z))^2$

D'où : $R = \frac{1}{2} * \sqrt{4 * (\tau)^2 + (\sigma_n \cos \theta - P(z))^2}$

Alors les contraintes principales autour du point considéré seront respectivement :

$$\sigma_{max} = \frac{1}{2} * [\sigma_n \cos \theta + P(z)] + \frac{1}{2} * \sqrt{4 * (\tau)^2 + (\sigma_n \cos \theta - P(z))^2} \quad [9]$$

$$\sigma_{min} = \frac{1}{2} * [\sigma_n \cos \theta + P(z)] - \frac{1}{2} * \sqrt{4 * (\tau)^2 + (\sigma_n \cos \theta - P(z))^2} \quad [10]$$

La rupture de notre point sera donc régie par les contraintes σ_{min} et σ_{max} . Si le cercle de Mohr de diamètre $|\sigma_{max} - \sigma_{min}|$ coupe la courbe intrinsèque de Coulomb en plus d'un point, alors on sera en rupture.

6.2. Vérification de la résistivité des parois du grenier communautaire

6.2.1. Caractéristiques du grenier communautaire

Le grenier que nous souhaitons communautaire sera construit sur les mêmes bases que le grenier familiale de type Yom dans le département de la Donga au Bénin ; c'est-à-dire :

- Superposition des deux (02) formes tronconiques ;
- La coupole inférieure sera le récipient contenant les grains ;
- La coupole supérieure servira à conserver la couche d'air isolante ;
- La hauteur de la coupole supérieure sera de moitié égale à celle de la coupole inférieure.

La mise en œuvre du grenier sera faite de la façon suivante :

- Le fond du grenier reposera sur un socle fait d'amas de terre et soigneusement ceinturé par une maçonnerie d'agglos ;
- Le socle sera mise en œuvre de manière à assurer une étanchéité hygrométrique par rapport au sol environnant humidifié : de façon générale le socle vers son sommet aura une forme légèrement arrondie et constituera le fond de la coupole inférieure ;
- La coupole inférieure prendra donc naissance à partir du dessus de la maçonnerie d'agglomérés et sera mise en œuvre sur des hauteurs ne dépassant guère 20cm par séance : la paroi de cette coupole qui est l'élément porteur fera l'objet de la vérification de résistivité ;
- La coupole supérieure qui a une forme renversée sur la première sera mise en œuvre de façon analogue à la première sur une hauteur égale à la moitié de la première.

Les caractéristiques du grenier communautaire sont :

- Hauteur de la coupole inférieure **H= 2,10m** ;
- Angle d'inclinaison de la paroi de la coupole inférieure à la base **$\theta = 55^\circ$** ;
- Epaisseur de parois **e = 8 cm** ;
- Rayon de base **$r_1 = 0,95 \text{ m}$** ;
- Rayon centrale **R = 2,05m** ;
- Rayon de courbure méridien de la coupole inférieure **Rm= 2,60m** ;
- Rayon supérieur d'ouverture du grenier **$r_2 = 0,80 \text{ m}$** (pour permettre à un bonhomme de pouvoir pénétrer dans le grenier à l'aide d'une échelle) ;
- Coefficient de pondération des charges : 1,35 (Charges permanentes).

6.2.2. Calcul des contraintes

6.2.2.1. Caractéristiques des grains

- Angle de frottement interne : angle de talus naturel moyen des grains $\phi_g = 35^\circ$;
- Cohésion **C=0** ;
- Poids apparent moyen des grains : $\gamma_g = 1,8 \text{ T/m}^3$;
- Coefficient de pondération des charges : 1,5 (considéré comme charge variable).

6.2.2.2. Contraintes normale et tangentielle à une hauteur z donnée

Nous avons les expressions des contraintes (équations 5 et 6) :

$$\sigma_n = \gamma_g * (H - z) * \cos \theta * [\text{tg} \theta + \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)]$$

$$\tau = \gamma_g * (H - z) * \cos \theta * [1 - \text{tg} \theta * \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)]$$

La construction géométrique de la coupole inférieure (Annexe XXII) nous a donné à tous les 20 cm le long de la hauteur des valeurs de θ et R et le tableau suivant nous donne la distribution des contraintes normales et tangentielles (contraintes pondérées du coefficient 1,5) le long de la hauteur de la coupole inférieure

Tableau V: Valeurs des contraintes engendrées par les grains le long de la hauteur de la coupole inférieure

z(m)	$\theta(^{\circ})$	R(m)	$\sigma_n(T/m^2)$	$\tau(T/m^2)$
0	55	0,95	5,526	1,994
0,2	48	1,209	4,743	2,400
0,4	42	1,41	3,996	2,579
0,6	36	1,57	3,268	2,631
0,8	31	1,7	2,623	2,519
1	25	1,804	1,985	2,352
1,2	20	1,886	1,450	2,058
1,4	15	1,948	0,984	1,693
1,6	12	1,992	0,639	1,244
1,8	8	2,02	0,330	0,772
2	3	2,03	0,087	0,266
2,1	0	2,149	0,000	0,000

Ces valeurs nous indiquent que la paroi de la coupole inférieure chargée présente deux points critiques à savoir :

- La base de la coupole où la contrainte normale engendrée est maximale ($\sigma_n=5,526T/m^2$) ;
- Et à 0,6 m de hauteur de la coupole inférieure où la contrainte tangentielle engendrée est maximale ($\tau=2,631T/m^2$).

6.2.2.3. Contraintes internes aux parois du grenier

a. Contrainte de traction engendrée par σ_n

Cette contrainte nous est donnée par l'équation 7 qui est :

$$\sigma_{trac} = \frac{T}{e \cdot dz} = \frac{D(z) \cdot \sigma_n}{2 \cdot e}$$

La distribution de la contrainte de traction le long de la hauteur de la coupole inférieure se présente comme suit :

Tableau VI : Distribution de la contrainte interne de traction suivant la hauteur z de la coupole inférieure

z(m)	$\theta(^{\circ})$	R(m)	$\sigma_n(T/m^2)$	$\sigma_{trac}(T/m^2)$
0	55	0,95	5,526	65,620
0,2	48	1,209	4,743	71,672
0,4	42	1,41	3,996	70,424
0,6	36	1,57	3,268	64,143
0,8	31	1,7	2,623	55,741
1	25	1,804	1,985	44,753
1,2	20	1,886	1,450	34,181
1,4	15	1,948	0,984	23,958
1,6	12	1,992	0,639	15,899
1,8	8	2,02	0,330	8,335
2	3	2,03	0,087	2,213
2,1	0	2,149	0,000	0,000

La contrainte de traction est maximale à la hauteur de 20 cm de la coupole inférieure ($\sigma_{trac}=71,672T/m^3=0,717MPa$). Par ailleurs, cette contrainte est supérieure à la contrainte de calcul de traction par flexion du composite à 3% de paille ($\sigma_{trac,Cal}=0,468MPa$). Il faudra alors redimensionner le grenier communautaire.

En jouant sur les paramètres fixe que sont H (hauteur de la coupole inférieure) et r_1 (rayon de base de la coupole inférieure) ; nous obtenons pour $H=1,80m$ et pour $r_1=0,65m$ une nouvelle distribution de la contrainte de traction dont la valeur maximale se trouve cette fois-ci à la hauteur $z=0,4m$ et est égale à $0,457MPa$ qui est bien inférieure à la contrainte de calcul (confère tableau des valeurs en Annexe XXIII). Alors, ces nouvelles dimensions peuvent être retenues pour la suite de notre vérification de résistance mécanique.

b. Contrainte de compression engendrée par le poids de la partie supérieure à la cote z donnée

Cette contrainte nous est donnée par l'équation 8 :

$$P(z) = \Gamma_{par} * R_m * (\theta_z - \theta_H)$$

La densité apparente moyenne du composite à 3% de paille s'exprime par :

$$\Gamma_{par} = \frac{1}{1,03} * 1,09 + \frac{0,03}{1,03} * 0,036 = 1,059T/m^3$$

Pour prendre en compte le poids de la coupole supérieure qui fait la moitié de la coupole inférieure, nous convenons pour les calculs de prolonger la paroi de la coupole inférieure à une hauteur de $1,8m/2$; soit environ $1m$.

Ainsi, la construction géométrique nous donne pour $H=2,80\text{m}$, $\theta_H = -15^\circ$.

