

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Faculté De Technologie
Département Génie Civil
N° :



Domaine : Génie Civil
Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par : Mme Sarmouk Farida et Melle Chouiter Halima

THEME

CONSTRUCTION MODERNE EN BRIQUE DE TERRE CRUE

STABILISE ET COMPRIME :

DISPOSITIONS QUALITATIVES ET CONSTRUCTIVES

Application A Un Cas Pratique : M'sila-Algérie

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. Ben cheikh Mohamed

Université M'SILA Rapporteur

Mr. Rahmouni zine el Abidine

Université M'SILA Président

Mr. Bellagraa Larbi

Université M'SILA Examineur

Année universitaire 2019/2020

شكر

لله الحمد على توفيقه لنا لإنجاز هذا العمل المتواضع، على كل ما أُنعمه علينا من صحة وقدرة وصبر في هذه الأيام الصعبة حتى الوصول الى هذه المرحلة.

عميق شكري وامتناني للأستاذ المؤطر: البروفيسور محمد بن الشيخ الذي لم يدخر جهدا ووقتا لمساعدتنا وتوجيهنا وبذل المستطاع للتعويض عن العمل الميداني بالعمل الافتراضي حيث اجتهد أن جعل منه بديلا حقيقيا فلم يترك وسيلة إلا واتبعها حتى لا يغيب عن متابعة تفاصيل هذا البحث.

أوجه عميق شكري الى كافة أساتذة قسم الهندسة المدنية - وأخص بالذكر الأستاذ رحموني زين العابدين ابو جميع الطلبة.

كل الشكر لكل من ساهم في انجاز هذا العمل من قريب أو بعيد.

إهداء

إلى سندي وحببي والدي الكريمين

إلى أُمي الثانية التي منحتني حب وثقة الأم والصديقة خيرة

إلى صديقتي وأخي ورفيق عمري، إلى من شاركني عناء البحث ووقف شامخاً أمام

التحديات زوجي الكريم

إلى إخوتي وأخواتي

إلى زمرة القلب الواحد

أهدي هذا الجهد المتواضع

فريدة

إهداء

أهدي هذا العمل إلى أظبار حياتي، والديّ الأءزاء على تضحياتهم و تشجيعهم طوال هذه
السنوات الدراسية، لنصائهم وتوجيهاتهم في حياتي.

أبي احمد ووالدتي فضيلته.

إلى اخي الوحيد ورفيق دربي طارق (منور).

لجميع أولئك الذين شاركوا بشكل مباشر أو غير مباشر في تحقيق هذا المشروع.

علمية

Résumé

Les coûts énergétiques et environnementaux associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine.

Ce travail vise le développement de pratiques de construction durables, non seulement afin de se conformer aux objectifs actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour limiter la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, et apporter une nouvelle réponse au plan économique et social, à la production d'un habitat destiné aux populations les plus démunies,

La technologie du bloc de terre comprimée valorisant les matériaux locaux n'a pas failli à cette préoccupation.

Ce travail s'intéresse plus particulièrement au développement de ce domaine d'application en apportant les connaissances scientifiques nécessaires sur les Techniques constructives et la maçonnerie en blocs de terre stabilisé et comprimé pour vulgariser et amplifier d'avantage l'utilisation du matériau terre dans la construction, et rendre l'information nécessaire pour construire en succès.

Il s'est avéré que la nature du sol à stabiliser est très importante : les résistances à la compression à l'état sec, le comportement vis à vis le temps dépendent de type de sol et de ses constituant, essentiellement de kaolinite et la montmorillonite et de chlorite.

Les résultats sur les résistances à la compression et la tenue à l'eau ont montré que la cure humide est indispensable pour garantir l'efficacité des liants minéraux.

L'augmentation du taux de compression de la brique lors de sa fabrication, améliore de façon considérable l'efficacité de la stabilisation.

Pour la tenue à l'eau (résistance à la compression humide) et la durabilité (perte de masse par l'essai des cycles mouillage séchage) elle dépend essentiellement du type et du taux de stabilisation et du mode de cure (voir les critères de résistances minimales aux états sec et humide donnés par la norme française sur les BTC (*XP P 13-901, 2001, pp. 901-13*)).

Donc un choix très judicieux a été effectué de la terre après plusieurs essais de caractérisation, ou le sol rouge de Boukhmissa de la région de m'sila faisait le meilleur choix avec des caractéristiques adéquates donnant de très bons résultats en compression et en durabilité,

La brique a été formulée en utilisant 94% de terre et 6% en stabilisant et comprimé avec une pression de 400 Bars, les blocs ont été soumis à une cure à l'eau adaptée spécialement à ce travail.

Le projet consiste à construire des murs et une voûte puis évaluer leurs performances

Mots clés : construction durables, blocs de terre stabilisé et comprimé, compression, stabilisation, cure, maçonnerie.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Objectif et Problématique1	
I. CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE MEMOIRE.....	1
I.1 Introduction	1
I.2 Construction traditionnelle en terre crue	2
I.3 Construction modernes en terre crues	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1 Définition d'un bâtiment en terre « moderne ».....	3
I.3.2 Caractéristiques d'un bâtiment en terre «moderne»?	3
I.3.3 construction modernes en terre crues à travers le monde :	4
I.3.4 Exemples de construction modernes en terre crue dans le monde	8
I.3.5 Exemples De Constructions modernes En Terre Crue en Algérie	16
I.3.6 Histoire des techniques de construction en terre	19
I.3.7 Les Techniques De Construction En Terre Anciennes	23
I.3.8 Bloc de terre comprimée (BTC) :.....	27
I.3.9 Stabilisation:.....	30
I.4 Classification géotechnique des sols	41
I.4.1 Principe des classifications des sols	41
I.4.2 Classification triangulaire.....	42
I.4.3 Classification (LPC/USCS) des sols	43
I.4.4 Classification LPC modifiée	44
I.5 Etat Actuel de Recherche sur la Brique de Terre Compressée et Stabilisée (BTCS)	
155	
I.5.1 Durabilité de la BTCS dans les conditions de laboratoire et exposition en conditions climatiques. (Avec 4 types des stabilisants)	46
I.5.2 Effet du taux de stabilisation de la BTCS sur l'environnement.....	47
I.5.3 Propriétés Physico-chimique et Minéralogique	48

I.5.4	Effet de l'activation alcaline et des déchets des produits de constructions sur la stabilisation des BTCS (A4).....	49
I.5.5	Propriétés mécaniques des blocs de terre comprimés (A15).....	49
I.5.6	Essais de l'effet de l'environnement sur des murs en maçonnerie.....	50
I.5.7	Performance des blocs de terre stabilisés comprimés en milieu sulfaté	58
I.5.8	Etude des propriétés mécaniques des blocs de terre comprimés (Compression, Traction, Flexion).....	58
I.5.9	Effets des Fibres de banane sur la résistance à la compression de la brique de terre	60
I.6	Comparaison entre normes BTC : Résistance à La compression -Durabilité	62
I.7	Conclusion.....	65
II.	CHAPITRE II : CONTEXTE EXPERIMENTALES	68
II.1	Introduction :.....	68
II.2	Essais d'identifications de Sol :	68
II.2.1	Paramètres d'état	68
II.2.2	Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :.....	70
II.2.3	Limites d'Atterberg (NF P 94-051)	71
II.2.4	Essai Proctor NF P 94-0931	72
II.2.5	L'essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068)	73
II.3	Le stabilisant : Ciment :	74
II.4	L'adjuvant :	74
II.5	L'eau de gâchage :.....	74
II.6	Confection des blocs :	75
II.7	Essais de contrôle ou essai de caractérisation	76
II.7.1	Essais de résistances mécaniques	76
II.7.2	Essais de Durabilité.....	77
III.	CHAPITRE III : CONSTRUCTION EN BCTS	80
III.1	Introduction :.....	80

III.2	Choix de la methode de la construction :	80
III.2.1	Les règles générales de conception selon le RPA 2003 : (BELAZOUGUI, et al., 2003)	81
III.3	Constructions BTCS en maçonnerie porteuse chaînée selon le RPA2003 (BELAZOUGUI, et al., 2003).....	84
III.3.1	Principes architecturaux et concepts structuraux	84
III.3.2	Système de construction en maçonnerie porteuse chaînée.....	87
III.4	Prescriptions generales relatives à la conception des maçonneries selon le DTR C2-45 règles de conception et de calcul des maconneries	92
III.4.1	Conditions requises des matériaux de constitution	92
III.4.2	Caractéristiques techniques des matériaux.....	92
III.4.3	Conception des murs	92
III.4.4	Maçonneries utilisées en soubassement	95
III.4.5	Fondations	95
III.4.6	Dispositions constructives minimales	95
III.4.7	Epaisseur des murs	103
III.4.8	Prescriptions particulières	104
III.4.9	Règles de calcul.....	104
III.4.10	Méthode de calcul	109
III.4.11	Maçonnerie armée	113
III.4.12	Calcul des murs de contreventement.....	114
III.4.13	Exemple de calcul	115
III.5	La mise en oeuvre des betons de terre stabilisee selon les recommandations du CNIRIB	120
III.5.1	Conditions générales de conception.....	120
III.5.2	Mortier de hourdage	120
III.5.3	Montage des murs courants.....	120
III.5.4	Soubassements et bases des murs.....	122

III.5.5	Protection, badigeons et enduits.....	122
III.5.6	Fondations	123
III.5.7	Planchers	124
III.5.8	Les murs	125
III.5.9	Les chaînages et linteaux.....	128
III.5.10	Linteaux :.....	130
III.5.11	Plancher sur hérisson en BTS.....	130
III.5.12	Dispositions diverses.....	131
III.6	DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES	131
III.6.1	FONDATEMENTS ET SOUBASSEMENT.....	131
III.6.2	Appareillage	133
III.6.3	Formes des BTC.....	135
III.6.4	CALEPINAGE DES PLANS.....	136
III.6.5	Technique de mise en œuvre du BTC selon : L ATEX n°2588 CSTB.....	136
III.6.6	Construction des toitures en voutes.....	142
III.6.7	NOTIONS DE STABILITE.....	143
	CONCLUSION GENERALE.....	149

Introduction générale

Les coûts énergétiques et environnementaux associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine.

(GLAVIND, 2009,) estime que La production de béton s'élève à 1,5–3 tonnes par habitant et par an dans le monde industrialisé. Cela fait de l'industrie du béton, y compris de tous ses fournisseurs, un acteur majeur dans le secteur du bâtiment.

Alors que Pacheco-torgal((2014) trouve que l'industrie de la construction est responsable de l'épuisement de grandes quantités de ressources non renouvelables et de 30% des émissions de dioxyde de carbone. Ceci est particulièrement grave dans le contexte actuel du changement climatique causé par les émissions de dioxyde de carbone dans le monde.

Une maison abordable et durable est peut-être le rêve de chaque individu, mais plus qu'un rêve elle est une solution vitale pour sauver notre chère terre du changement climatique, de l'épuisement de sources naturelle et protéger notre environnement. Mais ça ne s'arrête pas là, la construction en terre fait retourner l'homme à retrouver ces origines et vivre en harmonie avec la nature et faire fin à cette Aliénation qui le tue de jour en jour.

Malgré l'utilisation de la terre comme matériau de construction depuis les âges préhistoriques à travers tout le globe, il semble aujourd'hui que ce matériau mérite une certaine réhabilitation ,il fut victime d'une part de la dépréciation subie par les architectes mineures et, d'autre part de son caractère instable, mais le monde finira par changer d'avis s'il se trouve faces à des solution technique et scientifiques aux problèmes de durabilité du béton de terre avec ce qu'il offre comme intérêt économique et environnemental sans oublier le confort sanitaire.

Les qualités architecturales des construction vernaculaires devront être retrouvées, on assiste au transfert des connaissances des artisans au profit des spécialiste qui tentent d'enregistrer les témoignages encore vivants de savoir-faire ancestraux. Après avoir mépriser ces technique modestes et ces savoir-faire, les chercheurs les remettent à l'honneur, les auréolent de la connaissance scientifique et les soumettent à l'expérimentation.

L'expérience Algérienne en construction de la terre reste très modeste et souffre d'un grand manque en normalisation qui nécessite de grands progrès.

Le travail justificatif sera long, il faudra beaucoup expérimenter et il faudra convaincre, le présent travail mais le pas dans ce sens, il s'intéresse plus particulièrement au développement de ce domaine d'application en apportant les connaissances scientifiques nécessaires sur les **Techniques constructives et la maçonnerie en blocs de terrestabilisé et comprimé sans oublier de faire face la normalisation** pour promouvoir, vulgariser et amplifier d'avantage l'utilisation du matériau terre

dans la **construction en Algérie et le monde entier** , et rendre l'**informationnécessaire** pour **construire en succès**.

Ce travail est mené dans le cadre du **projet PRFU** vise à valoriser la recherche menée dans le **laboratoire dedéveloppement des Géo matériaux (LDGM)** en se servant du campus de **l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila** comme un terrain d'expérimentation.

Ainsi, nous envisagerons de proposer les solutions les plus concluantes de cette étude comme matériaux de construction et la réalisation **d'un prototype de maison en terre sur le campus**.

Ce manuscrit de mémoire est divisé en **trois chapitres**.

Dans **le chapitre 1**, nous démarrerons par une présentation de l'état actuel de les construction en brique de terre crue BTCS dans le monde et en Algérie (constructions récentes et modernes), Bibliothèque, musée,..puis en orientant notre bibliographie surtout sur les recherches et les travaux menés sur la constructions en terre: stabilisation aux liants minéraux (ciment et chaux) , durabilité, Techniques constructives, Ceci nous permettra, dans un second temps, de dégager la problématique de notre étude.

Dans le chapitre 2, nous présenterons **le contexte expérimental de ce travail de mémoire** en présentant les matériaux et procédures utilisés dans ce mémoire. Ensuite, nous présenterons **les résultats des essais de caractérisation** qui nous permettront de finaliser les formulations des briques de terre crue stabilisées aux liants minéraux. Dans un premier temps, les caractéristiques chimique, minéralogique et géotechnique des deux terres utilisées dans le mémoire seront présentées.

Des résultats des essais mécaniques, de durabilité des matériaux développés.

La discussion des résultats portera sur les effets d'un certain nombre de paramètres : la quantité d'eau utilisé dans la fabrication, la densité sèche et humide, la cure par immersion dans l'eau ainsi que la qualité (ciment, chaux) et quantité (2, 6 et 10 %) de liants utilisés.

Le chapitre 3 portera sur les murs en maçonnerie et les voûtes, elle évoquera les questions suivantes :

Quelle sont leefforts appliqués au mur porteur en BTCS (compression et cisaillement) ?

1. À quel effort est-il soumis et à quel chargement maximum ?
2. Les Efforts appliqués à une voûte ? compression ? flexion ? cisaillement ? surcharges? répartitions des charges sur les appuis? précontrainte?
3. Disposition des briques lors de réalisation d'un mur ou d'une voûte ?
4. Caractérisation du mortier pour la construction en terre, quelle type, résistance, maniabilité ?
5. Fondations, Chainage aux murs. Dispositions constructives, plans
6. Normes Algériennes et Internationales de constructions en maçonneries

Enfin, ce manuscrit de mémoire se terminera par **une conclusion générale** de nos travaux et une présentation des perspectives possible.

Objectif et Problématique

Objectif

Notre recherche se base sur les objectifs suivants :

- ✓ Revalorisation de la construction neuve en terre en minimisant le couts d'habitas pour qu'il soit abordable par les populations les plus démunies.
- ✓ Préservation du patrimoine architecturale en terre
- ✓ La prise en compte du Développement Durable dans l'habitat.
- ✓ L'Etude des procédés et systèmes constructifs afin de relever les défis sanitaires et environnementaux posés par les premiers effets prévus de 2030 à 2050 du changement climatique.
- ✓ Inciter les constructeurs à modifier leurs habitudes vers des pratiques de constructives durables
- ✓ Fabrication des produits sains et écologiques, suivant la démarche vertueuse du développement durable.
- ✓ Améliorer sensiblement les conditions de vie des usagers notamment leur santé et celles des générations futures tout en préservant l'environnement et sa biodiversité.
- ✓ Minimiser l'émission de gaz à effet de serre.
- ✓ Valorisation des matériaux locaux de construction

Problématique

Ce travail se résume à répondre à la question suivante :

Quelles seraient les démarches à entreprendre afin de réaliser une construction moderne en briques de terre comprimée et stabilisée et qui soit durable abordable et bioclimatique conforme aux normes, dans la région de M'sila ?

Modèle de réalisation du projet :

Le projet est une construction habitable, en semelles filante béton cyclopien et en murs porteurs et toiture végétalisée sous forme de voute avec une maçonnerie en bloc de terre comprimés stabilisés BTCS et en mortier de terre.

Autonome en énergie en utilisant des énergies renouvelables et en assurant une autonomie sur le recyclage des eaux et de déchets.