Alors, la distribution des contraintes pondérées de compression $P(z)$ le long de la hauteur de la coupole inférieure se présentent comme indiquée en Annexe XXIII.

La distribution des contraintes de compression nous donne une valeur maximale à la base de la coupole inférieure qui est de $4,541\text{T/m}^3$ soit $0,045\text{MPa}$.

La contrainte de calcul à la compression du composite à 3% de paille est :

$$P(z)_{\text{cal}} = 0,6 * 2,745\text{MPa} = 1,647\text{MPa} > P(z) ;$$

Alors la paroi du grenier pourra résister à la contrainte interne de compression.

Il faut noter que le rapport $\sigma_{\text{trac}}/P(z)$ fait 10,06 ; alors le grenier est sollicité 10 fois plus en traction qu'en compression.

6.2.3. Condition de rupture de la paroi du grenier

La rupture de tout point de notre grenier sera donc régie par les contraintes σ_{min} et σ_{max} qui nous sont données par les équations 9 et 10.

Des distributions des différentes contraintes σ_n , τ et $P(z)$ le long de la hauteur de la coupole inférieure nous déduisons celles des contraintes principales dans le tableau de l'Annexe XXIII

Le diamètre du cercle de Mohr : $D_{\text{Mohr}} = |\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}|$ a une valeur maximale à la hauteur de $0,4\text{m}$ et est égal à $0,044\text{MPa}$.

L'abscisse du centre du cercle correspondant est :

$$\sigma_{\text{mil}} = \frac{1}{2} * [\sigma_n \cos \theta + P(z)] = 3,07\text{T/m}^2 = 0,031\text{MPa}.$$

Nous avons alors pour notre cercle de Mohr :

$$|\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}| = 0,044\text{MPa} = 0,44 \text{ daN/cm}^2 = 0,44 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{mil}} = 0,031\text{MPa} = 0,31 \text{ daN/cm}^2 = 0,31 \text{ Kg/cm}^2$$

En se référant à la courbe intrinsèque de Coulomb pour le composite à 3% de paille, à l'abscisse $0,31 \text{ Kg/cm}^2$, l'ordonnée est de $1,1 \text{ Kg/cm}^2$; pendant que le rayon de notre cercle de Mohr est de $0,23 \text{ Kg/cm}^2$ qui est très inférieur à l'ordonnée de la droite intrinsèque de Coulomb (confère Annexe XXIV).

Alors le cercle ne coupe pas la courbe intrinsèque de Coulomb et nous sommes en face d'un équilibre surabondant.

Partie 4 : CONCLUSIONS, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Chapitre 7 : CONCLUSIONS GENERALES

Les trois préoccupations autour desquelles s'est focalisée notre approche conceptuelle étaient :

(i) Viser une amélioration de la résistance à la compression et/ou à la traction du matériau composite en jouant sur le pourcentage de la paille par rapport au sol argileux ; (ii) Identifier les paramètres à la rupture du matériau composite ; (iii) Définir les caractéristiques des différentes contraintes auxquelles sont soumises les parois de notre ouvrage.

La réponse à la première préoccupation nous a conduit à varier de façon empirique les pourcentages de paille en dessous des trois pourcent habituellement réalisé sur le terrain parce qu'en malaxant le test argileux + paille du composite à 3% au démarrage de nos essais, nous sommes dit que pour les tests où le pourcentage de paille serait encore plus grande, le serrage des particules du mélange risquerait d'être lâche. Alors nous avons retenu de réaliser en tout quatre composites différents à savoir le composite à 1,5%, à 2%, à 2,5% et à 3% de paille par rapport à la quantité de sol argileux. L'ensemble de ces composites ont été soumis aux essais de résistance, aux essais de chargement sur éprouvettes cylindriques et aux essais de cisaillement direct. Les résultats ont permis de constater que la composition de 2% de paille confère au matériau composite de meilleures caractéristiques en compression simple et au cisaillement direct. Mais sa résistance à la traction n'est pas meilleur que le composite à 3% de paille car jusqu'à ce pourcentage, cette résistance s'est accru de façon presque linéaire avec l'augmentation de la paille. Il faudra alors envisager de voir jusqu'à quel pourcentage de paille cette résistance à la traction va continuer de croître.

La deuxième préoccupation nous a amené d'abord à rechercher le module d'élasticité et le coefficient de poisson des matériaux composites secs. Les essais de chargement progressif sur éprouvettes cylindriques et l'enregistrement des déformations longitudinales nous ont permis de tracer les courbes contrainte-déformation de tous les composites. Ces différentes courbes n'ont pas présentées une allure linéaire dans le domaine des petites déformations. Alors notre matériau composite n'a pas présenté un comportement élastique linéaire ; encore qu'il faille envisager de mener d'autres essais pour voir si le matériau présente un comportement élastique mais non linéaire. Ne pouvant pas appliquer les théories linéaires de calcul de structure aux parois de nos greniers, nous avons alors opté de dimensionner nos parois à la rupture. L'essai de cisaillement s'est apparu alors nécessaire pour déterminer la cohésion C et de l'angle de

frottement interne ϕ du composite sec. Cet essai réalisé sur les différents composites nous a révélé que le composite à 2% de paille présente de meilleures caractéristiques mécaniques (C , ϕ). Cela a confirmé la meilleure résistance à la compression présentée par le même composite. La détermination des différentes contraintes auxquelles la paroi de notre grenier est soumise nous a conduits à assimiler le contenu de notre silo (grenier) à un sol puis à appliquer la mécanique des sols avec la théorie de calcul à la rupture. Les différents calculs menés sur le grenier communautaire ont révélé que le grenier est soumis près de dix fois à la traction qu'à la compression. Cette grande contrainte à la traction nous a amené à redimensionner notre grenier communautaire. Par ailleurs, le mode de rupture de la paroi du grenier redimensionné est en équilibre surabondant.

Il importe de remarquer que dans le domaine des greniers en terre au Bénin, le calcul de la structure de ces ouvrages n'a été encore abordé par le passé. Notre thème d'étude a attiré l'attention des professionnels de l'INRAB qui est l'institut intervenant le plus dans l'appui des paysans constructeurs des greniers en terre au Nord-Bénin. Les autorités de cet institut ont promis instaurer un réel dialogue avec nous pour l'utilisation des résultats de nos recherches en vue de la recherche de financement pour lutter contre l'insécurité alimentaire au nord du Bénin.

Chapitre 8 : *RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES*

A l'issue de nos recherches, de nouveaux questionnements ont retenus notre attention. Ainsi, les recommandations et perspectives s'énoncent en ce qui suit :

- Utiliser les résultats des calculs à la rupture pour vérifier l'état de sollicitation des greniers actuels de la zone d'étude ;
- Poursuivre les études relatives au caractère élastique ou non du comportement du matériau composite des greniers en terre ;
- Faire varier le pourcentage de paille du composite au-delà de 3% pour apprécier l'augmentation de la contrainte de traction en fonction de cette évolution ;
- Approfondir les études en vue de déterminer la quantité optimum de paille en rapport avec la décroissance du taux de résistance à la compression lorsque le pourcentage de paille augmente d'une part et d'autre part la diminution des performances mécaniques dues à la cohésion C et à l'angle de frottement interne ϕ du composite quant le taux de paille augmente alors que ce même taux fait croître la résistance en traction ;
- Utiliser cet optimum de paille en traction (combinée avec la résistance en compression et la performance mécanique due à C et ϕ désirées) dans la construction des greniers en terre en vue d'obtenir dans la zone d'étude des ouvrages de plus grande résistance mécanique ;
- Envisager la construction d'un grenier expérimental avant l'application des résultats au niveau des paysans.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

CENTRE NATIONAL D'ESSAIS ET DE RECHERCHES DES TRAVAUX PUBLICS (CNERTP). (1993), Recherche sur les greniers en terre au Bénin, Projet BEN 87 / 017 " Système de stockage décentralisé".

CENTRE NATIONAL D'ESSAIS ET DE RECHERCHES DES TRAVAUX PUBLICS (CNERTP). (1998), Rapport CNERTP Dr 93007R1, Recherche sur les greniers en terre dans les départements de l'Atacora, du Borgou, du Mono et de l'Ouémé., Cotonou, Bénin, FAO/PNUD, Projet BEN 87 / 017 " Système de stockage décentralisé".