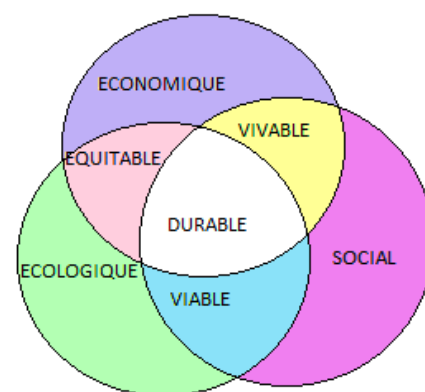


Figure 0-1 Représentation schématique des interactions qui régissent le développement durable

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DE LA PRO- BLEMATIQUE DE MEMOIRE

I. CHAPITRE I : ETAT DE L'ART ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE DE MEMOIRE

I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre de thèse est de faire l'état de l'art des constructions contemporaines en brique de terre crue BTCS dans le monde et en Algérie et des connaissances sur la stabilisation de la terre crue par des liants minéraux.

La première section de ce chapitre sera consacrée à l'étude bibliographique Sur des Constructions modernes en Terre Crue Dans le Monde et en Algérie

Les deux parties porteront respectivement sur la présentation des liants minéraux utilisés pour la stabilisation des matériaux en terre crue et sur les techniques des constructions en terre crue.

A l'issue de cette section dédiée à l'étude bibliographique nous présenterons la problématique du mémoire.

Selon ((Minke, 2006) dans les régions, en particulier celles aux climats chauds et modérés, un nombre croissant de bâtiments modernes ont déjà des murs en adobes ou blocs de sol stabilisés. Avec des logements à bas prix dans ces régions, où les structures de toit peuvent représenter jusqu'à un tiers des coûts totaux de construction, l'utilisation de blocs de terre pour construire des voûtes et des dômes est très prometteuse, car ces types de structures peuvent être plus économiques que les toitures industrielles tout en créant également un climat intérieur meilleur en raison de leurs caractéristiques thermiques, du potentiel d'amélioration de la ventilation et des propriétés d'isolation acoustique.

À l'avis de ((PAULUS, 2015), La promotion des BTC devrait se faire au travers de bâtiments pilotes correctement conçus et via des formations de maçons ainsi que des cours dans les universités.

Pour (Minke, 2006) les connaissances sur la façon de construire des bâtiments en adobes et en pisé résistants aux tremblements de terre devraient être diffusées dans toutes les zones sujettes aux tremblements de terre. Il a été prouvé que dans de nombreux cas, ce n'est pas l'utilisation de matériaux en terre en tant que tels qui a conduit à l'effondrement de ces bâtiments lors des tremblements de terre, mais plutôt des conceptions structurelles incorrectes et un mauvais artisanat.

Les principales causes du rejet du matériau terre et ces différentes démarches proposées en vue de vulgariser les BTC ne sont pas exclusives mais invitent à une réflexion globale sur les changements

qu'il faudrait opérer dans la politique du logement en Algérie afin de promouvoir les matériaux locaux auprès de la population.

I.2 Construction traditionnelle en terre crue

La construction en terre traditionnelle se heurtait jusqu'à présent à des obstacles psychologiques et problèmes de tenue dans le temps des blocs de terre qui ont progressivement amené les constructeurs à abandonner ce matériau, les pluies peuvent être violentes et menacent dangereusement les constructions en terre, les changements de volume de la brique de terre d'argile séchée au soleil en fonction des conditions climatiques peuvent aussi conduire à des pertes de résistance dues aux fissures de retrait et à l'érosion des blocs, ces comportements dans le temps provoquent le détachement des enduits et nuisent d'une façon générale à l'aspect des constructions. Il serait cependant très regrettable d'abandonner cette technique de construction à base de béton de terre à une époque où les connaissances en mécanique des sols acquises grâce au développement des études routières permettent de réaliser des compositions de béton de terre, éventuellement stabilisée par un liant hydraulique qui permette de parer aux principaux inconvénients rencontrés dans les constructions en terre.

Les matériaux de construction traditionnels en terre étaient le pilier d'une proportion importante des sociétés du passé, et ont l'un des plus grands antécédents éprouvés en termes de longévité (certains bâtiments ayant plusieurs centaines d'années) mais aujourd'hui elles sont considérées comme matériaux «non conventionnels», «alternatif» et «faible impact environnemental» dans les industries de la construction modernes,

((Hall, Lindsay, & Krayenhoff, Woodhead Publishing Limited, 2012), reposent leurs conclusions sur une hypothèse importante; que les matériaux de construction en terre **sont déjà bien compris** et que notre justification de ne pas les utiliser à la place de la maçonnerie en brique cuite, du béton, du bois ou des composites préfabriqués doit être basée sur cette connaissance, Les éditeurs de son livre « **Modern earth buildings Materials, engineering, construction and applications**» affirment que la construction moderne en terre représente des matériaux et des finitions de haute qualité, des approches standardisées et des systèmes de placement précis, une flexibilité significative en termes d'ingénierie structurale avancée, la capacité de réguler passivement la température et l'humidité intérieures, d'améliorer le confort thermique et la qualité de l'air intérieur, et présentent une alternative viable à la maçonnerie porteuse ou aux murs en béton in situ avec de nombreux avantages fonctionnels.

L'auteur espère que les preuves de ces affirmations valideront cette perspective et encourageront les autres à explorer les opportunités que la construction moderne en terre peut apporter.

I.2.1 Définition d'un bâtiment en terre « moderne »

Un bâtiment en terre est un bâtiment dans lequel une partie importante de la structure et / ou du tissu du bâtiment comprend un sol classé (c'est-à-dire de la terre) qui a été préparé à l'aide d'une ou de plusieurs techniques, par ex. terre battue ou bloc de terre comprimé. (Hall, et al., 2012)

I.2.2 Caractéristiques d'un bâtiment en terre «moderne»?

Cependant, quelles caractéristiques peuvent rendre un bâtiment en terre « moderne»?

Ne peut pas être considérée comme un bâtiment en terre moderne :

Si les techniques constructives appliquées s'appuient sur ce qui a été appris du passé tout en bénéficiant des avancées et des améliorations apportées par l'innovation de pointe. Étant donné que notre apprentissage est en cours, il s'ensuit également que ce qui constitue un « état de l'art » est relatif à l'époque où le nouveau bâtiment est installé.

S'il est construit au moins au 21^e siècle.

Avoir un haut niveau de qualité, des tolérances dimensionnelles avec précision, une compatibilité avec les installations et accessoires requis / attendus.

Conforme aux réglementations / codes du bâtiment et la possibilité d'exceller dans les meilleures pratiques et les normes de conception futures, par exemple **Passive house ou Cradle to Cradle**.¹

Cela implique aussi une grande compréhension de la conception du mélange, de la sélection et du classement des matériaux, de la technologie de coffrage et de livraison et du développement de nouveaux adjuvants, liants et revêtements, il en va de même pour la norme minimale et la qualité globale de la terre `` **moderne** ''.

¹ « cradle to cradle » veut dire du berceau au berceau. Cela désigne un précepte d'éco-conception et d'éthique environnementale basé sur 2 principes : Zéro pollution. 100% réutilisé

En simplifiant, un produit fabriqué doit pouvoir, une fois recyclé, produire à nouveau le même produit, seul un ajout d'énergie renouvelable intervenant dans le cycle.

« Cradle to cradle : créer et recycler à l'infini » William McDonough – Michael Braungart

Enfin, la capacité d'un bâtiment « **moderne** » en terre à répondre aux attentes toujours plus grandes des occupants en termes de confort, de santé / bien-être et d'abri doit à tout le moins être maintenue et de préférence améliorée.

Minimisation de l'impact sur l'environnement et maximisation de la durabilité, cet objectif devrait être atteint avec une réduction de l'énergie opérationnelle vers zéro carbone, et un objectif secondaire de réduction de l'énergie intrinsèque et future de démolition / élimination. (Hall, et al., 2012)

I.2.3 construction modernes en terre crues à travers le monde :

Pourquoi construire en terre

Bien qu'il existe de nombreuses raisons pour lesquelles un consommateur peut choisir des murs de terre modernes, la beauté et l'impact viscéral des murs massifs fabriqués à partir de matériaux légèrement traités l'emportent tout. Le fait que ces murs offrent des environnements intérieurs sains associés à une efficacité énergétique, une durabilité à long terme avec un faible entretien, ainsi qu'une acoustique améliorée, une stabilité sismique améliorée et des barrières coupe-feu, sont rarement les facteurs déterminants dans le choix de la terre battue. Il ne fait aucun doute que les habitudes de consommation des pays développés s'adapteront rapidement

Pour tenir compte des réalités des effets sur la planète causée par nos modes de vie. Dans ce contexte, la construction en terre moderne devrait être un besoin vital et une demande universelle.

Ou l'importance de la construction moderne en terre dans les industries de la construction actuelles et futures

I.2.3.1 Construction moderne en terre dans les pays développés

Actuellement, il existe peu de matériaux de construction ou de technologies qui offrent des avantages comme le fait les murs en terre modernes, ces avantages sont rarement les facteurs déterminants dans le choix de la terre. Il faut en aucun doute que les habitudes de consommation les pays développés s'adapteront rapidement.

Il y a des restrictions actuelles sur l'industrie moderne de la construction en terre en raison de son coût de main-d'œuvre relativement élevé. Le défi est technique : accroître l'efficacité et la sécurité

de la construction tout en garantissant que le produit conserve une faible énergie intrinsèque. Il existe d'innombrables façons de mécaniser la production de murs en terre. L'enjeu sera d'engager la mécanisation sans renoncer à la valeur environnementale et esthétique du matériau. (Hall, et al., 2012)

1.2.3.2 Construction moderne en terre dans les pays en développement

Dans les pays en développement, dont la plupart la population vit déjà dans des constructions en murs de terre, le défi sera celui de la commercialisation. " Une famille auparavant appauvrie qui a passé des générations à vivre dans un abri aux murs en terre espère vivre dans un bâtiment « moderne » en béton, acier et verre. Il ne suffit peut-être pas que le bâtiment en terre moderne fonctionne extrêmement bien ; il devra y avoir une différenciation visuelle évidente et une qui soit ambitieuse pour l'utilisateur final" (Hall, et al., 2012).

En tout état de cause, la construction moderne en terre dans les pays en développement est une nécessité environnementale, car une population de la classe moyenne est susceptible d'imposer des exigences impossibles en termes de ressources pour des logements « modernes ». Le rôle du marketing social dans ces pays est d'accroître le statut de la construction en terre qui possède une importance vitale. De toutes façons le développement et la sophistication accrue de la construction moderne en terre dans les pays développés sont susceptibles d'améliorer considérablement les qualités ambitieuses de ces structures aux yeux de leurs populations.

1.2.3.3 Changements dans l'industrie moderne de la construction en terre

1.2.3.3.1 Changement esthétique

Les dernières décennies ont vu une lente adoption du statut attaché aux choix de vie respectueux de l'environnement. En Amérique du Nord, il s'agit du segment de marché Lifestyles of Health and Sustainability (LO HAS) et représente environ 50 millions de personnes disposées à voter avec leur portefeuille (Hall, Lindsay, & Krayenhoff, 2012).

L'esthétique changeante de la construction moderne en terre (dans les pays développés) en raison de nos aspirations sociales a été passionnante. La construction en terre moderne s'est développée dans une période de changement pour l'ensemble de l'industrie de la construction. De nombreux bâtiments modernes en terre ont des formes similaires à celles des maisons construites avec des matériaux conventionnels, bien que les architectes exploitent de plus en plus les propriétés fonctionnelles inhérentes que ces murs peuvent offrir au fonctionnement d'un bâtiment et à l'interaction avec ses occupants. **En Australie**, par exemple, il y a une utilisation croissante de la terre battue sur les murs porteurs pour apporter une masse thermique et hygrique importante au cœur de l'intérieur du bâtiment tout en permettant aux éléments plus légers et bien isolés de revêtir une grande partie du tissu extérieur. En Amérique du Nord, le potentiel d'utiliser de la terre battue

isolée stabilisée (SIRE) pour atteindre des bâtiments à consommation énergétique nette zéro est appliqué à la fois dans les climats très froids et très chauds. Une bonne architecture en terre utilise ces qualités pour créer un sentiment de refuge calme pour les occupants.

Les œuvres d'art reposent confortablement sur les murs de terre; si le bon art nous fait nous détendre dans un moment de réflexion, alors un simple mur de terre offre un endroit paisible pour le faire.

Dans tous les cas, un bon design ne se limite pas à une simple apparence - il concerne également la fonctionnalité. Les humains sont assez intelligents pour apprécier l'intégralité de la beauté et de la fonction des bons bâtiments. Avec des bâtiments en terre bien conçus, ce sentiment d'exhaustivité est rendu apparent.

L'acoustique, les odeurs, la température, l'humidité, les courants d'air, la façon dont l'œil se déplace dans l'espace, les couleurs et les textures contribuent tous à notre sentiment de bien-être.

Des bâtiments en terre moderne bien conçus peuvent améliorer toutes ces fonctions avec un seul matériau.

Il y a eu des progrès dans la mise à disposition d'options visuelles plus larges. Maintenant, il est possible d'avoir de la terre battue avec ou sans formation de coutures, avec ou sans trous traversants. Il y a maintenant un niveau de contrôle possible sur la texture finie de la surface du mur (pour une acoustique améliorée) et sur l'application ou non d'une finition de surface. La couleur du mur peut être à peu près n'importe quoi, bien qu'il reste la variabilité qui vient avec l'utilisation d'une matière première. L'utilisation de schémas multicolores devient de plus en plus populaire, malgré ses coûts. L'intégration de coquilles et de pierres dans la terre battue ou la sculpture de coffrages pour créer de l'art à l'intérieur des murs a élargi ce qui est disponible pour que le designer ou le consommateur s'exprime. (Hall, Lindsay, & Krayenhoff, 2012)

1.2.3.3.2 Moralité sociale et réponse au changement climatique

Dans le contexte de notre situation sociale et économique actuelle, le consommateur est le moteur de la morale sociale.

Le développeur axé sur le marché apprend à construire des maisons plus grandes et moins respectueuses de l'environnement car il répond simplement à une demande. La source de la morale sociale dans ce cas réside dans le consommateur. Compte tenu de cette situation difficile, la moralité sociale changeante dans le contexte de la construction moderne en terre appartient moins à l'industrie de la construction et plus au consommateur du bâtiment.

L'expérience australienne évolue pour le mieux, et la nouvelle génération de consommateurs a été très éduquée sur les comportements respectueux de l'environnement. L'écrivain publicitaire **Michael Mulchay (2011)** de DDB Group, Melbourne a écrit : « Les jeunes consommateurs sont

parfaitement conscients de leur rôle dans leur rôle dans la protection de notre environnement fragile. Ils se sentent de plus en plus liés à système plus grand que leurs propres besoins immédiats ».

Cependant, la vitesse à laquelle cette moralité affectera les modèles de consommation peut être accélérée par l'impératif financier. *Michael Mulchay* a de nouveau déclaré : « Une publicité annonce inévitablement l'intérêt personnel du consommateur. Si des bâtiments modestes et bien conçus s'avèrent réduire considérablement le coût de la vie, alors le marché pourrait adapter en conséquence des choix de logements plus sobres et plus judicieux. Étant donné les réalités de nos défis écologiques inévitables, la prochaine génération regardera au-delà du résultat financier pour considérer le résultat écologique ».

Du point de vue nord-américain, la moralité sociale est rarement le véritable moteur du marché moderne de la construction en terre. Il y a, en effet, ceux qui choisissent les bâtiments en terre modernes pour leur pertinence environnementale.

En ce qui concerne la réponse de l'industrie de la construction nord-américaine au changement climatique, ce qu'ils font a très peu changé. Il est difficile de penser à un seul produit dans un assemblage de murs à ossature en bois qui ne contient pas de formaldéhyde, de fongicide, de composés organiques volatils ou de phtalates. Dans le monde de la construction écologique, l'accent a été mis sur l'efficacité énergétique et le recyclage. Des progrès positifs ont certes été réalisés en matière d'efficacité énergétique, mais le recyclage n'a pas été bon pour la maison américaine. Une récente décision de l'EPA (US Environmental Protection Agency) autorise désormais le recyclage des cendres volantes en tant que composant de cloison sèche. Cela augmente le risque potentiel d'exposition à des contaminants tels que le mercure, l'arsenic et d'autres métaux lourds, qui peuvent contenir des cendres volantes. Plus important encore, alors que le consommateur américain continue de se concentrer sur le premier coût des articles coûteux, la durabilité des maisons et des bâtiments continue de décliner. Le concept et les avantages de la tasse jetable en styromousse sont maintenant visibles dans la maison américaine jetable qui est destinée à durer seulement la durée de l'hypothèque. C'est dans ce contexte de « normalité » que l'industrie moderne de la construction en terre est en concurrence.