CENTRE NATIONAL D'ESSAIS ET DE RECHERCHES DES TRAVAUX PUBLICS (CNERTP). (2000), Essais de laboratoire sur échantillons de terre de termitière prélevés dans le départements du Mono, du Zou et de l'Ouémé., Compte Rendu d'Essais Dr 00051ML1 Septembre 2000, Cotonou, Bénin, INRAB, 9p.

Costet J. et Sanglerat G. (1975), Cours pratique de mécanique des sols : plasticité et calcul des tassements, Poitier, France, Bordas, deuxième édition, 263P.

Dreux G. (1970), Guide pratique du béton, Paris, France, Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publics, 257p.

Diop A. (1997), Manuel de référence pour techniciens spécialisés, Technologie post-récolte et commercialisation des produits vivriers, ADA Experts-Coneils Québec, Canada

Gabriel N. (1999), Identification du Programme de Développement Local au Bénin. Atelier de validation du Rapport d'Identification, Résumé du Rapport d'Identification Djougou, 15-17 Décembre 1999.

Gwinner J., Harnisch R., Mück O. (1990), Manuel sur la manutention et la conservation des grains après récolte, GTZ, Eschborn.

Idrissou M. M. (2000), La problématique du dimensionnement des ouvrages de stockage et de conservation des grains en pays tropicaux. Mémoire de Fin d'Etude, Génie Civil / Collège Polytechnique Universitaire, Abomey-Calavi, Bénin, 140p.

Ambarka I. (2002), Etude des ouvrages de stockage de type traditionnel des produits vivriers dans le Département de la Donga . Mémoire de Fin d'Etude, Génie Civil / Collège Polytechnique Universitaire, Abomey-Calavi, Bénin, 108p.

Kossou D.K., Aho N. (1993), Stockage et conservation des grains alimentaires tropicaux : Principe et pratique. Les Editions du Flamboyant.

Nouroudine T. (1992), Tata Somba : Richesse et importance pour une amélioration de l'habitat local. Mémoire de fin d'étude, Architecture, EAMAU de Lomé, Togo, 103p.

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE (FAO). (1993), Fiche Technique N° 3 : Construction et utilisation du grenier fermé en terre pour le stockage des céréales au Bénin, Projet BEN / 87 / 017 " Système de stockage décentralisé".

Pissarenko G., Yakovlev A., Matvéev V. (1979), Aide mémoire de Résistance des matériaux, Edition Mir Moscou.

PROGRAMME DE TECHNOLOGIES AGRICOLES ET ALIMENTAIRE (PTAA), (1997), Rapport d'étude, Voyage d'étude au Mali et au Burkina Faso sur la recherche et le développement de système post-récolte, PTAA, mai 1997.

Fandohan P. (2000), Rapport technique de recherche : Introduction du grenier fermé en terre au Sud-Bénin pour le stockage du maïs, PTAA mai 2000, 28p.

PROGRAMME DE TECHNOLOGIES AGRICOLES ET ALIMENTAIRE (PTAA),
(2001), Formation des producteurs sur la construction des greniers améliorés en terre fermes à Serrou (sous préfecture de Sinendé), Rapport de formation, PTAA, 7p.

Fandohan P. (2010), Fiche Technique : Guide pratique de construction et d'utilisation du Grenier en terre amélioré pour le stockage du maïs, Cotnou, Bénin, ONG Louvain Coopération au Développement, 35p.

ANNEXES

Annexe I : Quantités nécessaires pour moulage d'éprouvettes prismatiques des composites de 2%, 2,5% et 3%	55
Annexe II : Tableaux des valeurs des essais Proctor Modifiés des différents composites	55
Annexe III : Courbes Proctor modifiés des différents composites.....	55
Annexe IV : Table des références des briquettes cylindriques des différents composites	55
Annexe V : Tableau des valeurs des charges à la compression simple sur éprouvettes cylindriques	55
Annexe VI: tableau des valeurs des charges à la traction par fendage sur éprouvettes cylindriques	55
Annexe VII : Table des références des séries d'éprouvettes prismatiques de tous les composites.....	55
Annexe VIII : Valeurs des charges de rupture à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques	55
Annexe IX : Valeurs des charges de rupture à la compression simple sur éprouvettes prismatiques	55
Annexe X : Dispositif de fixation des comparateurs transversaux	55
Annexe XI : Model de fiche d'enregistrement pour essais de chargement sur éprouvettes cylindriques	55
Annexe XII : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 1,5% de paille.....	55
Annexe XIII : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 2% de paille.....	55
Annexe XIV : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 2,5% de paille	55
Annexe XV : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 3% de paille.....	55
Annexe XVI : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 1,5% de paille à 28 jours.....	55
Annexe XVII : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 2% de paille à 28 jours.....	55
Annexe XVIII : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 2,5% de paille à 28 jours	55

Annexe XIX : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement direct sur composite à 3% de paille à 28 jours	55
Annexe XX : Abaque de Plasticité de Casagrande pour la classification des sols	55
Annexe XXI : Abaque USCS pour la classification des sols grenus	55
Annexe XXII : Schématisation de la coupole inférieure et Tableau des valeurs de θ et de $R(z)$ en fonction de la hauteur	55
Annexe XXIII : Résultats du dimensionnement de la coupole inférieure.....	55
Annexe XXIV : Cercle de Mohr sur la courbe intrinsèque de Coulomb du composite à 3% de paille à 28 jours	55

Annexe I : Quantités nécessaires pour moulage d'éprouvettes prismatiques des composites de 2%, 2,5% et 3%**Série de briquettes à 2% de paille par rapport au sol argileux**

Les quantités nécessaires pour mouler chaque briquette prismatique de ce composite sont respectivement de :

- 455,44 grammes de sol argileux ;
- 9,11 grammes de pailles hachée ;
- 27,33 grammes de fusion de néré ;
- 39,27 grammes d'eau de gâchage.

Série de briquettes à 2,5% de paille par rapport au sol argileux

Les quantités nécessaires pour mouler chaque briquette prismatique sont respectivement de :

- 435,80 grammes de sol argileux ;
- 10,90 grammes de pailles hachée ;
- 26,16 grammes de fusion de néré ;
- 33,40 grammes d'eau de gâchage.

Série de briquettes à 3% de paille par rapport au sol argileux

Les quantités nécessaires pour mouler chaque briquette prismatique sont respectivement de :