S'il est vrai que le consommateur a un grand mot à dire dans ce qui est construit, les impacts de ces choix seront ressentis par les générations futures sous la forme de déchets toxiques et d'épuisement des ressources. Si ces décisions ne sont pas fondées sur des informations complètes et si les fabricants de produits sont autorisés à continuer de « blanchir », il incombe au gouvernement de s'assurer que les informations complètes sur les produits sont divulguées. Si les gouvernements exigeaient que tous les produits de construction structurels aient une durée de vie de 100 ans, la

construction en terre moderne deviendrait du jour au lendemain une industrie majeure. Évidemment, ce serait politiquement très difficile. Il est utile de souligner que le paradigme actuel du bâtiment dépend de la disponibilité pour sa compétitivité. Les consommateurs dont nous dépendrons pour changer le marché semblent ne pas en être conscients pour le moment. (Hall, Lindsay, &Krayenhoff, 2012)

I.2.4 Exemples de construction modernes en terre crue dans le monde

Dans cette partie des constructions en terre modernes à travers le monde seront représentés, ces constructions peuvent être simples ou compliqués, privés ou publiques, avec des techniques simples traditionnelles ou développés

I.2.4.1 1.Opéra village ((Miraucourt, 2017)

Construit récemment par Francis Kéré (2013), l'Opéra village de Laongo n'est pas totalement terminé. Il s'agit d'un complexe de bâtiments en BTC abritant actuellement une école, des studios et une maternité. Les salles de classes, studios d'enregistrement et les bureaux, sont des espaces de différents formats espacés les uns des autres pour favoriser les courants d'air entre les bâtiments. De même, les toitures débordantes permettent de s'affranchir du rayonnement solaire direct.

Au
niveau
structu
rel, les
murs



Figure I-1 salles de classe opéra village

sont en BTC stabilisées au ciment de dimensions standards 30*14*9cm, pressées mécaniquement.

A priori, la terre utilisée pour les BTC provient du site, qui a été excavé en son centre

Les murs en BTC reprennent la charge du plancher béton ou du chaînage en fonction des morphologies. Certains locaux se prolongent avec un étage extérieur abritant un balcon agréable, protégé du soleil mais exposé au vent. De même, les baies se prolongent jusqu'au chaînage qui joue le rôle de linteau. La



Figure I-2 logements des enseignants

partie basse de la baie est isolée mécaniquement du reste de la maçonnerie via des traits de scies. Cela évite l'apparition de fissures au bas des fenêtres, dues à une mauvaise descente de charges. Le plancher béton présente en face inférieure une rangée de bois d'eucalyptus servant de coffrage perdu.

La toiture en tôle est supportée par une structure métallique plus sommaire que pour les autres bâtiments de Kéré. En effet, il s'agit d'un système de treillis et poutrelles en T et I plus classique. L'ensemble est moins esthétique que la structure en barres d'armatures soudées.

D'ailleurs l'architecte a voulu cacher la structure en positionnant des bois d'eucalyptus entre les briques et la tôle. Seulement un bâtiment a été achevé, sûrement en raison de contraintes budgétaires.

L'opéra village abrite également le centre médical, dont l'architecture tranche avec le style des autres bâtiments de Francis Kéré. A



Figure I-3 Centre médical en BTC

(<https://archello.com/project/opera-village#stories>, 2011)

l'extérieur, on retrouve un soubassement en pierre sur lequel repose une façade enduite percée de nombreuses baies de bétons parsemées aléatoirement. A l'intérieur, on retrouve le même système constructif propre à l'architecte avec les mêmes percements de bétons qu'à l'extérieur. Les nombreuses ouvertures apportent beaucoup de lumière naturelle à l'intérieur des locaux. Les BTC sont apparentes au niveau des cours intérieures. Elles alternent avec les blocs de béton mais l'ensemble participe à la reprise des charges du chaînage et du toit. Il s'agit des mêmes BTC que pour les autres bâtiments isolés du complexe.

La forme extérieure du bâtiment est un rectangle mais à l'intérieur de la muraille, on observe une alternance d'espaces bâtis et non bâtis. En effet, de nombreux patios apportent lumière, fraîcheur et végétation. La charpente métallique est cachée par des rangées de bois.

1.2.4.2 Résidence cum office, Kassel, Allemagne (Minke, 2006)

Architecte: Gernot Minke, Kassel, Allemagne

Achèvement: 1993

Superficie: 155 m² (habitation) + 61 m² (bureau)

Un immeuble mixte résidence / bureaux a été construit en 1992 dans une banlieue résidentielle de Kassel, en Allemagne, qui a été construit selon les normes écologiques. Toutes les pièces principales ainsi qu'une salle de bain et le jardin d'hiver sont recouverts de dômes en terre.



Figure I-5 Résidence cum office, Kassel, Allemagne

L'entrée est couverte par trois voûtes à cric construites en briques vertes, comme expliqué au chapitre 14. Le hall central est couvert par un dôme avec une portée libre de 5,2 et une hauteur libre de 4,6 m, qui est muni d'un puits de lumière composé d'un dôme en verre acrylique à double couche.

À partir de ce hall d'entrée, quatre chambres en forme de dôme

supplémentaires. Chaque pièce a la même envergure, avec une hauteur libre de 4 m, et chacune est dotée d'un puits de lumière central et d'une fenêtre à hauteur normale. La construction de ces cinq dômes a été réalisée à l'aide du guide de rotation Bien que le dôme central jaillisse d'une hauteur de 1,75 m et les dômes des quatre autres pièces à des hauteurs de 0,75 m, aucune poutre annulaire n'est nécessaire, la structure étant conçue pour que toutes les forces résultantes tombent dans le tiers médian des fondations. Les dômes de la salle de bain et du jardin d'hiver sont formés sur un hexagone irrégulier, et ont été construits en utilisant une technique dérivée de la technique du dôme afghan (voir chapitre 14) en utilisant des arcs inclinés à des angles de 40-60 ° par rapport à l'horizontale.

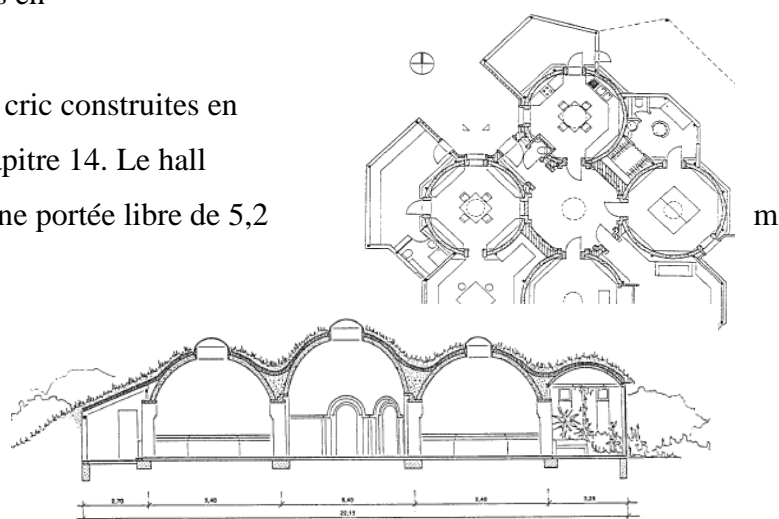


Figure I-6 plans : Résidence cum office, Kassel, Allemagne



L'ouverture en forme d'œil qui reste une fois que les deux ensembles d'arcs atteignent le point où ils convergent est couverte en modifiant le motif des arcs de 90 °. Tous les dômes sont recouverts d'une couche supplémentaire de 20 cm laine de roche pour l'isolation thermique et scellée avec une membrane en plastique renforcée soudée à l'air

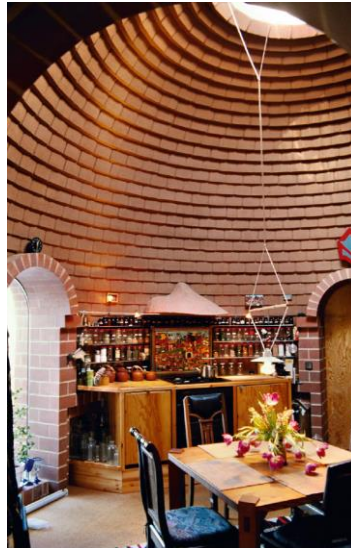


Figure I-7 Résidence cum office, Kassel, Allemagne vues d'intérieur

chaud de 2 mm d'épaisseur, qui est imperméable et « résistante aux racines ». Celui-ci est recouvert de 15 cm de terre, qui sert de substrat aux graminées sauvages résistantes au gel et à la sécheresse. La maison de plain-pied a une superficie de 216 m², y compris le jardin d'hiver. Les murs, les étagères et les objets sanitaires sont recouverts de tuyaux remplis de terre et même l'évier de la salle de bain est en terre cuite non cuite (Minke, 2006). Pp153-155

1.2.4.3 .Maison pour trois familles, Stein sur le Rhin, Suisse

Conception: Michael Nothelfer,
Überlingen, Allemagne
Achèvement: 1997
Superficie: Sous-sol: 82 m²
Rez-de-chaussée: 118 m²
Étage mansardé: 108 m²



Le bâtiment est une structure de poteaux et poutres à trois étages qui est bordée d'un revêtement de contrefort en diagonale. Les murs extérieurs portent un enduit de chaux extérieur sur des plaques de construction en laine de bois légère, derrière lesquelles se trouve une isolation en cellulose de 12 cm d'épaisseur. L'intérieur des murs

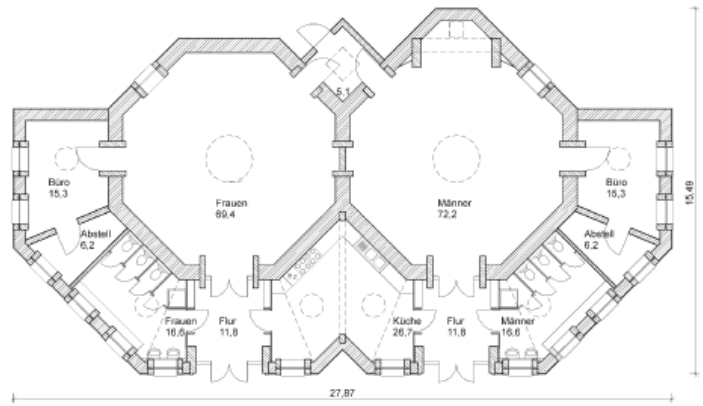


Figure I-8 Maison pour trois familles, Stein sur le Rhin, Suisse travaux de réalisation

extérieurs consiste en un loam de rasage à copeaux de bois léger, de 20 cm d'épaisseur, enduit d'un enduit de loam. Le pignon exposé aux intempéries est pourvu d'un revêtement en bois de mélèze ventilé à l'arrière. Les murs intérieurs sont remplis d'adobes. Le toit en brique et le balcon se projettent vers l'extérieur de sorte que les pièces du sud soient ombragées en été, tout en admettant ensoleillées en hiver. (Minke, 2006)pp158-159

1.2.4.4 .Mosquée BaitulMuqet, Wabern, Allemagne

Architecte: Gernot Minke, Kassel, Allemagne

Superficie: 273

Capacité : 250

Construit : 04/09/2007

A partir de 2005, cette mosquée, dispose de deux salles circulaires de diamètre, chacune couverte de



Figure I-10 Mosquée BaitulMuqet, Wabern, Allemagne

qui de 9 m dômes,

est en construction dans la ville de Hesse de Webern. Ce sera la première mosquée à être construite affichant des dômes et des voûtes de briques de terre non cuites (vertes) et recouvertes d'un toit vert, c'est-à-dire : un toit de terre et d'herbe vivante. Les grands dômes sont construits en briques vertes acoustiques spéciales avec des bords arrondis.

Les sections transversales des dômes sont optimisées de manière à ce qu'aucune force d'anneau ne se produise à l'intérieur du dôme, et que son épaisseur structurellement nécessaire ne soit que de 30 cm. (Minke, 2006)pp183

1.2.4.5 5. Bibliothèque publique du comté de Sublette à Pinedale, Wyoming -

USA(SIREWALL²)

Lauréat du Prix de citation du bâtiment distingué.

Le bibliothécaire, Daphne Platte, et l'architecte, John Carney, ont dirigé la première utilisation Terre battue isolée stabilisée commerciale (dans un climat

froid au Wyoming. Pinedale se trouve à altitude de plus de 7000 pieds près de la division continentale. Le temps est froid

et venteux en hiver avec des minimums de -30°F (-34°C) (record de -49°F (-45°C)). La construction a été effectuée en hiver à l'intérieur d'une tente en plastique chauffée (connue sous le nom de chauffage et de thésaurisation). Avec seulement trois mois d'été

qui n'ont jamais connu de températures inférieures à zéro, le temps disponible pour la construction devait être court.

Le danger d'une panne de courant (il y en avait un) et les vents violents constants ont fait de l'intégrité thermique et structurelle de la tente un sujet de préoccupation.

De plus, travailler à l'intérieur de la tente avec l'échappement du skidsteer et du générateur était parfois difficile. Par contre, travailler avec des T-shirts quand il faisait -20°F dehors était un répit agréable.

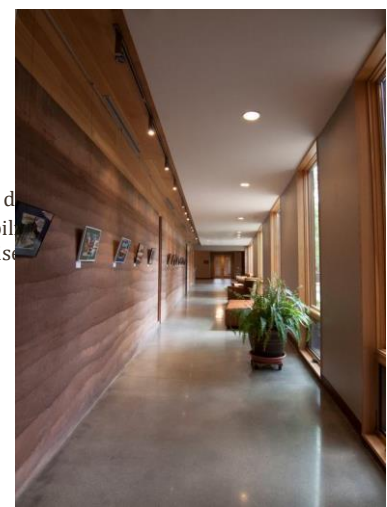
Il y avait trois zones de pisé dans ce bâtiment : le grand auditorium, le hall d'entrée et la cuisine et le long couloir. La nouvelle construction était un ajout à une ancienne bibliothèque de journaux et est assez séparée dans le plan d'étage.



Figure I-12 Bibliothèque publique du comté de Sublette à Pinedale, Wyoming - USA



Figure I-13 Bibliothèque publique du comté de Sublette à Pinedale, Wyoming - USA vue d'intérieur



²SIREWALL :Structural Insulated Rammed Earth:est un système de murs sandwich structurels de sols locaux combinés à 9% de ciment sont compactés de chaque côté d'un noyau isolant caché ,Stabilisé par des barres d'armature, avec 4 " d'isolant rigide caché au centre du mur (les barres d'armature sont utilisées

Les murs de terre battue isolés stabilisés mesurent 16 pieds de hauteur dans l'auditorium et 11 pieds de hauteur ailleurs. Ils ont une épaisseur totale de 24 pouces et ont 4 pouces de mousse de polyisocyanurate incrustée au milieu. La coloration est un oxyde de fer spécifique et les proportions étaient légèrement variées (pour l'intérêt visuel) comme la construction de terre moderne nord-américaine 601

le mur a été percuté. La texture des murs est très efficace pour créer une bonne qualité sonore dans les espaces et le bâtiment est très calme (au centre-ville de Pinedale) en raison de l'atténuation acoustique des murs épais et isolés. La terre était un till glaciaire concassé combiné à un sable granitique anguleux grossier. La résistance à la compression moyenne du mélange de ces deux matériaux combinés avec 10% de ciment Portland était de 4205 psi (29 MPa) avec certains résultats dépassant 6000 psi (41 MPa).

(Krayenhoff, 2012)

1.2.4.6 La Luz Le modernisme d'Albuquerque New Mexico, USA

Architecte : **Antoine Predock** **1967-1974**

La Luz est une cité résidentielle de bon lieu, un développement de maisons de ville sur le côté ouest de la ville d'Albuquerque, à côté de la rivière Rio Grande. Conçu par Antoine Predock, le projet a connu un grand succès et a attiré une large attention en raison de son approche unique des matériaux, du paysage et de l'aménagement. L'ouverture de la communauté à la nature, son unité avec la terre et son adaptation au climat ont constitué la base d'un

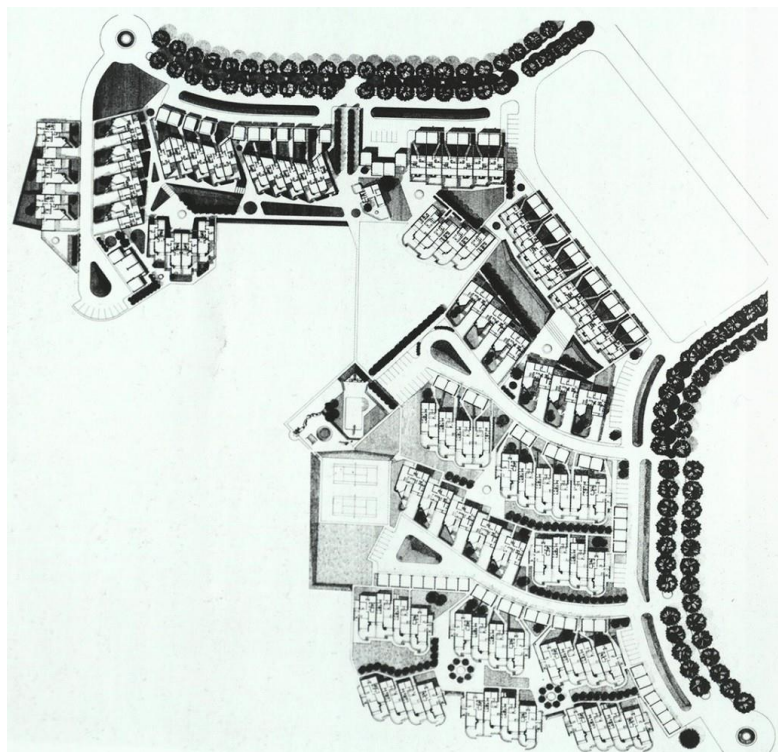


Figure I-14 Antoine Predock, plan du site de La Luz, 1967. Source: Brad Collins, éd.,

autre type d'architecture régionale et une approche alternative à la croissance suburbaine rapide qu'Albuquerque a connue dans l'après-guerre.

La Luz représentait à la fois la modernité et le patrimoine, passé et présent. Predock a conçu les unités pour qu'elles soient construites en adobe mais finies avec des matériaux industriels modernes comme le béton, le bois scié et le verre plat. De larges routes, de grandes fenêtres en verre et des arêtes vives étaient d'autres éléments modernistes ici, en commun avec d'autres structures construites dans la ville dans l'après-guerre. En même temps qu'elle exprimait ouvertement son lien avec la culture automobile et le modernisme, La Luz a également répondu à son environnement naturel environnant. En forme et en matière, le développement achevé représentait un village en pisé avec des garages, suggérant cette approche hybride. Placés par le Rio Grande, loin de la ville et de ses structures en béton, ses habitants pouvaient néanmoins rejoindre le centre-ville d'Albuquerque en quelques minutes.)(Arar, 2020)



Figure I-15. La Luz, Albuquerque, NM, novembre 2015.

En forme et en matière, le développement achevé représentait un village en pisé avec des garages, suggérant cette approche hybride. Placés par le Rio Grande, loin de la ville et de ses structures en béton, ses habitants pouvaient néanmoins rejoindre le centre-ville d'Albuquerque en quelques minutes.)(Arar, 2020)

(s.d.)



Figure I-16. Espace commun avec fontaine. La Luz. novembre 2015

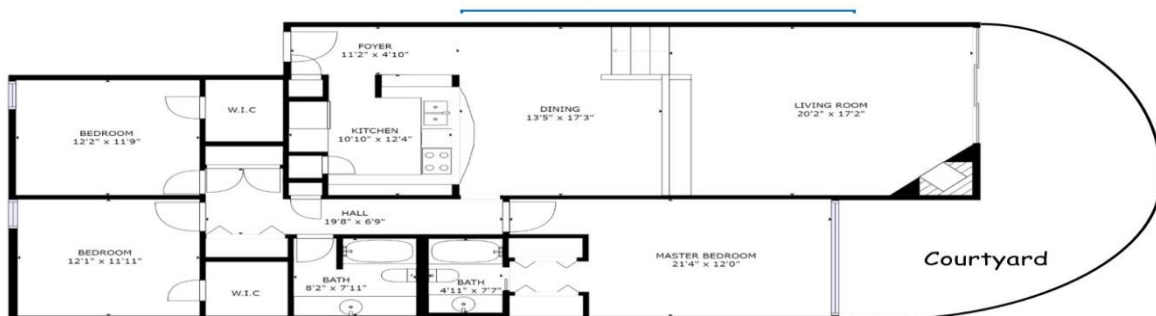


Figure I-17. Plan d'une maison à La Luz (chrislucasabq),

1.2.4.7 .Siège social de Telenor, Islamabad

Le plus grand projet de pisé du monde !

Le projet démontre en outre que, bien fait, les nombreux avantages de la terre battue ne se limitent plus à la construction résidentielle.

Caractéristiques personnalisées

La tour de communication établit un *nouveau record pour la plus haute structure de pisé du monde* à 100 pieds

Détails techniques

Superficie totale du projet : environ 600 000 pieds carrés (55 742 mètres carrés)

Conçu des protocoles de livraison SIRWALL à faible technologie basés sur la disponibilité d'une main-d'œuvre abondante

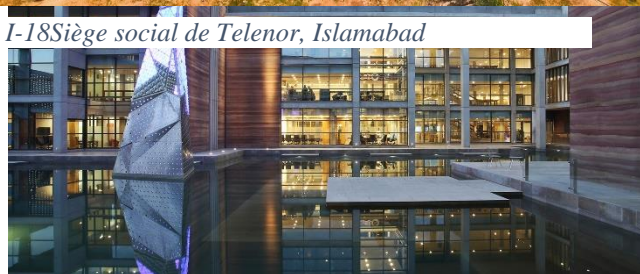
Dimensions du mur d'enceinte : 2 pieds (0,6 m) par 10 pieds (3 m) par environ 0,47 miles (750 m)

Épaisseur des murs de la tour: 3 pieds

Hauteur de la tour: 100 pieds (SIREWALL.Inc, 2020)



Figure I-18Siège social de Telenor, Islamabad



1.2.5 Exemples De Constructions modernes En Terre Crue en Algérie

En Algérie, les projets de construction réalisés n'ont aucune identité architecturale, ce qui est déjà publié sur le magazine de l'architecture en ligne Archi-Mag : « La question de l'architecture en Algérie, reste encore sans réponse près d'un demi-siècle après l'indépendance. En effet, les paysages urbains, les productions architecturales qu'elles soient de commande publique ou d'initiatives privées, témoignent d'une absence de repères historiques ou de leur méconnaissance. L'absence de ces repères qui seraient à même d'asseoir une permanence de signes identitaires architecturaux reconnaissables, ainsi que leur perpétuation, réduit les chances de jeter les bases d'une architecture algérienne contemporaine pouvant s'inscrire dans l'universalité et permettant son établissement en tant que style architectural propre au pays et de l'inscrire dans la durabilité.»

L'Algérie a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation des constructions en terre mais il reste insuffisant pour réduire ou même limiter l'obstacle psychologique des citoyens.

L'étude de la réhabilitation et la restauration de l'ancien hôpital d'Adrar, conçu en 1942 par Michel Luyckx, et classée en 2007 patrimoine local, présente un exemple sur l'importance de la construction en terre dans le sud algérien.

Dans ces trois dernières années, le Ministère de la Culture en collaboration avec l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme d'Alger (EPAU), organisent un festival international de promotion des architectures de terre, baptisé « ArchiTerre ». L'objectif premier de ce festival est la sensibilisation aux architectures de terre des futurs acteurs de la préservation du patrimoine et de la construction.

Le Décret exécutif n : 12-79 du 19 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 12 février 2012 portant création du Centre Algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre CAP Terre et fixant son organisation et son fonctionnement.

Le CNERIB, regroupe plusieurs projets réalisés en terre crue ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit: (H.Lamouri-Hannani, 2014)

Tableau I-1les opérationsde construction en terre en Algérie(H.Lamouri-Hannani, 2014)

Année	Réalisation
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réaliseà Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé.
1975	Le village d'Abadla à été construit selon le procédé de la terre remplissant
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à chéragaprès d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC).
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion Immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	Un projet intitulé «réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

Figure I-19logements en B.T.C à Tamanrasset (Le CNERIB



Figure I-20premières assises du prototype de (S.Safia, 2014)



Figure I-21: Prototype achevé (S.Safia, 2014)

Figure I-22maison en pisé au village Madher à Boussada (S.Safia, 2014)



I.2.6 Histoire des techniques de construction en terre

La faible résilience de la terre par rapport à d'autres matériaux de construction tels que la pierre signifie que des sites archéologiques monumentaux peuvent avoir été complètement détruits ou restent à découvrir, et qu'il est difficile d'inférer le développement de techniques. Cependant, l'ubiquité de la terre en tant que matériau de construction vernaculaire signifie que de nombreux sites antiques construits en terre sont à l'étude, ce qui permettra à terme de mieux comprendre les techniques utilisées dans l'Antiquité. (P. Jaquin, 2012)

Il est probable que les techniques de construction de la terre se sont développées indépendamment dans différentes parties du monde, se propageant avec le mouvement des peuples. Les premiers hommes se déplaçaient constamment, suivant des schémas de chasse et de cueillette dictés par l'environnement. Les premiers abris utilisaient des caractéristiques naturelles telles que des grottes, et les premiers bâtiments en terre auraient pu être des extensions de caractéristiques naturelles telles que des monticules de terre à l'entrée des grottes ou des fosses creusées dans le sol.

L'agriculture s'est d'abord développée dans les vallées fluviales fertiles, et ici le limon et les argiles fournissent d'excellents matériaux de construction pour la construction en terre. Il est probable que la première technique à développer ait été l'accrochage et le barbouillage ; construction d'une façade ou d'un toit en bois ou en graminées, qui est ensuite recouvert de terre. Une technique de type pisé peut se développer plus tard, avec de la terre placée contre ou entre des murs en bois et compactée en place, formant un mur plus épais. Le développement de la construction d'unités aurait pu se développer plus tard, dans un premier temps, les unités ont été formées à la main et plus tard, des blocs plus cuboïdes fabriqués à l'aide de coffrages. Une fois sèches, celles-ci pourraient être transportées, permettant la production des matériaux à séparer de l'emplacement du bâtiment, ce qui signifie par exemple qu'une terre appropriée pourrait être prélevée dans une vallée fluviale susceptible d'être inondée et utilisée pour la construction de bâtiments à un niveau supérieur.

Une construction d'agriculture et de terre s'est développée indépendamment dans les principaux berceaux de la civilisation. Le développement de l'agriculture le long des grands fleuves a conduit à des rassemblements pour la première fois dans les villes. Ces civilisations fertiles de vallée fluviale ont fourni les bons types de sol pour la construction en terre, et il existe des preuves pour le développement de la construction en terre indépendamment dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate, du Nil, de l'Indus, de la Jordanie, de Murghab et des rivières jaunes. Ces cultures sont restées indépendantes les unes des autres, mais semblent avoir développé des techniques de construction de la terre très similaires. Les techniques développées par la civilisation et le commerce ont été affinées et mises à jour, ce qui est difficile à tracer parce que les techniques de

construction de la terre peuvent varier d'un établissement à l'autre et d'une année à l'autre. Cependant, certains modèles émergent. Il semblerait que la transition des briques moulées à la main aux briques cuboïdes se soit produite en Mésopotamie vers 5000 avant JC, et que la terre battue n'ait pas été trouvée en Amérique du Sud avant son introduction par les Européens.

La terre est généralement utilisée en combinaison avec d'autres matériaux de construction quand ceux-ci sont disponibles, par exemple les maisons de **wattle et daub**³ combinent la terre et le bois en construction et se trouvent au Japon et en Europe du Nord. Là où la pierre est facilement disponible, la terre est utilisée comme plâtre ou mortier, comme à Malton dans le nord de l'Angleterre, ou comme gazon pour la construction de toits ou de murs, comme dans les îles occidentales d'Écosse. Il y a aussi des exemples d'architecture monumentale dans un type de construction et de construction

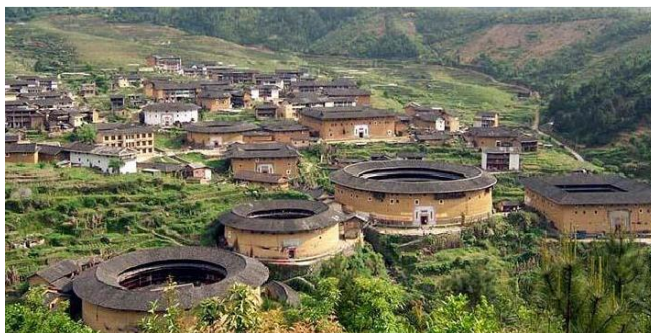


Figure I-23 maison circulaire Hakka source : <https://maison-monde.com/maisons-circulaires>

vernaculaire dans un autre, comme les cathédrales en pierre d'Angleterre, contrastant avec les maisons vernaculaires environnantes Wattle and Daub.

les techniques de construction de la terre se sont développées indépendamment dans différentes parties du monde, mais il existe des traits communs que l'on retrouve partout. Le sol, et en particulier les sous-sols nécessaires à la construction en terre, se trouvent dans de nombreuses régions du monde et, lorsqu'ils sont proches de la surface, c'est généralement parce qu'il n'y a ni bois ni pierre.

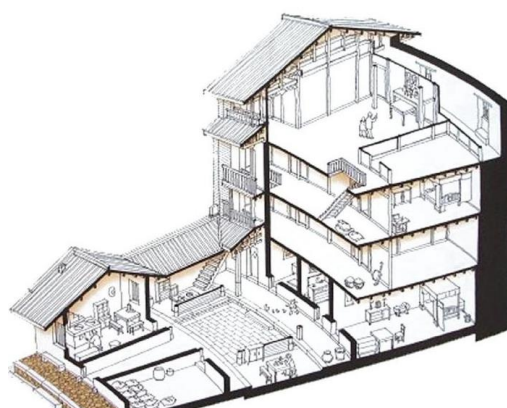


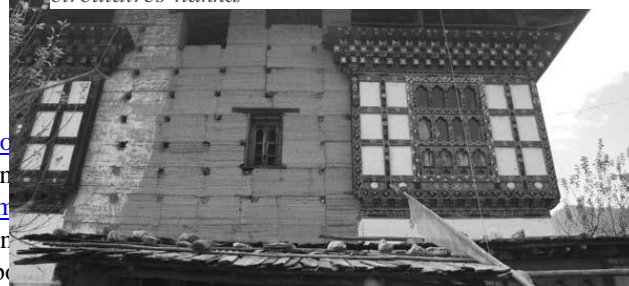
Figure I-25 Fort de pisé à Basgo, Inde.

S'il y avait de la pierre ou du bois, ils seraient utilisés

comme matériaux de construction.

Par conséquent, la terre est généralement utilisée là où le bois ou la pierre ne sont pas.

Figure I-24 coupe d'une maison circulaire Hakka source : <https://maison-monde.com/maisons-circulaires-hakka/>



³Le **wattle and daub** est une méthode de construction [composée](#) laquelle un treillis tissé de bandes de bois appelé [wattle](#) est en combinaison de sol humide, d'argile, de sable, [de fumier animal](#) moins 6 000 ans et sont toujours une méthode de construction. De nombreux bâtiments historiques incluent la construction en brique et en terre dans les zones plus développées en tant que technique de [construction durable à faible impact](#).

Il existe une myriade de techniques différentes de construction en terre, et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour permettre des descriptions précises du développement et de la diffusion de ces techniques. La construction d'unités nécessite des sols particulièrement riches en argile et en limon, qui se trouvent généralement dans les vallées fluviales et sont généralement combinés avec un matériau liant comme la paille pour produire de petites unités. Ces unités peuvent être séchées et transportées sur de courtes distances du site de production. En conséquence, les premières grandes colonies utilisant des matériaux de construction en terre comme le long du Tigre et de l'Euphrate, la colonie de Catalhöyük et celles de Harrapa et Mohenjo-daro le long de l'Indus semblent s'être développées avec une agriculture sédentaire, en utilisant les sols des vallées fluviales combiné avec les cultures cultivées



Figure I-26 Section de pisé du monastère de KyichuLhakhang, Bhouta

maintenant disponibles.

Les sols mous du loess des plaines du nord de la Chine et du sud de l'Amérique du Nord pourraient facilement être excavés puis empilés. Ainsi, en Chine, la culture Lungshan et le peuple nord-américain de Hokokam ont développé des techniques empilées et protégées de la terre.

Une civilisation s'est développée, le matériau de construction est devenu importance secondaire pour l'architecture, et nous trouvons donc des briques d'adobe inclinées, comme à HuacaPuellana, Lima, ou dans les vallées du Draa du Maroc ou des motifs taillés dans la terre comme à Chan Chan au Pérou. **La terre battue** est devenue décorée par l'inclusion de lignes de briques décoratives entre chaque ascenseur.

La Terre a servi de matériau de construction pour de nombreux types de construction. Son utilisation principale est généralement la construction vernaculaire, et les premiers établissements tels que ceux de la vallée de l'Indus et autour du Tigre et de l'Euphrate ont pu croître en raison de l'omniprésence du matériau de construction. La terre a été utilisée pour la construction de grands monuments religieux et commémoratifs tels que les Ziggourats en Asie occidentale et les Pyramides du Soleil et de la Lune au Pérou moderne, et ceux de l'Égypte ancienne avant la construction en pierre.