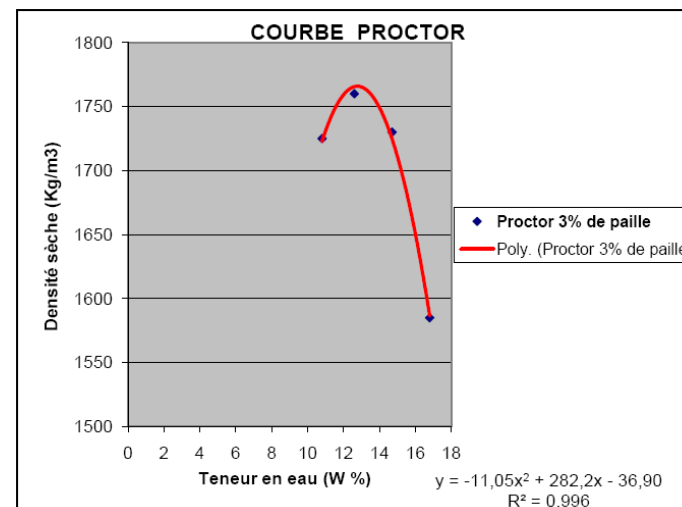
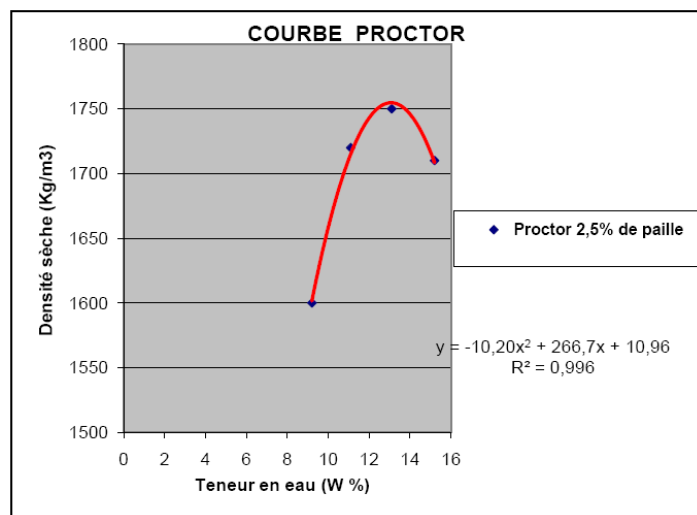
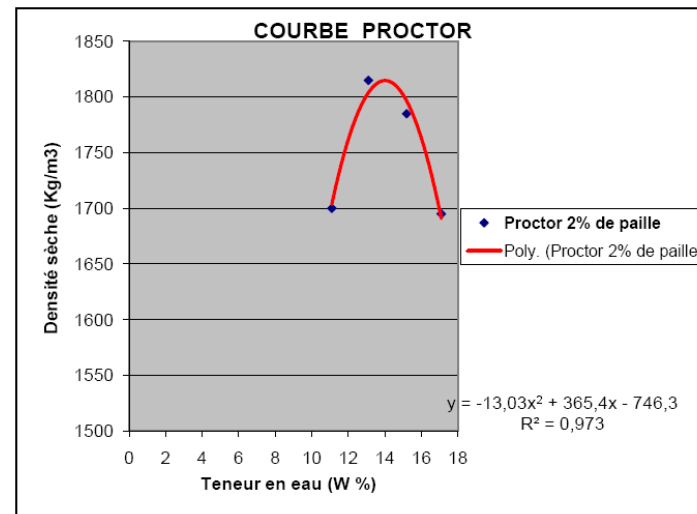
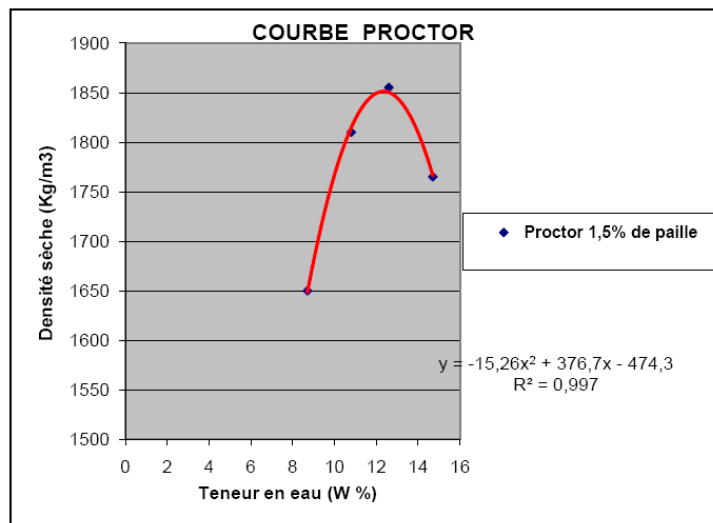
- 438,64 grammes de sol argileux ;
- 13,16 grammes de pailles hachée ;
- 26,32 grammes de fusion de néré ;
- 33,00 grammes d'eau de gâchage.

Annexe II : Tableaux des valeurs des essais Proctor Modifiés des différents composites

Date des opérations : 22/03/2010									
Composites		1,5% de paille				3% de paille			
Eau de mouillage		4%	6%	8%	2%	4%	6%	8%	10%
Poids moule + échantillon humide (g) : Pt		7838	8025	7878	7392	7638	7795	7790	7512
Poids moule (g) : Pm		3620	3620	3620	3620	3620	3620	3620	3620
Poids échantillon humide (g) : P= Pt-Pm		4218	4405	4258	3772	4018	4175	4170	3892
Volume moule (cm3) : V		2104	2104	2104	2104	2104	2104	2104	2104
Densité Humide (g /cm3) : $\gamma_h = P/V$		2,005	2,09	2,025	1,79	1,91	1,984	1,982	1,85
Teneur en eau	Poids humide (g) : Ph	500	500	500	500	500	500	500	500
	Poids sec (g) : Ps	451	444	436	460	451	444	436	428
	Poids eau (g) : Pe = Ph – Ps	49	56	64	40	49	56	64	72
	Teneur en eau (%) : $W = (Pe /Ps) \times 100$	10,8	12,6	14,7	8,7	10,8	12,6	14,7	16,8
Densité sèche (g/cm3) : $\gamma_d = 100Dh / (100 + W)$		1,810	1,855	1,765	1,650	1,725	1,760	1,730	1,585

Date des opérations : 23/03/2010									
Composites		2% de paille				2,5% de paille			
Eau de mouillage		4%	6%	8%	10%	2%	4%	6%	8%
Poids moule + échantillon humide (g) : Pt		7600	7940	7946	7800	7295	7640	7780	7765
Poids moule (g) : Pm		3620	3620	3620	3620	3620	3620	3620	3620
Poids échantillon humide (g) : P= Pt-Pm		3980	4320	4326	4180	3675	4020	4160	4145
Volume moule (cm3) : V		2104	2104	2104	2104	2104	2104	2104	2104
Densité Humide (g /cm3) : $\gamma_h = P/V$		1,89	2,053	2,056	1,986	1,746	1,91	1,977	1,97
Teneur en eau	Poids humide (g) : Ph	500	500	500	500	500	500	500	500
	Poids sec (g) : Ps	450	442	434	427	458	450	442	434
	Poids eau (g) : Pe = Ph – Ps	50	58	66	73	42	50	58	66
	Teneur en eau (%) : $W = (Pe /Ps) \times 100$	11,1	13,1	15,2	17,1	9,2	11,1	13,1	15,2
Densité sèche (g/cm3) : $\gamma_d = 100Dh / (100 + W)$		1,700	1,815	1,785	1,695	1,600	1,720	1,750	1,710

Annexe III : Courbes Proctor modifiées des différents composites



Annexe IV : Table des références des briquettes cylindriques des différents composites

date	Composite : 1,5% de paille			date	Composite : 2% de paille			date	Composite : 2,5% de paille			date	Composite : 3% de paille		
	N°	Poids (g)	Hauteur (cm)		N°	Poids (g)	Hauteur (cm)		N°	Poids (g)	Hauteur (cm)		N°	Poids (g)	Hauteur (cm)
24/03/2010	B1	3260	20,4	26/03/2010	C1	3215	20,3	27/03/2010	D1	3090	19,7	25/03/2010	A1	3075	19,6
	B2	3250	20,3		C2	3215	20,1		D2	3085	19,4		A2	3080	19,7
	B3	3255	20,3		C3	3210	19,9		D3	3100	20,0		A3	3085	19,6
	B4	3260	20,2		C4	3215	20,0		D4	3090	19,4		A4	3090	19,7
	B5	3260	19,9		C5	3205	19,8		D5	3095	19,2		A5	3085	19,4
	B6	3265	20,0		C6	3205	19,8		D6	3095	19,4		A6	3090	19,7
	B7	3255	20,2		C7	3200	19,7		D7	3090	19,3		A7	3085	19,6
	B8	3250	19,9		C8	3210	19,8		D8	3095	19,5		A8	3085	19,5
	B9	3245	19,7		C9	3200	19,7		D9	3090	19,2		A9	3090	19,9
	B10	3255	19,9		C10	3195	19,7		D10	3090	19,6		A10	3085	20,2
	B11	3260	19,8		C11	3205	19,8		D11	3095	19,0		A11	3085	20,1
	B12	3270	19,8		C12	3200	19,7		D12	3090	19,2		A12	3085	20,1
	B13	3265	19,7		C13	3205	19,8		D13	3100	19,4		A13	3090	19,8
	B14	3265	19,7		C14	3205	19,9		D14	3090	19,6		A14	3090	19,8
	B15	3255	19,8		C15	3205	19,9		D15	3090	19,3		A15	3080	19,8
	B16	3265	19,9		C16	3200	19,9		D16	3090	19,2		A16	3085	19,7
	B17	3260	19,9		C17	3200	19,8		D17	3095	19,4		A17	3090	19,8
	B18	3260	19,8		C18	3210	20,0		D18	3080	19,5		A18	3090	19,7
31/03/2010	B1'	3250	20,0	01/04/2010	C1'	3215	19,8	01/04/2010	D1'	3085	19,6	01/04/2010	A1'	3080	19,9
	B2'	3240	19,8		C2'	3210	19,8		D2'	3090	19,4		A2'	3075	19,8
	B3'	3265	20,0		C3'	3200	20,0		D3'	3095	19,5		A3'	3070	19,9
	B4'	3260	19,9		C4'	3200	20,0		D4'	3085	19,8		A4'	3075	19,8
	B5'	3245	19,8		C5'	3205	19,9		D5'	3085	19,9		A5'	3080	19,8
	B6'	3245	19,9		C6'	3200	19,8		D6'	3085	19,9		A6'	3075	19,8
	B7'	3250	19,8		C7'	3205	19,9		D7'	3085	19,6		A7'	3065	19,8