La Terre est particulièrement remarquable pour son utilisation dans les constructions défensives, en particulier les murs de la ville. En Chine, ces murs sont peut-être les plus grands, les murs de la ville de Xi'an et de Beijing ayant environ 20 m d'épaisseur à la base. Dans l'Himalaya, les murs

entourant Lo Manthang dans Mustang sont construits en terre battue, et en Afrique du Nord et en Europe du Sud, la terre battue a été utilisée pour les murs de la ville de nombreuses citations islamiques. Les murs de Séville et de Cordoue en Espagne et de Marrakech au Maroc sont tous construits en terre battue.

Bien que la terre continue d'être utilisée à la fois comme matériau de construction vernaculaire et monumental, son utilisation a diminué au fil du temps à mesure que d'autres matériaux de construction deviennent disponibles, à la fois grâce à des processus de production améliorés (d'abord pour le bois et la pierre, puis pour l'acier et le béton) et grâce à des améliorations de transport. Celles-ci, associées aux propriétés mécaniques améliorées que présentent d'autres matériaux, signifient que la terre a commencé à ne plus être utilisée dans certaines parties du monde.

Au 18^e siècle, les révolutions industrielles qui ont balayé l'Europe et l'Amérique du Nord signifiaient que d'autres techniques de construction pouvaient fournir une alternative viable à la construction en terre. Bien que la construction en terre se soit avérée populaire dans le Midwest des États-Unis, l'arrivée des chemins de fer a permis de développer des techniques de construction plus efficaces. De même, le développement du ciment Portland en 1824 et l'utilisation du fer et de l'acier dans la construction ont éloigné la construction en terre de la construction traditionnelle.

La construction en terre dans le monde développé a récemment vu une résurgence en tant que matériau de construction durable. Les vertus qui l'ont rendu si viable pour les premiers constructeurs, à savoir de faibles distances de transport, des processus de construction simples et une disponibilité facile, font de la terre la construction durable par excellence

I.2.7 Les Techniques De Construction En Terre Anciennes

Il existe de très nombreuses techniques constructives utilisant la terre crue comme matériau à travers le monde. Ces techniques ont été répertoriées et classées par catégories par les chercheurs de

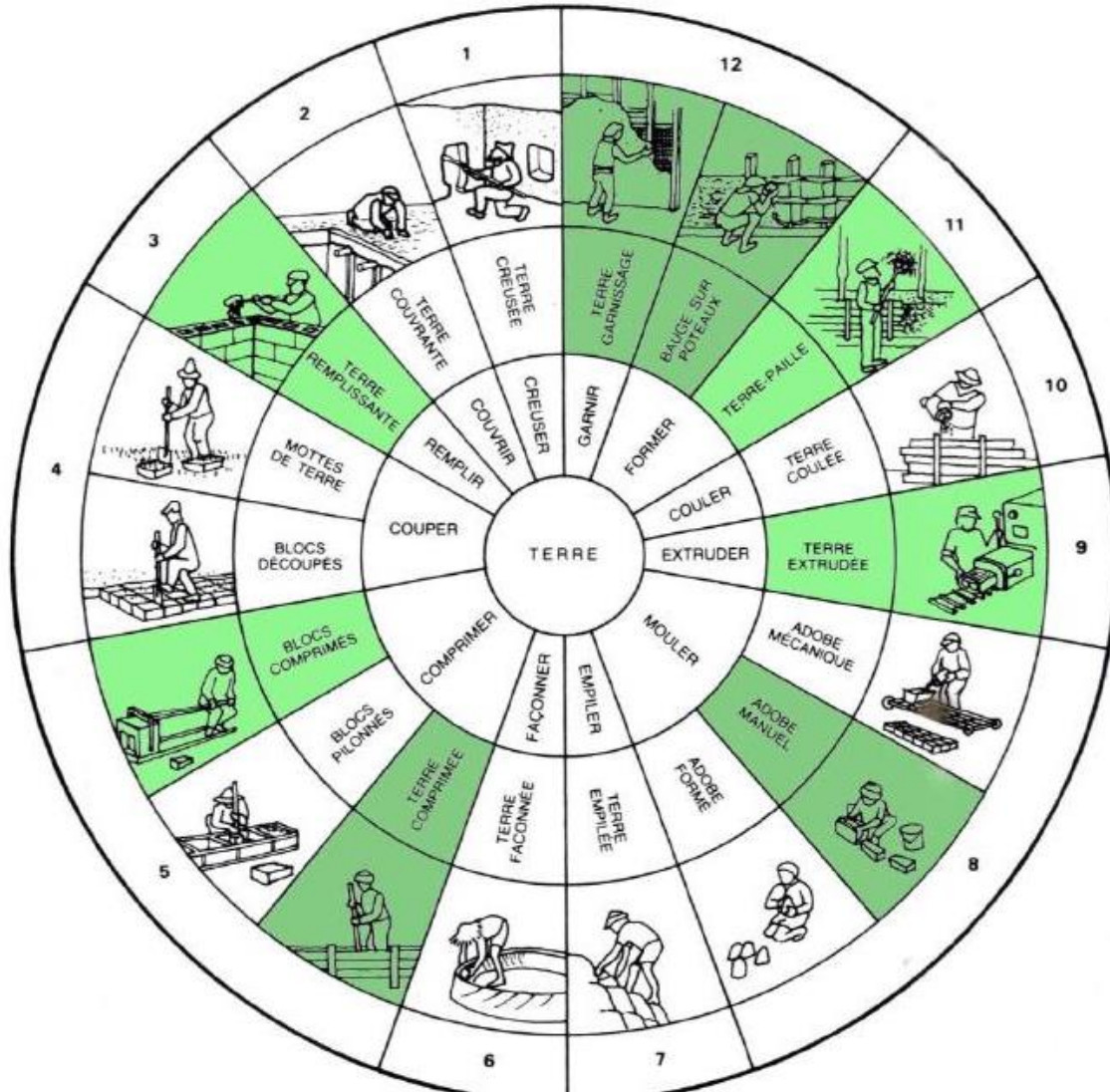


Figure I-27 Les Techniques De Construction En Terre Anciennes CRATERRE

CRATERRE dans l'illustration ci-après. qui va être détaillé ci-après. (Guillaud, offroy, Odul, & CRATERRE-EAG, |995)

1.2.7.1 La bauge.

La technique de la bauge ne nécessite que très peu d'outils pour être mise en œuvre. C'est la méthode constructive la plus longue dans la mesure où l'on commence à construire au début du printemps jusqu'au début de l'hiver avec la pose de la toiture. De plus la maison n'est habitable que plusieurs mois après l'achèvement. La bauge permet de monter des

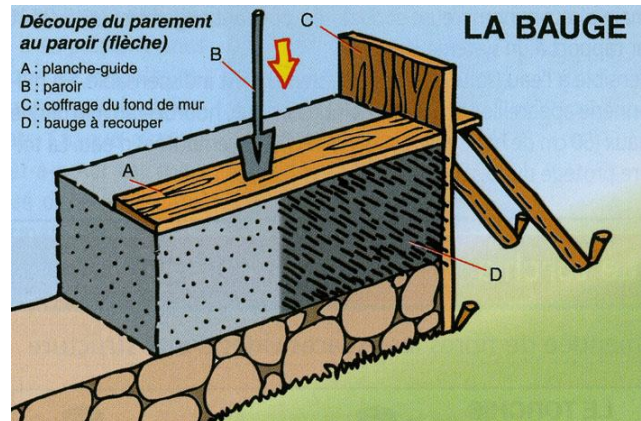


Figure I-28 La bauge

murs monolithiques composés de boules de terres-fibres empilées les unes sur les autres à la main. Selon les hauteurs des murs leur largeur varie : pour une maison de plein pied il faut une épaisseur entre 50 et 60cm mais pour une maison à deux niveaux il faut des murs entre 70 et 80cm. La terre est directement prélevée sur le site, puis elle est étalée sur environ 20cm de haut et sur laquelle on dispose des fibres et de l'eau pour être ensuite malaxée énergiquement avec les pieds ou grâce à des animaux (cette technique nécessite de répéter de nombreuses fois ce procédé). La construction du mur se fait sur un soubassement en pierre, pour éviter les remontées capillaires, sur lequel on dépose la terre par levées de 60 à 90cm de hauteur, les débords sont tassés énergiquement à grand coup de trique. D'une manière générale 4 ouvriers peuvent réaliser en 6 jours une levée de 24 mètres de long qu'il faut laisser reposer plusieurs semaines avant de continuer avec la seconde levée. Entre chaque levée les débords sont coupés à l'aide d'un paroir (sorte de longue pelle aux bords atfutés) afin d'avoir un mur droit. L'étape finale de la pose d'un enduit ne se fait qu'après une ou deux années après la fin des travaux. (Doat.A.Hays.H.Houben.S.Matuk, 1979)

1.2.7.2 Le torchis.

Contrairement aux autres méthodes constructives utilisant de la terre crue, le torchis est une technique qui consiste à remplir les vides autour d'une structure en bois avec des mélanges de terre. Cette technique ne sert pas à réaliser de véritables murs porteurs mais qui a plus un rôle de protection contre les intempéries, d'isolant thermique et phonique. Seule la structure en bois sert à monter l'édifice sur plusieurs étages et porter la toiture.

Traditionnellement le torchis est réalisé à l'aide de seulement 3 outils, une fourche pour faire le mélange de la terre, les mains pour déposer le mélange aux endroits prévus et une truelle pour égaliser et lisser le tout. Le torchis fait partie des tout premiers matériaux composites de l'Histoire car il se compose d'une matrice (la terre) et de renforts (fibres naturelles et/animales). En effet le mélange idéal doit être relativement argileux auquel on ajoute des fibres afin de solidariser le tout

lors de la phase de retrait et ainsi réduire et *équilibrer* la présence des fissures. Les colombes sont les pièces de bois qui forment la structure principale, leur épaisseur varie entre 10 et 15cm ce qui représente l'épaisseur réelle du mur final. De plus fines pièces appelées écharpes sont placées en biais entre les colombes afin de servir de contreventements.

Pour procéder au remplissage il existe 3 façons différentes qui sont décrites ci-dessous.

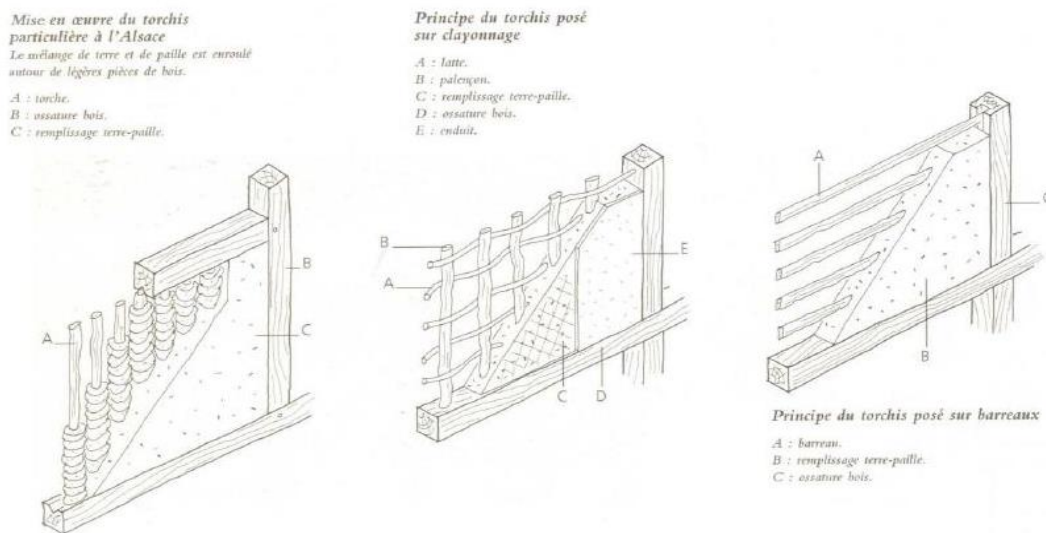


Figure 15 Les trois méthodes du torchis présentes en France. Source : Terre crue, techniques de construction et de restauration de Bruno PIGNAL 2005

Figure I-29 les trois techniques de torchis

La région Alsace, où l'on retrouve un nombre très important de maisons en torchis, a vu se développer une technique unique qui consiste à enrouler autour de barreaux verticaux nommés « torches » le mélange de terre.

Une autre technique consiste à disposer les barreaux de façon horizontale et de remplir les vides directement.

Enfin la troisième technique se fait sur un clayonnage en bois (entrecroisement de pièces en bois verticaux et horizontaux) sur lequel on dispose le mélange de terre.

D'une manière générale le mélange de terre est appliqué sur l'une des faces pour obtenir une épaisseur d'un peu moins de 4cm, on attend une journée pour que le retrait se fasse et l'on répète l'opération sur l'autre face. Lorsque le mélange terre est posé, on égalise le tout à la truelle pour avoir une surface lisse et on procède à des stries à 45° sur la surface extérieure afin de permettre à l'enduit qui sera posé un ou deux mois après de bien s'accrocher.

L'adobe.

Le terme «adobe» viens de l'arabe «al toubé» qui représente des blocs de terre crue moulés et séchés qui une fois calpinés permettent de réaliser des murs porteurs de 30 cm voir plus suivant les hauteurs souhaitées. La différence entre une brique d'adobe et une brique de terre cuite réside dans le fait que cette dernière étant chauffée permet d'acquérir des caractéristiques de dureté et de longévité. C'est la production de plus en plus importante des briques de terre crue qui explique un certain délaissement pour les briques d'adobe.



Figure I-30: Moulage et séchage des blocs adobes (Hanane, 2018)

Hormis l'utilisation d'outils basiques comme des pelles, fourches ou brouettes, les maçons utilisent pour façonner leurs blocs de terre crue de simples cadres de bois, cette technique étant très facilement accessible même aux maçons les plus pauvres, permettant de réaliser un ou plusieurs blocs à la fois. La terre servant à la confection des blocs devaient être issue de sol argilo-sableux, la qualité du produit fini étant en lien direct avec la terre utilisée il n'était pas rare que les meilleurs sites d'extraction se transmettaient de génération en génération.

La terre extraite du sol est débarrassée de ses éléments végétaux puis hydratée jusqu'à obtenir une pâte proche de la boue puis laissée au repos 48h pour permettre une bonne homogénéisation du produit, ce procédé est répété plusieurs fois. Il est possible d'armer les blocs de terre en y ajoutant des fibres mais cela n'est pas toujours nécessaire si le sable et le gravier sont suffisamment présents car ils font également office de squelette (liant). Lorsque le mélange est prêt, on le lance avec force dans le moule afin d'en faire échapper les bulles d'air, on lisse la surface et on passe au bloc suivant. Les blocs sont posés sur chaque côté deux fois par jour pendant trois jours .

Le pisé est une technique particulière pour monter un mur en terre crue : celle-ci est compactée (à l'aide d'un pilon) dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs (figure 19) (Hachem, 2017)

1.2.7.3 Le pisé:

Le pisé est une technique particulière pour monter un mur en terre crue : celle-ci est compactée (à l'aide d'un pilon) dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs) (Hachem, 2017)

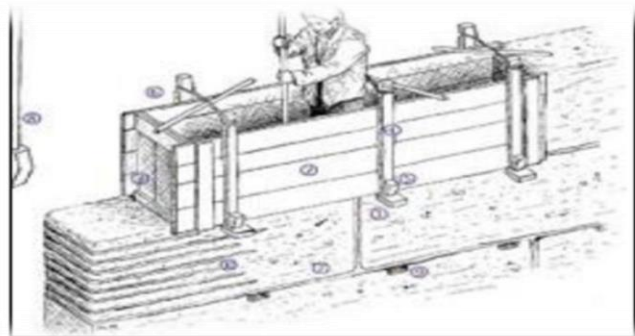


Figure I-31 Construction d'un mur en pisé

Les Avantages de pisé:

La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité à stocker la chaleur et à la restituer par rayonnement.
- Isolation phonique et qualité acoustique.

Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire.(Abdelouhab & Ahmed, 2017)

1.2.8 Bloc de terre comprimée (BTC) :

1.2.8.1 Définition :

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de pilons de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Elle a été développée aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie.

Le BTC est très régulier en forme et en dimension, ils sont pleins ou perforés ce qui permet de réaliser des travaux de maçonnerie très variés. Les blocs de terre comprimée, sont fabriqués à partir de terre humide et compactée dans une presse.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre comprimée stabilisée ».

Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terre eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières(Soumia, 2015).

1.2.8.2 production des blocs de terre comprimée :

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits par compactage, exception faite de la phase de cuisson.

L'organisation de la production sera différente selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) au moyen de presses généralement manuelles ou semi-mécanisées, voire motorisées ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles et industrielles les principes et modes d'organisation de l'industrie des briques cuites ou des produits silico-calcaires classiques.

Les aires de production, de séchage et de stockage varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, technique et économique (Mohemed, 2007).

1.2.8.3 Modes de production des blocs de terre comprimée :

On distingue quatre grandes catégories de presses et unités de production :

Presses manuelles **Figure 23** ; Presses motorisées, Unités de production foraines (mobiles légères) **Figure 24** ; Unités de production fixes (Mohemed, 2007).

Tableau I-2: Brique de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle (Soumia, 2015)



1.2.8.4 Les produits :

Les modes de production et types de presses actuellement disponibles sur le marché s'ouvrent sur la réalisation de quatre grandes catégories des produits, les blocs pleins, Les blocs creux Les blocs spéciaux (Mohemed, 2007).

1.2.8.5 Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Bachir, 2014) :

- ❖ **Blocs pleins** : Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.
- ❖ **Blocs creux** : On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

- ❖ **Blocs alvéolaires** : Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.
- ❖ **Blocs à emboîtements** : Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.
- ❖ **Blocs parasismiques** : Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.
- ❖ **Blocs spéciaux** : Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.



Figure I-32 Différents produits de blocs de terre comprimée (Ahmed & Lakdar, 2018)

I.2.8.6 Avantage :

- ✓ La BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
- ✓ La BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de part son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique.
- ✓ La BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60kg/cm²).
- ✓ La BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
- ✓ La BTC est simple à mettre en oeuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre (Soumia, 2015).

I.2.8.7 Inconvénients :

- ✓ Fabrication des briques longue et fatigante.
- ✓ Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite.
- ✓ Se détériore sous l'effet du gel (Hachem, 2017).

stabilisation aux liants minéraux (ciment et chaux) , durabilité, Techniques constructives, Ceci nous permettra, dans un second temps, de dégager la problématique de notre étude.

I.2.9 Stabilisation:

I.2.9.1.1 Définition:

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière.

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en oeuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé.(Oussama, 2018)

I.2.9.1.2 Objectifs

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont :

- L'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- La réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),
- l'amélioration de la résistance a l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité a l'eau.(Taallah, 2014)

I.2.9.1.3 Procédés :

On dénombre trois procédés de stabilisation (Ahmed & Lakdar, 2018)

a- Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

b- Stabilisation physique :

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

c- Stabilisation chimique :

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous produits industriels. Le

choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité .

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée .






1.2.9.2 Moyens de stabilisation :

Dans la littérature, on peut trouver diverses classifications, selon : la nature, la forme, etc. (Hanane, 2018), il y a six modes de stabilisations :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique

Tableau I-3 Moyens de stabilisation des terre remaniées (Hanane, 2018)

Stabilisant		Nature	Procédé	Moyens	Principe	Symbole
Sans apport de stabilisant		Mécanique		Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires	
		Stabilisants inertes	Minéraux	Physique	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement
Fibres						
Avec apport de stabilisant	Stabilisants physico-chimique	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement	
				Liaisonner	Former des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile	
	Hydrophobants	Chimique	Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux		
			Hydrofuger	Éliminer au maximum l'adsorption et l'absorption d'eau		

a) Principe

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment.

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée.

L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %). (Abdelhamide, 2018)

b) Mécanisme de stabilisation

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons la réaction avec lui-même : formation d'un mortier de ciment pur hydraté et la réaction avec le squelette sableux.

Réaction avec l'argile selon trois phases :

L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.

Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.

Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste mais plus lente (Yacoub, 2010).

1.2.9.3 Stabilisation à la chaux

1.2.9.3.1 Mécanisme de stabilisation

Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de bases :

- a) **Absorption d'eau** : plus remarquable en cas d'utilisation de la chaux vive. La chaux subit une réaction d'hydratation qui abaisse la teneur en eau du mélange.
- b) **Echange cationique** : L'addition de la chaux à une terre humidifiée correspond à un apport important d'ions de calcium. Par un phénomène d'échange cationique, ces ions de calcium se substituent aux cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) de la terre. La capacité d'échange cationique de la terre est déterminante dans ce phénomène.
- c) **Floculation et agglomération** : l'échange cationique et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle conduisent à la floculation et agglomération des particules fines de la terre. Ainsi, il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine de la terre. La structure et la texture de la terre changent.
- d) **Carbonatation** : la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.
- e) **Réaction pouzzolanique** : C'est le mécanisme le plus important influençant la stabilisation à la chaux.

Les propriétés de résistances du matériau sont dues essentiellement à une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et à la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates d'aluminium et de calcium qui ciment les grains entre eux (Abdelhamide, 2018)

1.2.9.4 Stabilisation mixte chaux-ciment

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques. On utilise d'abord la chaux seule a des faibles teneurs puis le ciment. Les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable donc plus apte a être mélange ensuite au ciment. Le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grande que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement. Il n'existe pas a notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement. Apparemment, on peut penser

que la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous. (Bachir T. , 2014)

La stabilisation à la *chaux* est apparue aux U.S.A. en 1920 pour les chaussées. Aujourd'hui, elle rencontre un intérêt croissant dans le domaine de la construction et principalement dans le cas de moulage par compression. L'ajout de chaux à la terre se fait dans les mêmes proportions que pour la stabilisation au ciment, c'est-à-dire un dosage de 6 à 12%. Ici par contre, contrairement au cas de la stabilisation au ciment, il existe pour chaque type de terre une quantité optimale. Différents types de chaux peuvent être mis en oeuvre mais on utilise principalement les chaux aériennes qui sont obtenues par cuisson de calcaires très purs. La chaux vive (CaO) est moins utilisée que la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ même si elle est plus efficace que la seconde à poids égal, car elle nécessite des conditions de stockage et de transport particulières. La chaux hydraulique naturelle (XHN) et la chaux hydraulique artificielle (XHA) quant à elles ne sont utilisées qu'en dépit d'une autre chaux disponible. La stabilisation à la chaux peut se décomposer en cinq mécanismes. Le premier est l'absorption d'eau de la terre humide par la chaux. Cette hydratation est accompagnée par un important dégagement de chaleur. Le second est l'échange cationique des ions de calcium de la terre humide : ceux-ci se substituent aux cations échangeables de la terre. Le troisième est la floculation et l'agglomération des particules de terre suite au nombre plus important d'électrolytes dans l'eau interstitielle dû à l'échange de cations précédant, ce qui entraîne un changement de texture et de structure. Le quatrième mécanisme est la carbonatation : « la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres ». Le dernier mécanisme est la réaction pouzzolanique. Celle-ci est très importante car c'est elle qui influence le plus les performances de la stabilisation à la chaux. Cette dernière produit en effet un environnement alcalin au pH élevé dans lequel se dissolvent les minéraux argileux. La silice et l'alumine des argiles se recombinaient alors avec le calcium, formant des silicates d'aluminium et de calcium qui vont cimenter les grains entre eux. La stabilisation à la chaux nécessite donc une terre argileuse contenant principalement des silicates d'alumine, de la silice ou des hydroxydes de fer. La présence de matières organiques dans la terre est moins problématique que dans le cas de la stabilisation au ciment : ici, des terres contenant jusqu'à 20% de matières organiques peuvent être utilisées. Par contre, les sulfates sont néfastes à l'état humide (Hadda & Ikram, 2018).

1.2.9.5 Stabilisation par fibres

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage,

avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pise. Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement.

Dans le reste de ce chapitre, nous allons passer en revue les principales fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites en général et les briques de terre fibrée et le renforcement des sols en particulier (Bachir T. , 2014).

Les fibres

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite (Bachir T. , 2014).

Différents types de fibres

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille (Bachir T. , 2014) :

a. Les fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1.35):

– **Les fibres végétales** : l'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales comprennent :

- des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ;

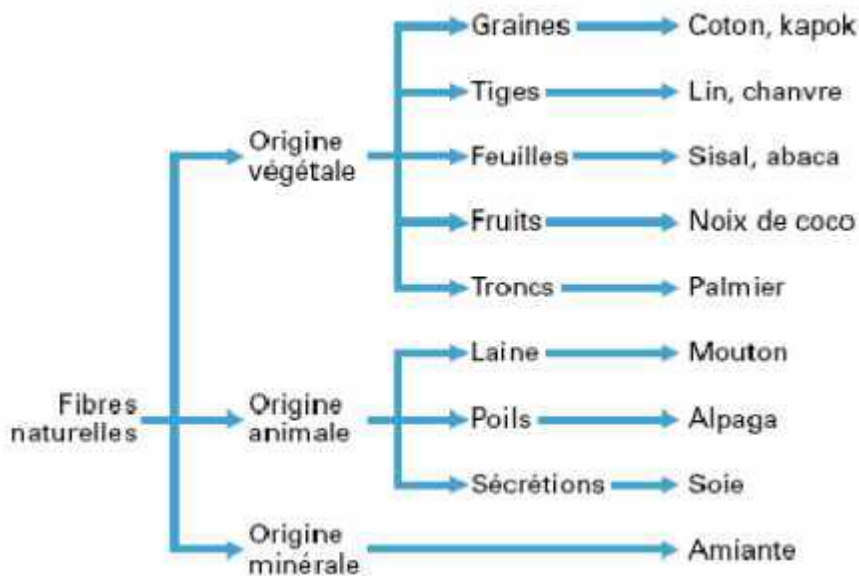


Figure I-33 Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Bachir T., 2014)

– **Les fibres animales** : La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997). Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire,...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée ;

– **Les fibres minérales** : L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérigènes qu'elle présente.

b. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage .

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont:

- Les polyamides (Nylons) ;

- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfinés : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques.

c. Fibres artificielles :

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

1.2.9.6 Le compactage de la terre

Le compactage est une phase essentielle pour l'amélioration de la performance des échantillons. Cela entraîne d'une part une augmentation de la densité de l'ensemble de compactage, et d'autre part une diminution de sa porosité et de sa perméabilité qui sont toutes les trois parmi les caractéristiques très importantes dans la géotechnique (Néhémson, 2015).

1.2.9.6.1 Les moyens de compactage

Pour compacter nos briquettes d'essais, nous avons deux moyens de compactage (Néhémson, 2015):

a) Presse manuelle :

Le système est équipé d'une manivelle métallique permettant d'appliquer une pression aux échantillons à comprimer.

L'avantage de cette méthode de compactage c'est qu'elle est très facile à mettre en oeuvre ; mais l'inconvénient c'est que la pression exercée n'est pas constante.

b) Presse CBR :

la Presse CBR. Les forces de pression que

Types de compactage :

Pour la fabrication de BTC, le compactage est en général produit par la mise en compression de la terre dans un moule, via une presse.

Le **compactage dynamique** est utilisé en géotechnique routière lors de la mise en oeuvre du sol pour la construction des ouvrages :

- remblais routiers.
- remblais de voies ferrées.
- digues et barrages en terre.
- plates-formes pour bâtiment.

Pour optimiser le compactage, il existe deux grands types d'essais correspondant à des modes opératoires de compactage sur chantier :

- essai Proctor normal.
- essai Proctor modifié.

Ces deux essais permettent d'étudier et/ou optimiser la mise en oeuvre des matériaux, sans permettre d'étudier leur comportement en service.

Le compactage statique. Il consiste à imprimer un effort croissant sur un matériau, de façon à le comprimer dans un moule. Dans « l'essai de compactage statique », le matériau est compacté de façon quasi-statique, et permet la fabrication d'éprouvettes homogènes qui serviront, d'une part pendant le compactage pour déterminer les paramètres de mise en oeuvre, et d'autre part pour l'étude du comportement en service (R_c , R_t ...).

La vibro-compression

Ce mode de compactage associe la vibration du moule et l'application d'une charge de compression, en général assez faible. Il est utilisé pour la mise en oeuvre des produits béton. l'eau (Ouarda, 2016)

1.2.9.7 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydrate (C-S-H), qui sont à l'origine des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique (Laib, 2017).

1.2.9.7.1.1 Laitier de haut fourneau

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de l'élaboration de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. On peut obtenir deux types de laitier de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier cristallise obtenu par refroidissement lent
- Le laitier vitrifié (granule) obtenu par refroidissement rapide, par trempe.

L'origine des deux types de laitier est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leur cristallographie et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation. Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente. Au contraire, le laitier cristallise a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste.

Production du laitier granule

La matière première du laitier moulu est un matériau secondaire issu de la fabrication de la fonte. Le minerai de fer (constitué essentiellement de silice, d'oxyde de fer et d'alumine) et le fondant (chaux CaO et dolomie MgO) sont portés à haute température (1400 à 1600°C) dans un haut-fourneau. La fonte est obtenue par cette opération de fusion. La gangue liquéfiée du minerai, de densité plus faible, vient en surface de la fonte en fusion et peut, de ce fait, être récupérée par écoulement séparé. À la sortie du haut-fourneau, cette gangue (le laitier de haut-fourneau) est soumise à un refroidissement brutal : la trempe, généralement effectuée à l'aide de jets d'eau sous forte pression. Sous l'effet de cet abaissement très rapide de la température, le laitier se solidifie et forme des « granules » de dimension comparable à celle d'un sable (moins de 5 mm) : le matériau obtenu, le laitier granule de haut-fourneau, est vitreux et possède des propriétés hydrauliques latentes.

. Caractéristiques chimiques et mineralogiques

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95% à 97% des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre.

En ce qui concerne la mineralogie, le laitier est caractérisé par une phase amorphe très majoritaire, de l'ordre de 90%. Pour les 10% restant, on parle alors de germes de cristallisation.

Ces germes mineralogiques sont essentiellement des silicates ou des silicoaluminates de chaux .

Reactivité hydraulique du laitier

La réactivité du laitier de haut fourneau dépend de plusieurs paramètres :

La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie pour un dosage inférieur à 15%, mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse .

La surface spécifique a un rôle prédominant sur la réactivité hydraulique du laitier.

Plus la finesse du laitier est élevée, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées. La mineralogie du laitier a un effet sur sa réactivité hydraulique par le taux de vitrification.

En effet la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin. De ce fait, le laitier possède une énergie plus élevée qu'à l'état cristallin. L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides . Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent.

Hydratation du laitier

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant. Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier. Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution - concentration - précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à l'hydratation maximum des grains de laitier voir (Figure I. 28). L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. Cette précipitation fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés.



Figure I-34 Prise du laitier (Laib, 2017).

Activation du laitier

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfato-calcique (ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate. La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux, le ciment et les sulfates agissent comme des réactifs.

Utilisation

Le laitier de haut fourneau granule est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granule peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable. Il est à noter que très peu de chercheurs ont exploré l'utilisation du laitier de haut fourneau comme ajout minéral dans les BTC.

I.3 Classification géotechnique des sols

I.3.1 Principe des classifications des sols

Les systèmes de classification des sols sont nés du besoin des ingénieurs civils de disposer de renseignements suffisamment fiables sur le comportement des sols pour pouvoir prendre des décisions rapides et efficaces, surtout dans les domaines de construction routière et des infrastructures des pistes d'atterrissage ou des barrages. Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent de grouper de très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. (Kasongo wa Mutombo Portance, Elysée, Libasse, & Marie, 2019)

Ces coupes sont précieuses pour l'ingénieur. Elles viennent compléter les données de la géologie, qui n'entraînent pas celles de la géotechnique : des sols de même origine géologique peuvent avoir des propriétés géotechniques très différentes, et réciproquement.

Cependant, un système de classification ne peut remplacer ni la reconnaissance géotechnique sur le site ni les essais de mesure des propriétés mécaniques du sol, sur place ou en laboratoire

Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols :

— les uns sont basés sur l'aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. Ces classifications présentent en général l'inconvénient de ne pouvoir être étendues à d'autres usages que celui pour lequel elles ont été établies ;

— les autres sont basés sur certains essais d'identification. Parmi ces systèmes, plusieurs se réfèrent uniquement à la granularité du sol (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés. D'autres utilisent simultanément la granularité et la plasticité du sol. On décrira ici l'une de ces classifications, dite « classification des laboratoires des ponts et chaussées » ou « classification LPC », qui n'est autre que la classification USCS (*Unified Soil Classification System*), adaptée aux seuils granulométriques utilisés en France (1965), puis la classification LPC modifiée pour mieux décrire les sols contenant des matières organiques (1974/1980). La classification des sols pour les terrassements routiers, qui est utilisée en France pour les études de

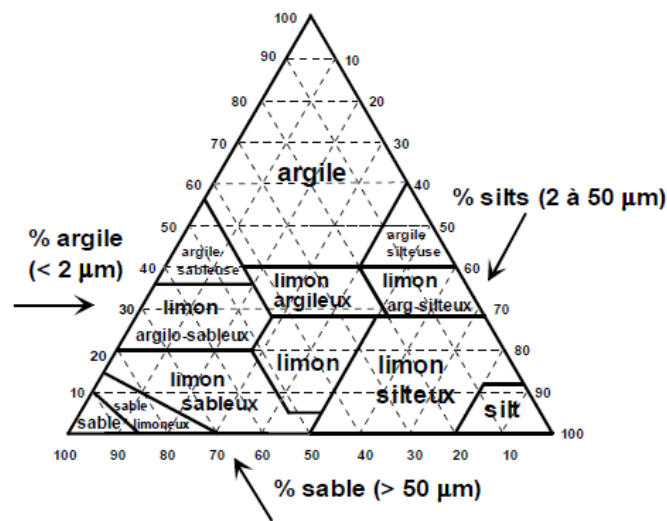
terrassements et est souvent utilisée dans les rapports d'études géotechniques de tracés, sera ensuite présentée.