Annexe V : Tableau des valeurs des charges à la compression simple sur éprouvettes cylindriques

Composite	N° épreuve	Date de confection	Date d'écrasement	Charges de rupture à la compression (kg)	Charge Moyenne par composite (kg)
1,5% de paille	B4	24/03/2010	21/04/2010	1850	1800
	B9			1750	
	B6			1800	
	B6'	31/03/2010	28/04/2010	1800	
2% de paille	C4	26/03/2010	23/04/2010	2100	2200
	C8			2250	
	C14			2250	
	C7'	01/04/2010	29/04/2010	2200	
2,5% de paille	D5	27/03/2010	24/04/2010	2050	2000
	D7			2000	
	D17			1950	
	D6'	01/04/2010	29/04/2010	2000	
3% de paille	A1	25/03/2010	22/04/2010	1590	1460
	A7			1370	
	A16			1480	
	A6'	31/03/2010	28/04/2010	1400	

Annexe VI: tableau des valeurs des charges à la traction par fendage sur éprouvettes cylindriques

Composite	N° éprouvette	Date de confection	Date d'écrasement	Charges de rupture à la traction (kg)	Hauteur éprouvette (mm)
1,5% de paille	B13	24/03/2010	21/04/2010	1500	197
	B2			1350	203
	B11	31/03/2010	28/04/2010	1400	198
	B5'			1450	198
2% de paille	C2	26/03/2010	23/04/2010	1530	201
	C10			1540	197
	C13	01/04/2010	29/04/2010	1510	198
	C5'			1550	199
2,5% de paille	D1	27/03/2010	24/04/2010	1780	197
	D11			1700	190
	D13	01/04/2010	29/04/2010	1710	194
	D7'			1700	196
3% de paille	A9	25/03/2010	22/04/2010	1780	199
	A10			1830	202
	A14	31/03/2010	28/04/2010	1840	198
	A7'			1850	198

Annexe VII : Table des références des séries d'éprouvettes prismatiques de tous les composites

Date de confection	Composite	N° série	Poids (grammes)
14/04/2010	1,5% de paille	B20	1496,9
		B30	1504,1
	2% de paille	C20	1463,3
		C30	1508,4
13/04/2010	2,5% de paille	D20	1395,1
		D30	1390,3
	3% de paille	A20	1271,1
		A30	1349,6

Annexe VIII : Valeurs des charges de rupture à la traction par flexion sur éprouvettes prismatiques

Composite	N° éprouvette	Poids(g)	Date de confection	Date d'écrasement	Charges de rupture à la traction par flexion(N)	Charge Moyenne par composite (N)
1,5% de paille	B20-01	447,8	14/04/2010	12/05/2010	250	216,66
	B20-02	437,6			250	
	B20-03	441,2			200	
	B30-01	448,1			200	
	B30-02	433,8			200	
	B30-03	451,0			200	
2% de paille	C20-01	427,3	14/04/2010	12/05/2010	250	275
	C20-02	435,7			300	
	C20-03	427,8			300	
	C30-01	451,3			250	
	C30-02	443,2			300	
	C30-03	436,1			250	
2,5% de paille	D20-01	396,8	13/04/2010	11/05/2010	300	316,66
	D20-02	431,5			200	
	D20-03	402,0			400	
	D30-01	411,7			300	
	D30-02	407,0			350	
	D30-03	407,4			350	
3% de paille	A20-01	361,5	13/04/2010	11/05/2010	350	350
	A20-02	364,2			350	
	A20-03	396,4			400	
	A30-01	393,5			350	
	A30-02	405,1			300	
	A30-03	393,0			350	

Annexe IX : Valeurs des charges de rupture à la compression simple sur éprouvettes prismatiques

Composite	N° éprouvette	Poids(g)	Date de confection	Date d'écrasement	Couples des Charges à la rupture à la compression par éprouvette (N)	Charge Moyenne par composite (N)
1,5% de paille	B20-01	447,8	14/04/2010	12/05/2010	8000-9000	7166,66
	B20-02	437,6			6000-7000	
	B20-03	441,2			6000-6000	
	B30-01	448,1			6000-8000	
	B30-02	433,8			9000-8000	
	B30-03	451,0			6000-7000	
2% de paille	C20-01	427,3	14/04/2010	12/05/2010	8000-8000	8416,66
	C20-02	435,7			10000-9000	
	C20-03	427,8			9000-8000	
	C30-01	451,3			9000-9000	
	C30-02	443,2			8000-9000	
	C30-03	436,1			7000-7000	
2,5% de paille	D20-01	396,8	13/04/2010	11/05/2010	8000-5000	7166,66
	D20-02	431,5			5000-5000	
	D20-03	402,0			8000-11000	
	D30-01	411,7			7000-8000	
	D30-02	407,0			8000-6000	
	D30-03	407,4			7000-8000	
3% de paille	A20-01	361,5	13/04/2010	11/05/2010	8000-6000	6916,66
	A20-02	364,2			8000-6000	
	A20-03	396,4			5000-7000	
	A30-01	393,5			7000-8000	
	A30-02	405,1			7000-6000	
	A30-03	393,0			8000-7000	

Annexe X : Dispositif de fixation des comparateurs transversaux



Annexe XI : Model de fiche d'enregistrement pour essais de chargement sur éprouvettes cylindriques

ESSAI DE CHARGEMENT SUR EPROUVETTE CYLINDRIQUE						
Date de l'essai :						
Composite :						
N° éprouvette :						
hauteur (cm)	charges(Kg)	Lectures des comparateurs (0,01mm)				
		Comp Longitudinal	Comp Trans G1	Comp trans G2	Comp trans D1	Comp Trans D2
	100					
	200					
	300					
	400					
	500					
	600					
	700					
	800					
	900					
	1000					

Annexe XII : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 1,5% de paille

N éprouvette	Hauteur (cm)	Coefficient de poisson
B8	19,9	0,291
B5	19,9	0,508
B3	20,3	0,526
B15	19,8	0,552
B12	19,8	0,891
B14	19,7	0,682
B18	19,8	0,499
B16	19,9	0,285
B17	19,9	0,970
B1'	20,0	0,336
B2'	19,8	0,409
B3'	20,0	0,476
B4'	19,9	0,376
B7'	19,8	0,467

Annexe XIII : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 2% de paille

N éprouvette	Hauteur (cm)	Coefficient de poisson
C7	19,8	0,226
C6	19,8	0,252
C5	19,8	0,219
C3	19,9	0,552
C 1	20,3	0,638
C17	19,8	0,165
C16	19,9	0,376
C15	19,9	0,236
C12	19,7	0,273
C11	19,8	0,155
C9	19,7	0,321
C1'	19,8	0,591
C2'	19,8	0,716
C3'	20,0	0,473
C4'	20,0	0,462
C6'	19,8	0,314