I.3.2 Classification triangulaire

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol.

Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle. Utilisons le diagramme de la figure.2.6 pour classer un sol comportant 41% d'argile, 42% de sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions,

mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi



mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande.

l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols.

Figure I-35 : Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

I.3.3 Classification (LPC/USCS) des sols

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- des critères granulométriques :
 - les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamis à 2 mm et 0,08 mm);
 - la forme de la courbe granulométrique :
- coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u ,
- coefficient de courbure C_c (ou C_z);
- les caractéristiques de plasticité w_L et I_p , et la ligne A d'équation :
 $I_p = 0,73 (w_L - 20)$ (relation de Casagrande) ;
- la teneur en matières organiques.

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples de chantier. Mais il faut une grande expérience pour appliquer correctement cette méthode de classification de chantier.

Les groupes de sols : Le système de classification LPC débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres, prises dans les trois ensembles suivants :

Tableau I-4 Les groupes de sols.

Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
G : Gravier. Le gravier est la fraction principale S : Sable. Le sable est la fraction principale L : Limon ou limoneux A : Argile ou argileux T : Tourbe O : Organique. Le sol contient des matières organiques	b : Bien gradué m : Mal gradué	t : Très plastique p : Peu plastique

La figure I-36 donne la classification des sols fins et le tableau I-3 la classification des sols grenus.

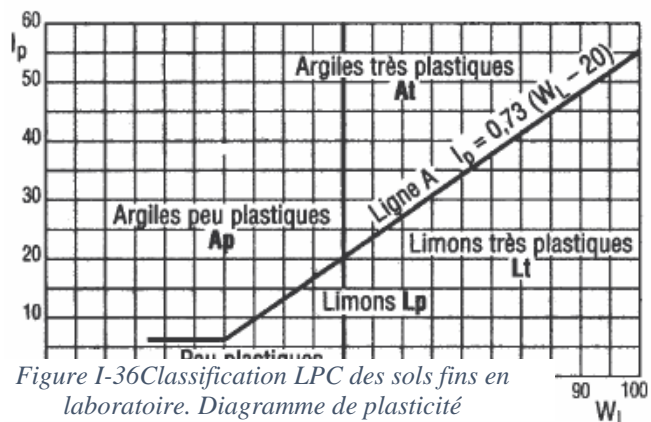


Figure I-36 Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité

Tableau I-5 Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm)

Définitions	Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations

Graves	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	Cu = D60/D10 > 4 et 1 < Cc = (D30) ² /D10D60 < 3	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave limoneuse
			GA (GC)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave Argileuse
Sable	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	Cu = D60/D10 > 6 et 1 < Cc = (D30) ² /D10D60 < 3	Sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Sable Argileux

Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL

I.3.4 Classification LPC modifiée

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %). Seuls les sols comportant moins de 10 % de matières organiques continuent d'être classés comme les sols fins. Pour les teneurs en matières organiques plus fortes, l'accent est mis sur le degré de décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test de von Post. La classification débouche sur vingt-deux types de sols, qui sont :

- des sols grenus : Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, SL
- des sols fins : At, Ap, Lt, Lp
- des sols faiblement organiques : fO-At, fO-Ap, fO-Lt, fO-Lp
- des sols moyennement organiques : mO-a, mO-sf, mO-f
- des sols très organiques : tO-a, tO-sf, tO-f.

Les symboles des sols grenus et des sols fins sont les mêmes que dans la classification LPC/USCS. Pour les sols organiques, les symboles : a, sf et f signifient « à matière organique amorphe », « à matière organique semi-fibreuse » et « à matière organique fibreuse ». L'Annexe 2 présente le schéma général de la classification des sols LPC modifiée (1974/1980), et détaille les modifications apportées par rapport à la classification LPC/USCS

2.4.5 la classification GTR

résistance et plusieurs éléments ont été prises en considération pour présent des axes de recherches :

I.3.5 Durabilité de la BTCS dans les conditions de laboratoire et exposition en conditions climatiques. (Avec 4 types des stabilisants)

(Walker, 1995) a mené une enquête approfondie entreprise pour évaluer l'influence des caractéristiques du sol et de la teneur en ciment sur les propriétés physiques des blocs de sol stabilisés. La densité à sec, la résistance à la compression et à la flexion, la durabilité et le retrait au séchage, il a utilisé plus de **1500 tests de bloc** pour développer des directives empiriques sur les exigences de teneur en ciment pour une

Plasticity Index	Recommended cement content (% Vol.)		
	1 N/mm ²	2 N/mm ²	3 N/mm ²
< 15	5%	7%	10%
15-20	5%	10%	Unsuitable
20-25	6.5%	Unsuitable	
25-30	8.5%		
30-35	10%		
> 35	Unsuitable		

gamme de caractéristiques de plasticité du sol. Une relation empirique entre la résistance à la compression et à la flexion est proposée comme moyen simple d'évaluation sur le terrain.

La résistance et la durabilité de la terre peuvent être considérablement améliorées par l'ajout de différents stabilisants. (A. Guettala, A. Abibsi, & H. Houari, 2006) ont utilisé quatre types des stabilisants : ciment, chaux, ciment plus chaux et ciment plus résine, puis évalués par divers tests de laboratoire ainsi que dans des conditions climatiques réelles. En général, **il a été noté que tous les murs traités ne présentaient aucun signe de détérioration après 4 ans d'exposition dans des conditions climatiques réelles** même si les conditions des tests en laboratoire sont plus sévères par rapport aux conditions de climat naturel de la région de Biskra où ces travaux ont été effectués. Parmi les 4 stabilisateurs testés, **le ciment plus la résine** ont montré le meilleur comportement de **durabilité**.

Le principal inconvénient de la terre est sa détérioration sous l'action des conditions climatiques.

L'objectif de (Izemmourena & Guettala, 2014) est fixé principalement sur l'**amélioration des caractéristiques des briques de terre comprimée**, surtout la sensibilité à l'eau.

La stabilisation est obtenue par **correction granulométrique** réalisée par deux types de sable concassée avec **cinq teneurs 0, 10, 20, 30, 40%** du poids du sol, en fixant le dosage en **ciment à 5%** et la **contrainte** de compactage à **100 bars**. Il on a étudié l'influence des différents teneurs en sable concassée sur les **résistances mécaniques** de compression à l'état sec et à l'état humide, sur **la durabilité, l'absorption capillaire, l'absorption totale, l'action gel-dégel**. Les résultats

obtenus montrent que l'augmentation de la **concentration du sable** améliore considérablement **les résistances mécaniques** et présente **un optimum de 30% de sable** pour les essais de **durabilité**.

L'étude de (Narayanaswamy, Walker, Reddy, Heath, & Maskell, 2020) se concentre sur l'utilisation de **l'activation alcaline et des déchets** dans les produits de construction en terre pressée. Les résultats expérimentaux des propriétés mécaniques et thermiques sont présentés. Les impacts environnementaux sont également comparés dans une analyse du cycle de vie avec une discussion des aspects pratiques de la construction. Les déchets de construction et de démolition présentent un potentiel, avec du laitier de haut-fourneau traité, avec des cendres volantes, particulièrement prometteur pour la stabilisation activée.

Conductivités thermiques des matériaux utilisant le laitier de haut fourneau traité étaient nettement inférieurs. Les blocs de terre compressés activés par des alcalis semblent les plus prometteurs pour réduire le potentiel de réchauffement planétaire de la construction en terre stabilisée.

I.3.6 Effet du taux de stabilisation de la BTCS sur l'environnement

Dans leur discussion sur un article consacré à la «stabilisation» de la terre crue avec du ciment Portland (Marsh, Heath, Walker, Reddy, & Habert, 2020), précisent que malgré dans de nombreuses situations, les matériaux de terre continueront d'être utilisés sans avoir besoin de stabilisants, il continuera à y avoir des situations dans lesquelles les matériaux de terre stabilisés au ciment sont la meilleure solution ou acceptée. En Australie-Occidentale, par exemple, la stabilisation du ciment a sans aucun doute soutenu une acceptation plus large des méthodes de construction en pisé. Pour trouver la solution avec le moins d'impact environnemental, les métriques basées sur la résistance sont un outil informatif pour nous aider à comparer les systèmes de matériaux, mais cela doit être équilibré avec la prise en compte du contexte structurel dans lequel ils sont utilisés, ainsi que des aspects plus larges, y compris la criticité des ressources, la durabilité. et le confort intérieur.

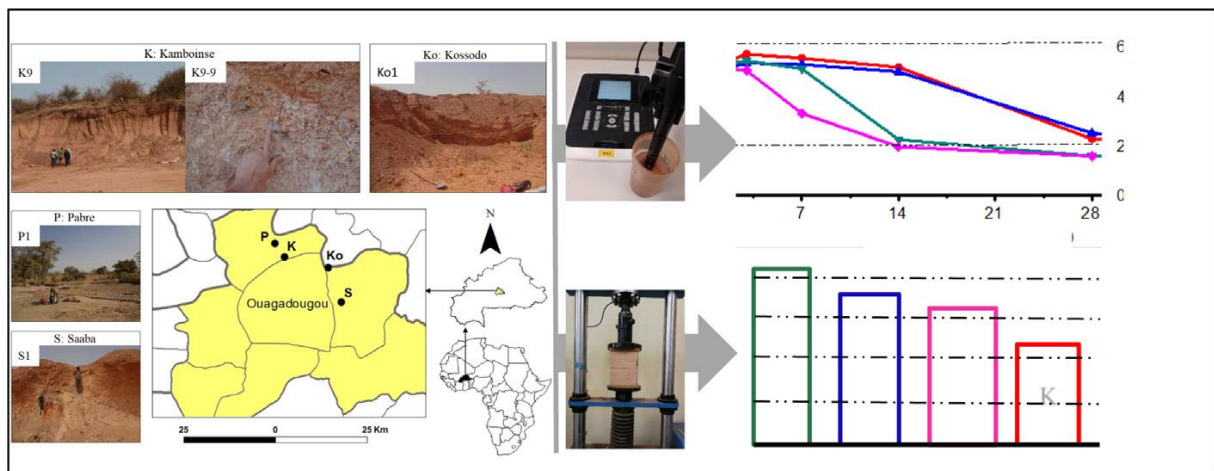
Mais (Damme & Houben, 2020) pensent toujours qu'il était important d'avertir les constructeurs que, compte tenu du caractère massif de l'architecture en terre, mélanger la terre avec des quantités même « **modérées** » de ciment n'est pas une opération respectueuse de l'environnement. Il nuit considérablement à son impact

environnemental exceptionnellement faible et à sa recyclabilité unique du berceau au berceau, une propriété qui, à mesure que nous nous dirigeons vers une économie circulaire, pourrait bien s'avérer aussi importante que la durabilité, sinon davantage.

Pour certains chercheurs aussi il n'est pas cohérent sur le plan environnemental de stabiliser la terre en utilisant plus de 4% du liant minéral (ciment ou chaux). Ainsi, (Ouedraogo, Aubert, Tribout, & Escadeillas, 2020) en étudiant les effets de faibles teneurs en liants minéraux (2 et 4%) sur les propriétés des briques de terre, ils ont obtenus sur deux sols différents que ces effets ne sont pas observables pour les résistances à la compression à sec ou pour les conductivités thermiques à sec mais l'ajout de petites quantités de liants minéraux modifie significativement **la résistance à l'eau** et la Valeur du tampon d'humidité (Moisture Buffer Value).

I.3.7 Propriétés Physico-chimique et Minéralogique

(Nshimiyimana, Fagel, Messan, Wetshondo, & Courard, 2020) ont mené une recherche sur la caractérisation des propriétés physico-chimiques et minérales des matériaux argileux du Burkina Faso pour produire des blocs de terre comprimée stabilisée (CEB). La réactivité des matériaux argileux a été testée sur la base de la **conductivité électrique des solutions** et de la **résistance** à la compression des CEB stabilisés avec 0 à 20% en poids de CCR (résidu de carbure de calcium) et durcis pendant 45 jours à 40 ± 2 C. Pabre et Kossodo contiennent respectivement les fractions les plus élevées d'argile (20–30%) et de gravier (40%). Saaba et Pabre contiennent la teneur la plus élevée en **kaolinite** (60–70%) et en **quartz** (45–60%) et ont enregistré respectivement la **réactivité la plus élevée et la plus faible**. La résistance à la compression des CEB s'est stabilisée avec 20% de CCR amélioré par dix (0,8–8,3 MPa) pour Saaba et seulement 2,6 (2–7,1 MPa) pour Pabre. Les matériaux argileux de la présente étude conviennent pour produire des CEB stabilisés CCR pour la construction porteuse.



I.3.8 Effet de l'activation alcaline et des déchets des produits de constructions sur la stabilisation des BTCS (A4)

Une étude présentée par (Narayanaswamy, Walker, Reddy, & Al, 2020) examine l'utilisation de l'activation alcaline et des déchets dans les produits de construction en terre comprimée stabilisée. Les impacts environnementaux ont été également comparés dans une analyse du cycle de vie avec une discussion plus large des aspects pratiques de la construction.

Les déchets de construction et de démolition présentent un potentiel sous forme d'agrégats, avec les scories de haut fourneau broyées traitées, ainsi que les cendres volantes, particulièrement prometteuses pour la stabilisation activée par les alcalis.

Les conductivités thermiques des matériaux utilisant le laitier de haut fourneau traité étaient sensiblement plus faibles. Les blocs de terre comprimée activés par des alcalis semblent les plus prometteurs pour réduire le potentiel de réchauffement planétaire de la construction en terre stabilisée. (Narayanaswamy, Walker, Reddy, & Al, 2020)

I.3.9 Propriétés mécaniques des blocs de terre comprimés (A15)

Actuellement, les blocs de terre comprimée (CEBs) deviennent plus intéressants en raison de leurs caractéristiques de durabilité. Cependant Il n'y a toujours pas de consensus sur la procédure pour mesurer ses propriétés mécaniques. Ainsi, une étude avancée sur la mesure des propriétés mécaniques d'un type de CEB a été menée par (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).

En ce qui concerne la résistance à la compression, des blocs et des cubes de différentes longueurs de bord ont été testés sous différents états de contact. Les résultats montrent que le bloc entier recouvert de caoutchouc est la procédure appropriée pour obtenir la résistance réelle à la

compression. De plus, il existe un effet de taille anormal, qui pourrait être lié à un éventuel endommagement des cubes découpés dans les blocs (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).

I.3.10 Essais de l'effet de l'environnement sur des murs en maçonnerie

À l'heure actuelle, il existe un marché en croissance pour les bâtiments aux murs en terre, les entreprises de construction commerciale ayant tendance à utiliser des matériaux stabilisés plus durables, en particulier dans le domaine des pics de terre pressée stabilisée au ciment et de la terre battue. Divers travaux ont été réalisés afin d'évaluer différents stabilisants ainsi que d'améliorer les propriétés des matériaux. (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006).

Plusieurs chercheurs recommandent l'utilisation d'une terre qui ne contient pas un excès de gros éléments et une exposition d'une face suffisamment lisse sur laquelle l'eau aura moins d'action afin d'obtenir une bonne résistance dans le temps.

Les différents tests de vieillissement accéléré permettent de comparer les performances des différents stabilisants utilisés dans des conditions d'exposition en laboratoire. Ces tests sont rapides mais sujets à controverse car on ne peut pas simuler en laboratoire la succession complexe du phénomène climatique multiple : pluie, soleil, température, humidité, vent. Cependant, peu de travaux ont été effectués pour corréliser les performances des échantillons dans des conditions similaires à celles des bâtiments réels (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006).

(Guettala, Abibsi, & Houari, 2006) ont présenté un programme visant à la réalisation de murs expérimentaux réalisés dans le laboratoire de matériaux de l'Université de Biskra, Algérie. Ce programme consiste à comparer les performances de différents additifs : ciment, chaux, ciment + chaux et ciment + résine.

Le projet consiste à construire 8 murs sur le toit de l'Université à l'aide de différentes briques stabilisées puis à évaluer leurs performances dans des conditions climatiques réelles. Les briques ont également été évaluées en conditions de laboratoire afin d'établir une corrélation entre les deux différentes méthodes d'évaluation.