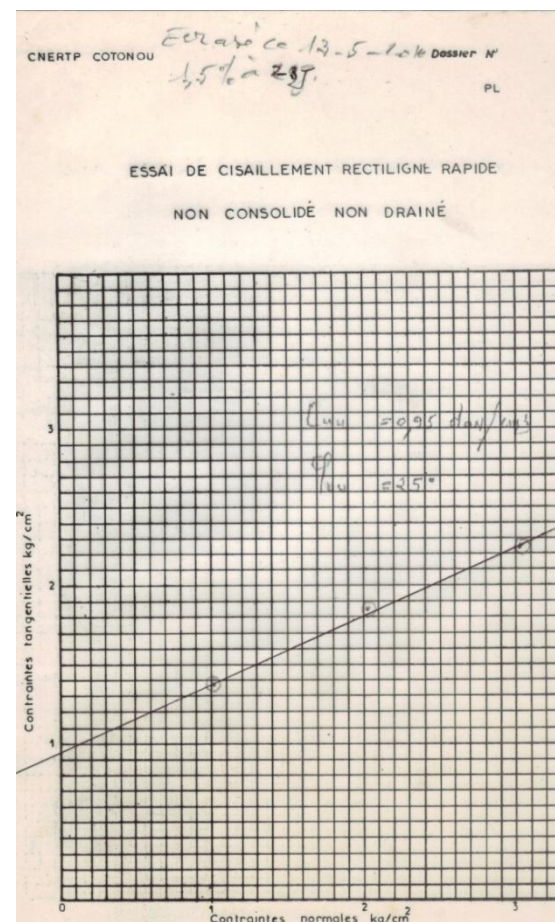
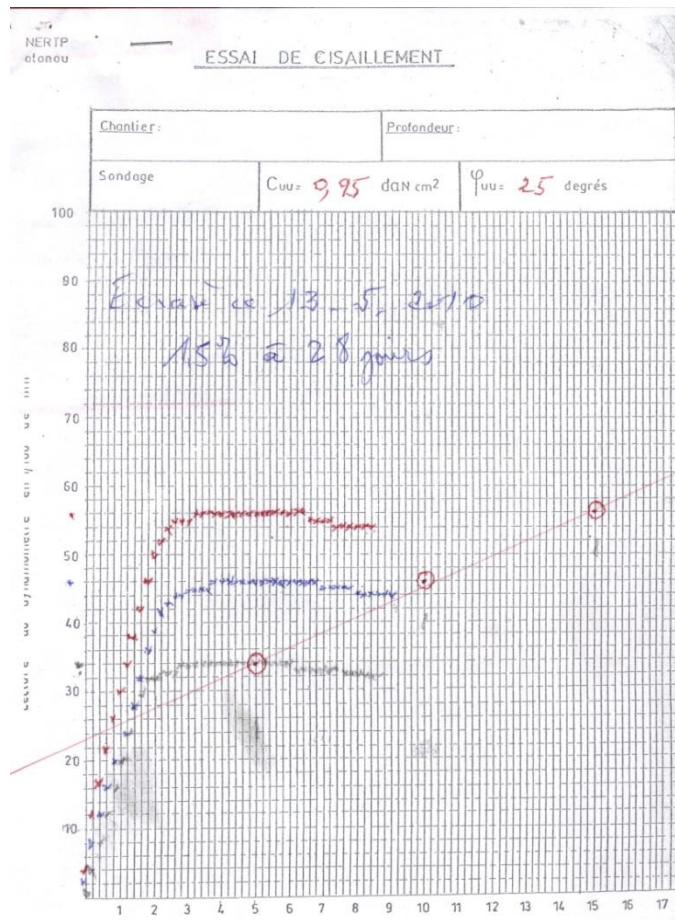
Annexe XIV : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 2,5% de paille

N éprouvette	Hauteur (cm)	Coefficient de poisson
D16	19,2	0,313
D15	19,3	0,187
D14	19,6	0,246
D12	19,2	0,220
D10	19,6	0,151
D9	19,2	0,249
D8	19,5	0,267
D6	19,4	0,691
D4	19,4	0,435
D3	20,2	0,197
D2	19,4	0,219
D5'	19,9	0,237
D4'	19,8	0,770
D2'	19,4	0,466
D3'	19,5	0,412
D1'	19,6	0,270

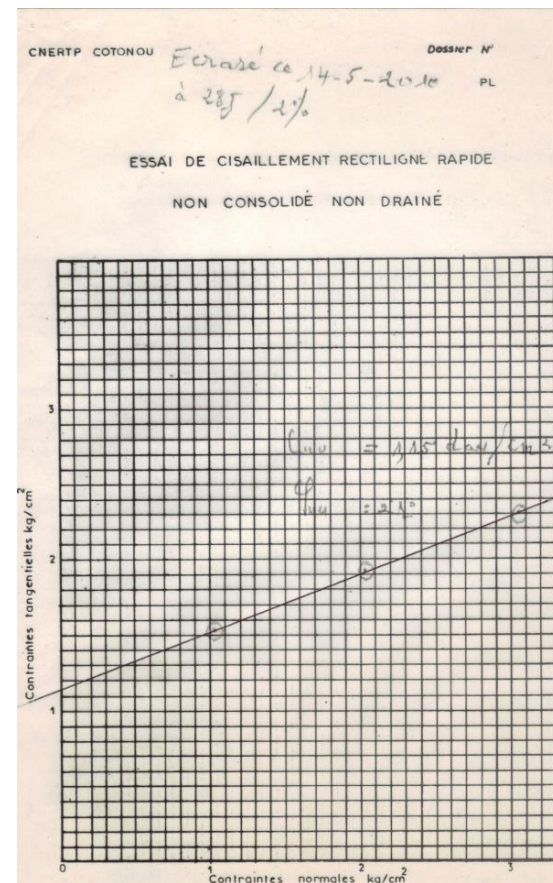
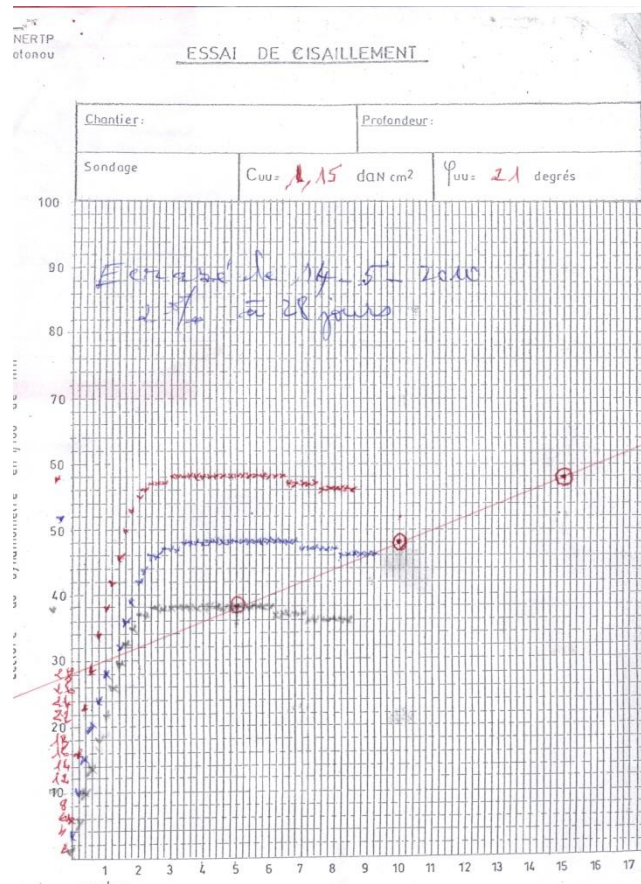
Annexe XV : Valeurs des coefficients de poisson des éprouvettes à 3% de paille

N éprouvette	Hauteur (cm)	Coefficient de poisson
A15	19,8	0,185
A12	20,1	0,304
A4	19,7	0,224
A3	19,6	0,275
A18	19,7	0,356
A13	19,8	0,270
A17	19,8	0,138
A11	20,1	0,210
A8	19,5	0,394
A6	19,7	0,181
A5	19,4	0,278
A2	19,7	0,130
A1'	19,9	0,534
A2'	19,8	0,708
A3'	19,9	0,403
A4'	19,8	0,362
A5'	19,8	0.600

Annexe XVI : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 1,5% de paille à 28 jours

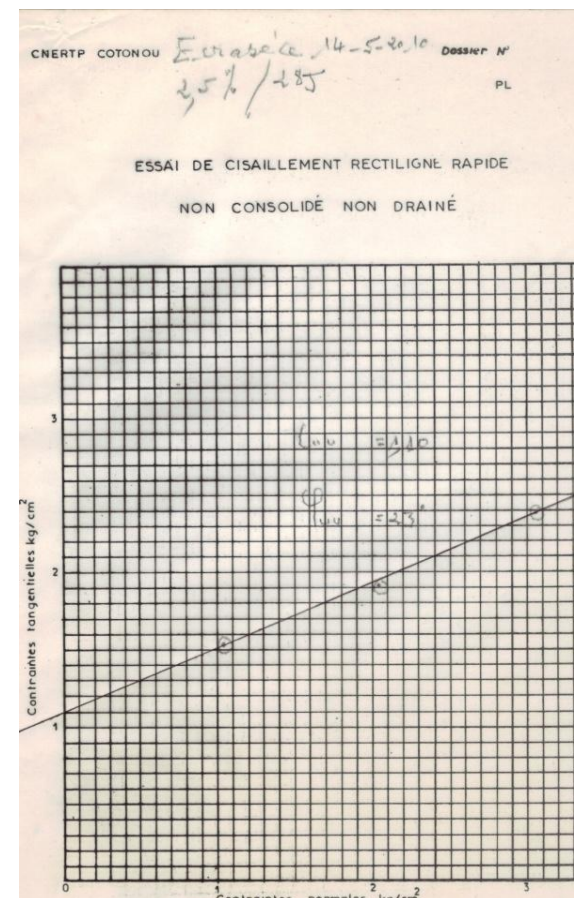
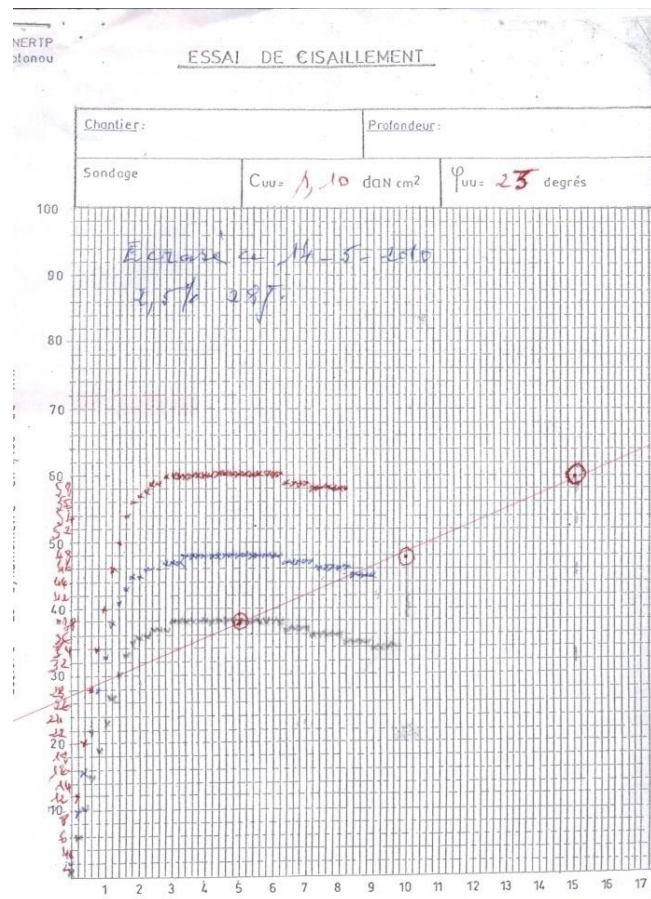


Annexe XVII : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 2% de paille à 28 jours

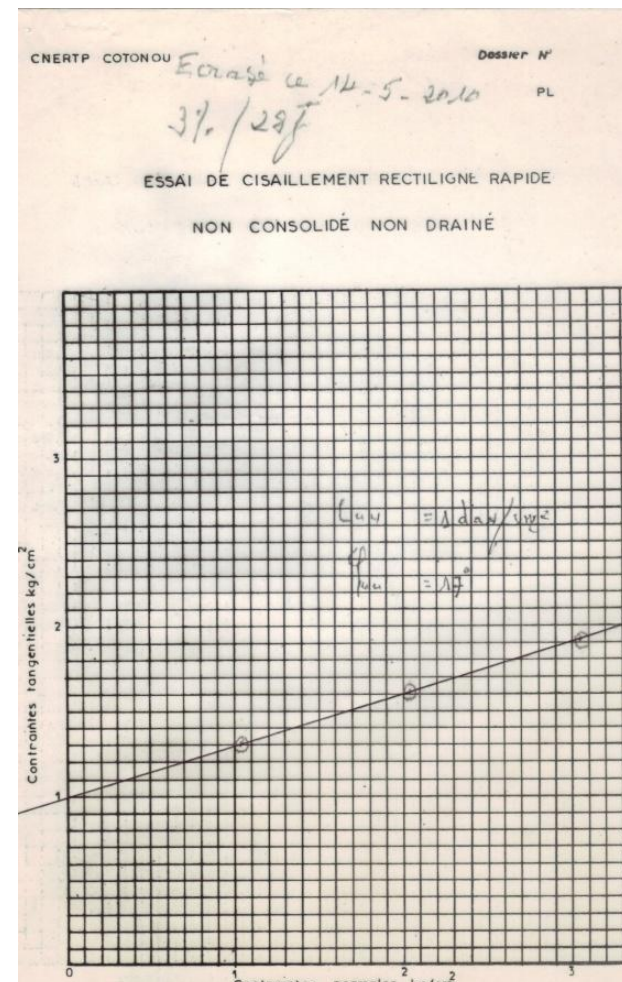
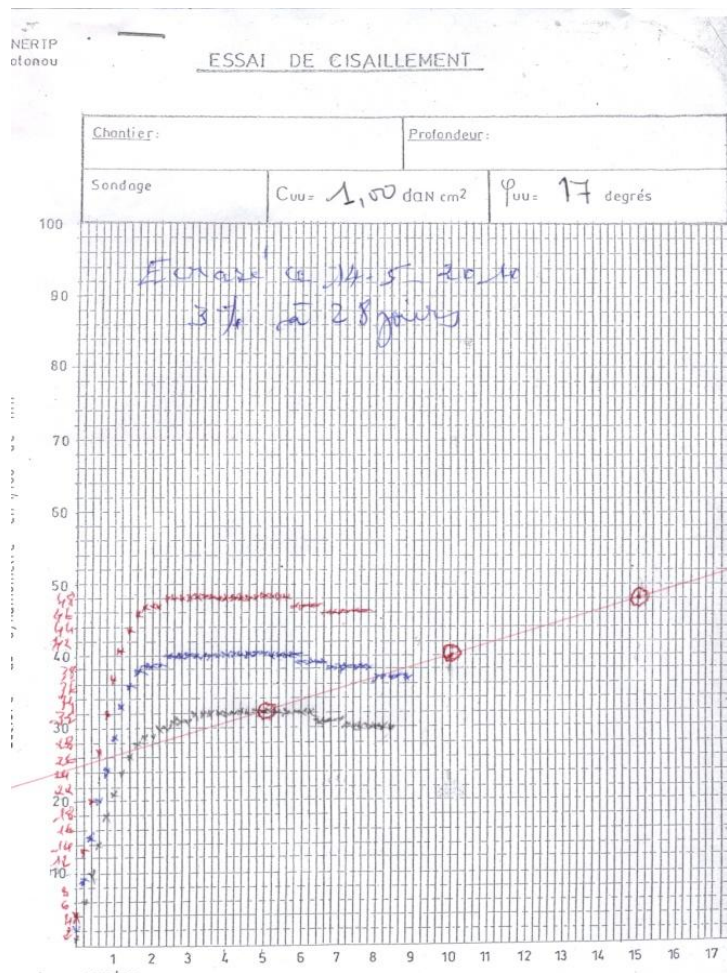


:

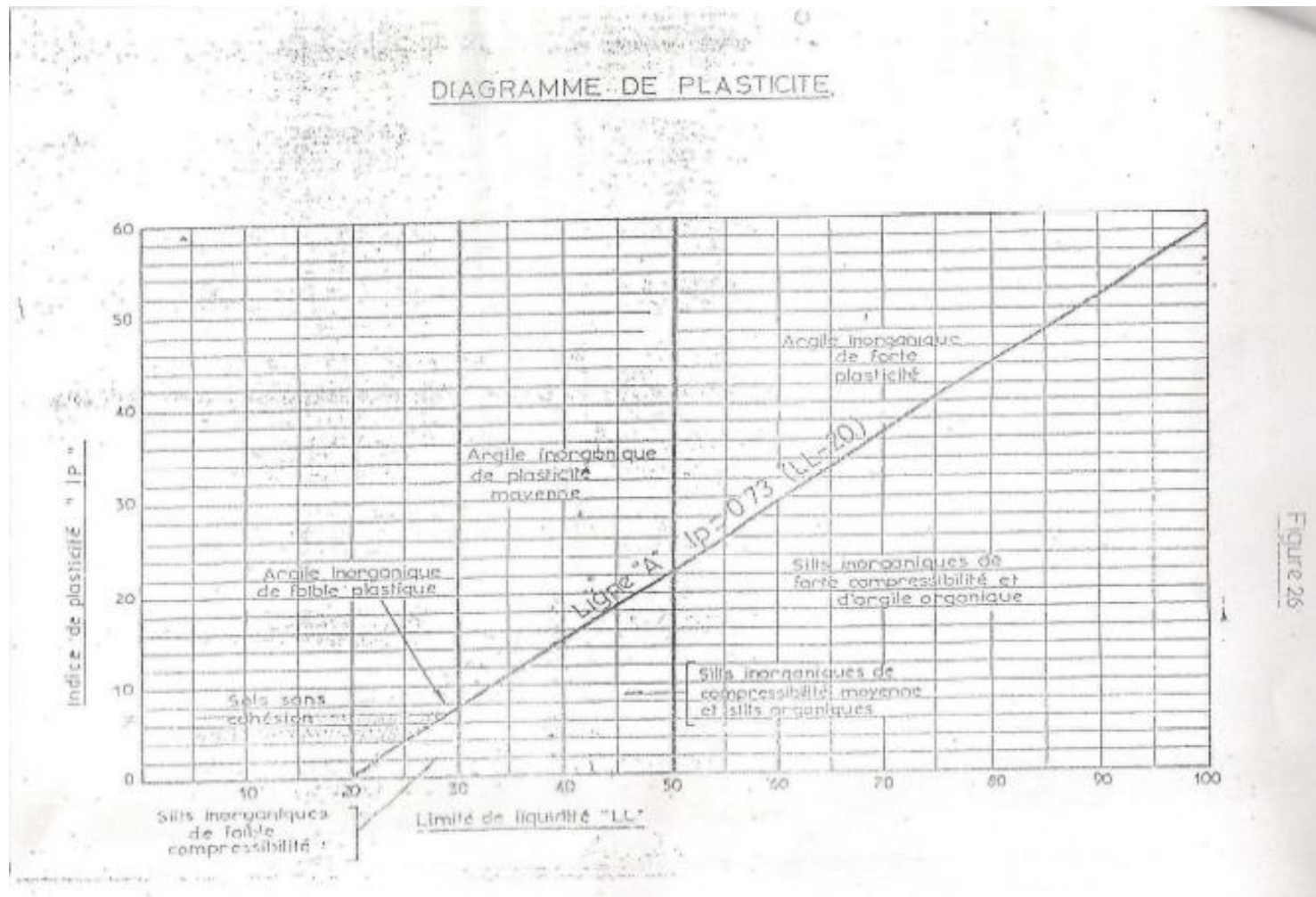
Annexe XVIII : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement sur composite à 2,5% de paille à 28 jours



Annexe XIX : Courbes des résultats de l'essai de cisaillement direct sur composite à 3% de paille à 28 jours



Annexe XX : Abaque de Plasticité de Casagrande pour la classification des sols



Annexe XXI : Abaque USCS pour la classification des sols grenus

CLASSIFICATION U.S.C.S.
DES SOLS GRENUS

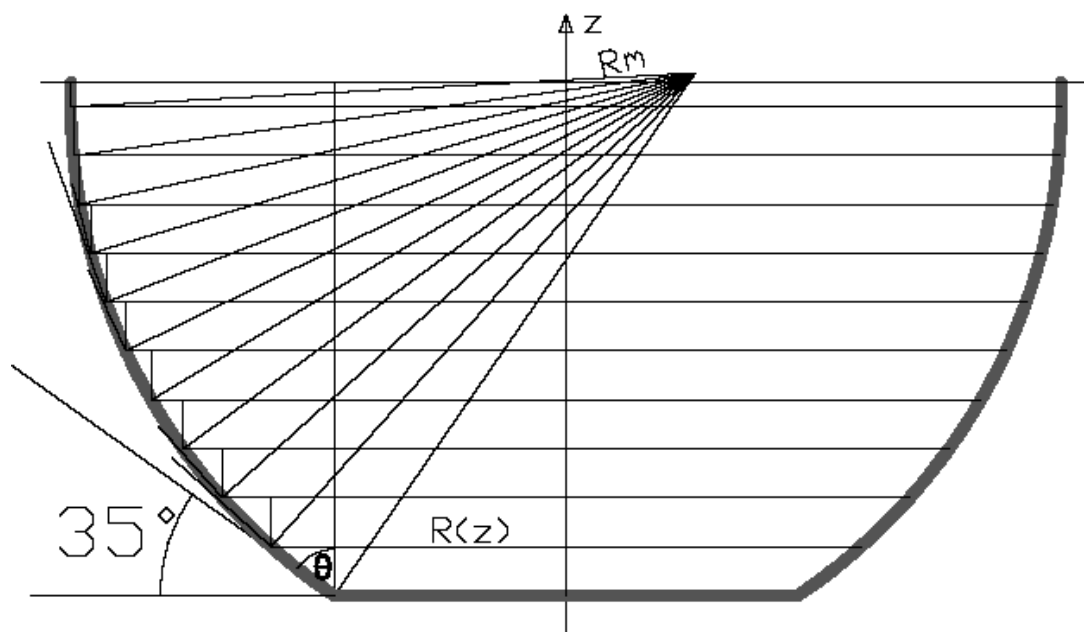
Tableau D

(Plus de 50% des éléments > 0,08mm)

	Graves	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	Plus de 5% d'éléments < 0,08mm	G b (GW)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Grave pro- pre bien graduée
			moins de 5%	G m (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave pro- pre mal graduée
			Plus de 12%	G L (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de "A"	Grave limoneuse
			d'éléments < 0,08mm	G A (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de "A"	Grave argileuse
Sables	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	Plus de 5% d'éléments < 0,08mm	moins de 5%	S b (SW)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable pro- pre bien gradué
				S m (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable pro- pre mal gradué
				S L (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de "A"	sable limoneux
				S A (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de "A"	sable argileux

5% < % inférieur à 0,08mm < 12% → on utilise un double symbole

Annexe XXII : Schématisation de la coupole inférieure et Tableau des valeurs de θ et de $R(z)$ en fonction de la hauteur



Hauteur z (cm)	Angle θ (°)	Rayon circconférentiel R (cm)
0	55	95
20	48	120,895
40	42	140,956
60	36	157,003
80	31	169,962
100	25	180,359
120	20	188,591
140	15	194,806
160	12	199,241
180	8	201,974
200	3	203,003
210	0	214,938

Annexe XXIII : Résultats du dimensionnement de la coupole inférieure

$z(m)$	$\theta(^{\circ})$	$R(z) (m)$	$\sigma_n(T/m^2)$	$\tau(T/m^2)$	$\sigma_{trac}(T/m^2)$	$P(z)(T/m^2)$	$\sigma_{max}(T/m^2)$	$\sigma_{min}(T/m^2)$	D_{Mohr}	σ_{mil}
0	55	0,65	4,736	1,709	38,484	4,541	5,470	1,692	3,778	3,629
0,2	48	0,909	3,994	2,021	45,379	4,087	5,451	1,239	4,213	3,380
0,4	42	1,11	3,291	2,124	45,656	3,698	5,226	0,858	4,369	3,072
0,6	36	1,27	2,615	2,105	41,509	3,309	4,843	0,524	4,319	2,712
0,8	31	1,4	2,018	1,938	35,311	2,984	4,329	0,320	4,009	2,357
1	25	1,504	1,443	1,710	27,135	2,595	3,708	0,124	3,583	1,952
1,2	20	1,586	0,967	1,372	19,163	2,271	3,035	0,058	2,977	1,589
1,4	15	1,648	0,562	0,967	11,582	1,946	2,333	0,050	2,283	1,245
1,6	12	1,692	0,255	0,498	5,402	1,752	1,753	0,100	1,653	1,001
1,8	8	1,72	0,000	0,000	0,000	1,492	1,329	0,000	1,329	0,746

Annexe XXIV : Cercle de Mohr sur la courbe intrinsèque de Coulomb du composite à 3% de paille à 28 jours