Figure I-39 Vue générale des murs en briques de terre (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006)



Figure I-38 Mur Après 48 mois d'exposition avec 5% stabilisant (ciment) (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006)

Les constructions en maçonnerie ont été introduites pendant la période de civilisation mésopotamienne (environ 5000 à 3500 avant notre ère). À cette époque, des briques et des dépôts alluviaux étaient utilisés à des fins de construction. Actuellement, les briques sont le matériau de construction le plus couramment utilisé pour la construction en maçonnerie. Selon une enquête du Département du recensement et des statistiques, au Sri Lanka, environ 6,09 milliards de briques ont été utilisées en 2015 pour des travaux de construction. (Malkanthi, Balthazaar, & Perera, 2020)

Les blocs de terre stabilisée comprimée (CSEB) sont des blocs nouvellement introduits en raison des problèmes identifiés avec les briques d'argile cuites. Le principal problème concernant les briques est l'émission de CO₂ au cours du processus de fabrication des briques, ce qui entraîne de nombreux problèmes environnementaux, tels que les pluies acides et réchauffement climatique. (Malkanthi, Balthazaar, & Perera, 2020)

Construire avec des blocs de terre comprimée (CEB) devient plus populaire en raison de leur procédé respectueux de l'environnement, de leur faible coût et de l'abondance relative des matériaux à l'heure actuelle. (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

Un nombre considérable de pays ont actuellement des normes de construction en terre. La plupart d'entre eux traitent d'une ou, dans certains cas, de plusieurs de ces trois techniques : l'adobe, la terre battue et le CEB. Le CEB représente la technique la plus étudiée, étant présent dans près des trois quarts des normes considérées (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).

La plupart des normes CEB montrent que la résistance à la compression est un paramètre important pour concevoir des constructions. Cependant, ces normes présentent des différences notables quant à leur procédure mesurer la résistance à la compression (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).

Il convient de noter que plusieurs variables peuvent influencer les résultats obtenus, tels que la géométrie de l'unité, les conditions de surface de l'échantillon, l'humidité et le contenu du ciment. En ce qui concerne la géométrie de la CEB pour le test de compression, il existe deux manières dominantes présentées dans les normes. Premièrement, les blocs sont coupés en deux et empilés liés en utilisant un joint de lit de mortier de terre pour doubler le taux d'élanement de l'éprouvette, comme expliqué dans les normes de la Colombie [7], de la France [31], du Brésil [22] et du RILEM TC 164 [34]. (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

Deuxièmement, des blocs entiers sont testés directement entre les lattes et en suivant la direction dans laquelle ils ont été pressés pendant la fabrication. C'est également la direction habituelle dans laquelle les blocs sont placés pendant la construction, comme présenté dans la norme espagnole UNE 41410 [6]. De plus, les résultats expérimentaux montrent qu'il n'y avait pas de parité entre la résistance du bloc entier et celle conforme à la recommandation RILEM [35]. (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

Dans la mesure où l'état de la surface de l'échantillon, en général, les blocs ne sont pas parfaitement formés et leurs surfaces d'appui peuvent ne pas être parallèles et exempt d'irrégularités de surface. Le but de plafonner les surfaces d'appui doivent garantir raisonnablement qu'elles sont parallèles et lisses. Mais, de nombreuses normes dans le test de compression ne mentionnent même pas ce fait. L'un des principaux matériaux utilisés pour résoudre ce problème est la feuille de contreplaqué, tandis que l'épaisseur de la feuille de contreplaqué varie de l'un à l'autre. La norme du Kenya [32] et Walker [36] ont proposé de recouvrir les spécimens de deux feuilles de contreplaqué de 3 mm d'épaisseur. Selon le Bulletin 5 [37], l'épaisseur des feuilles de contreplaqué varie de 4 à 5,5 mm. Walker et Stace [38] ont adopté des feuilles de contreplaqué de 4 mm d'épaisseur pour leurs tests. Ottazzi et al. [39] ont utilisé différentes méthodes pour obtenir des faces planes et parallèles en coiffant l'échantillon avec une couche de pâte de ciment de 3 mm d'épaisseur avec une consistance plastique. Comme mentionné précédemment, il est évident qu'il n'y a toujours pas de consensus sur la procédure utilisée pour mesurer la résistance à la compression de ce matériau. Ainsi, une étude approfondie sur la mesure des propriétés mécaniques d'un type de CEB a été réalisée. Une fois que la résistance à la

traction, le module d'élasticité et l'énergie de rupture sont obtenus, la longueur caractéristique sera déterminée, qui est un paramètre utilisé pour prédire la fragilité d'un matériau. À mesure qu'elle diminue, la nature fragile domine et vice versa. À notre connaissance, c'est la première fois que la valeur du paramètre est obtenue, ce qui serait utile pour la conception d'une telle structure afin d'éviter une rupture fragile. Concernant les essais de compression, trois différentes méthodes de capsulage (capsulage avec caoutchouc, contreplaqué et sans plafonnement) ont été adoptés. De plus, l'effet de taille sur la résistance à la compression a également été étudié. (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

Les procédures de construction ont un grand impact sur l'environnement. Cette détérioration se produit non seulement par la modification de l'environnement, mais aussi par les matériaux qui y sont utilisés [1]. (Gonzalez-Lopez, Jurarez-Alvarado, & Al, 2017)

Dans les pays où la croissance démographique est la plus élevée, il existe une forte demande de logements de faible hauteur. Cette demande ne peut être satisfaite même par les méthodes traditionnelles de construction de faible hauteur [2], qui génèrent également une grande quantité de déchets et d'émissions lors de l'extraction, de la fabrication, du transfert, de l'utilisation et de l'élimination typiques de l'économie linéaire. Une solution possible à ce problème est la construction avec des blocs de terre compressés (CEB) [3]. Ces matériaux de construction permettent un bâtiment à faible technologie de manière économique et durable et utilisent des matériaux de l'environnement. (Gonzalez-Lopez, Jurarez-Alvarado, & Al, 2017)

La construction avec la terre a ses origines dans les civilisations anciennes, et même aujourd'hui un grand art des habitations de faible hauteur du monde est construit avec des technologies simples qui utilisent la terre comme matériau de construction [4]. Cependant, la construction en terre a des problèmes différents dans sa fabrication et la performance, comme cela a été observé dans l'histoire [5]; il est toujours difficile d'améliorer les propriétés et la durée de vie de ces matériaux [6–8]. Par conséquent, l'utilisation extensive de la construction à base de sol peut être possible si les processus de construction deviennent standardisés, efficaces, et facilement reproductible grâce à la connaissance des conditions climatiques de chaque région [9]. Le Cinva Ram a été le premier des instruments à avoir poussé ce type de procédure de construction [10]. De plus, les performances de CEB, de pisé, d'adobe et de torchis ont été constamment évaluées afin d'identifier leurs performances dans des conditions où leurs propriétés sont compromises [11–17]. La construction avec CEB utilise le sol selon des distributions de granulométrie et des proportions de mélange de sable de silice et d'argile. Ces matériaux mélangés dans une quantité appropriée d'eau développera des propriétés de liant. le mélange réalisable est comprimé en blocs, généralement des élépipèdes, qui développent leur résistance en fonction de la force de compactage et de la quantité d'argile. Cependant, parce que ces blocs ont une résistance à la compression entre 1 et 7 MPa, ils échouent facilement dans des conditions de temps inclément [18–20]. (Gonzalez-Lopez, Jurarez-Alvarado, & Al, 2017)

Par conséquent, il est nécessaire d'ajouter différents matériaux pour stabiliser leurs performances [21,22]. La stabilisation peut être mécanique ou chimique et dépendra du type d'agent stabilisant et de la quantité ajoutée. Les stabilisants les plus courants sont le ciment Portland et la chaux. Les autres matériaux qui ont été testés comme stabilisants sont les composés synthétiques, les matériaux supplémentaires, les résidus, les fibres et les matériaux alcalins activés, entre autres [23,24]; même des matériaux à forte teneur en sel ont été utilisés [25]. La quantité et le type d'addition dépendront des caractéristiques du type de sol et des performances attendues du bloc stabilisé en terre comprimée fabriqué (CESB). Ainsi, l'accent mis sur ces matériaux est la réponse de leur durabilité et la corrélation avec les caractéristiques de fabrication de ces éléments [26-28]. Actuellement, des recherches sont en cours pour passer de la simple stabilisation du CEB à la fabrication de matériaux de construction de

sols avec une technologie similaire au béton, dans laquelle grâce à des additifs, il est possible de contrôler le comportement à l'état plastique et d'obtenir une résistance élevée dans des délais de production courts. Cependant, le débat sur la manière d'améliorer les performances de ces matériaux et leur contribution à la réduction de l'impact environnemental des bâtiments reste ouvert [29]. Le but de cette étude était de déterminer l'effet sur les blocs de terre comprimée de différentes

distributions granulométriques avec et sans stabilisateurs, et leur relation avec différentes forces de compactage et durabilité. Les forces de compactage et une distribution appropriée de la taille des particules aideront à réduire l'anisotropie des propriétés et la consommation de stabilisants utilisés dans les blocs de terre compressés. Dans la première partie de cette étude, la conception de mélanges sable-argile a été réalisée avec quatre tailles de particules de distribution différentes pour des tests sans stabilisants. Dans cette partie, l'effet de différentes forces de compactage sur la résistance à la compression a été analysé pour déterminer la distribution de granulométrie qui produit la résistance à la compression la plus élevée sans stabilisants. Un échantillon d'essai réduit a été utilisé compte tenu des restrictions du facteur d'aspect de la taille du bloc d'échantillon (taille plus longue / taille plus courte) signalées dans d'autres enquêtes [30,31]. Après avoir sélectionné la distribution granulométrique qui produit la résistance la plus élevée, deux stabilisants ont été ajoutés dans trois pourcentages différents pour déterminer l'effet avec les forces de compactage et analyser la teneur en stabilisant dans les performances concernant la résistance en fonction de la direction de compactage [32] et des tests de durabilité, tels que les coefficients d'abrasion (Ca) (33) et le coefficient d'absorption (Cb) [34]. Les résultats sont discutés en termes de réglementations relatives à ce type de produit [33–35] (Gonzalez-Lopez, Jurarez-Alvarado, & Al, 2017)

La terre crue est considérée parmi les matériaux de construction les plus anciens très utilisés par les populations. Les blocs de terre sont particulièrement la technique la plus répandue. Plusieurs avantages environnementaux, sociaux et économiques sont associés à ce matériau [1]. (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

Le processus de stabilisation de la terre crue fait référence à toute méthode mécanique (compactage), physique (incorporation de fibres, correction de la distribution des grains), physico-chimique (liants)... ou combinée de modification de la terre visant à améliorer sa résistance, son imperméabilité et sa durabilité [2]. Lors de la production d'unités de maçonnerie, le produit final est appelé blocs de terre stabilisés comprimés CSEB. Les blocs de terre comprimée principalement stabilisés avec du ciment ou de la chaux sont bien connus dans de nombreux pays et réussissent en raison de leur faible coût de mise en oeuvre, de leur simplicité dans le processus de production et de leur haute qualité intérieure [1,3,4]. (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

Cependant, les CSEB souffrent de certaines faiblesses liées à leur résistance et leur durabilité. Le matériau de base est une terre naturelle sensible à l'eau, qui a tendance à gonfler ou à rétrécir en fonction du degré hygrométrique ambiant. La durabilité à l'eau des blocs de terre compressée stabilisés au ciment et / ou à la chaux a été largement préoccupée par les chercheurs [2,5–9]. Des protocoles de tests multiples ont été développés dans ce contexte [10–12]. Cependant, peu d'études ont été menées sur les attaques chimiques liées aux sulfates. Les sulfates dans la nature se retrouvent

dans l'eau de mer, dans les eaux souterraines sous forme de K_2SO_4 , $MgSO_4$, Na_2SO_4 ..., dans les eaux usées industrielles, sous les pluies acides ou dans l'air sous forme gazeuse (SO_2) ou liées aux particules (cendres volantes micrométriques, suie nanométrique). Plus fréquemment, les sulfates sont présents dans les sols sous forme de gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ou de pyrite (FeS_2). Ces minéraux se forment en raison de l'évaporation des saumures ou du processus de dissolution, du transport et de la reprecipitation des sédiments pendant les périodes cycliques de séchage / mouillage [13,14]. (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

Les sulfates sont connus pour perturber les matériaux en béton. L'étude menée par (Chaibeddra&Kharchi, 2019) vise à évaluer l'impact des sulfates sur le CSEB fabriqué à partir de deux sols avec des distributions granulométriques différentes, et en incorporant du ciment et de la chaux comme stabilisants.

Le compactage a été effectué à l'aide de deux presses à mouler différentes. L'action des sulfates sur la résistance à la compression ainsi que sur la perte de masse après une durée spécifique d'exposition aux sulfates a été étudiée. Un accent a été mis sur la nature des constituants du CSEB et sur leur niveau de compactage. Les résultats ont été présentés et comparés pour sélectionner le mélange le plus résistant aux sulfates. (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

La succession de découvertes scientifiques et d'innovations dans le domaine de la construction a provoqué des changements dans les systèmes économiques publics de plusieurs pays développés. La demande de matériaux de construction durables à faible coût augmente à mesure que les problèmes sociaux, économiques et environnementaux évoluent dans la société actuelle. (Mostafa &Uddin, 2016)

En tant que patrimoine architectural, la maçonnerie en blocs de terre attire l'intérêt des ingénieurs pour la maintenance et la construction moderne car c'est un matériau à haut profil environnemental et économique. Au cours des cinq dernières décennies, les bâtiments en terre ont été les matériaux de construction les plus durables et les plus utilisés Pays en voie de développement. L'intérêt récent pour l'utilisation de matériaux naturels est dû à la demande croissante de logements à mesure que la population augmente et à faciliter la réduction de la consommation d'énergie dans le bâtiment. L'utilisation de la terre dans la construction de logements offre une très haute résistance au feu et offre un cadre de vie confortable grâce à sa haute valeur d'isolation thermique et thermique. Il offre également d'autres facteurs importants qui attribuent à la réalisation d'une bonne solution de planification / conception et construction de maisons [1]. Les techniques de construction en terre sont utilisées depuis des milliers d'années; le processus de formation de blocs en compactant la terre en moules est une technique ancienne, et les structures construites avec ces blocs ont résisté et duré pendant longtemps. (Mostafa &Uddin, 2016)

En Égypte, près de 95% des terres sont désertiques et la plupart des structures de construction actuelles sont concentrées sur seulement 5% des terres égyptiennes [2]. Par conséquent, la majorité de la construction actuelle est répartie verticalement à travers les bâtiments de moyenne et grande hauteur principalement en béton armé (RC), ce qui n'est pas non plus abordable pour la plupart des Égyptiens. En outre, le problème du logement en Égypte est un problème grave qui doit être résolu immédiatement. La nécessité de repenser la conception structurelle centenaire des logements et d'exploiter les matériaux émergents n'a jamais été aussi grande. En conséquence, le besoin de nouveaux matériaux de construction qui pourraient apporter des avantages de faible poids, de haute résistance et de coût abordable devient une urgence. En plus de ces nouveaux matériaux de construction, le terrain inutilisé de l'Égypte devrait être intégré en répartissant les structures du bâtiment horizontalement plutôt que verticalement à travers les bâtiments de faible hauteur à l'aide d'unités de maçonnerie porteuses. Pendant de nombreux siècles, des adobes de blocs de boue non brûlés moulés à la main ont été utilisés pour les structures de maçonnerie porteuses. Cependant, les adobes sont principalement utilisés pour les bâtiments résidentiels à un ou deux étages légèrement chargés [3]. (Mostafa &Uddin, 2016)

Les fibres telles que le sisal, la fibre de coco et la paille sont de bons exemples de fibres naturelles qui ont été utilisées comme renforcement pour les CEB et qui ont enregistré des résultats prometteurs. La fibre de polyéthylène est la fibre synthétique la plus populaire qui a été utilisée dans le CEB et dans

d'autres matériaux de construction comme le béton [4,5]. Néanmoins, la perte environnementale subie par la société en raison de la pollution générée lors de la production et du recyclage de ces matériaux à base de fibres synthétiques a encore une fois attiré l'attention. Ces systèmes représentent un potentiel important de réduction de la consommation de matières et de ressources énergétiques et des émissions de polluants. De plus, l'incorporation de déchets agricoles acheminés dans de nouveaux matériaux de construction peut réussir à détourner d'importants flux de déchets des décharges. Cette étude présente une nouvelle approche intégrée des matériaux, des tests expérimentaux et la conception des structures pour les zones non sismiques qui utilise les matériaux verts et la conception structurelle. Les résultats créent une réduction potentielle de la consommation d'énergie primaire et des émissions de CO₂ de manière significative. Les fibres de banane sont largement disponibles dans le monde entier de sorte de déchets agricoles provenant de la culture de la banane en raison de la décomposition des restes, émettant une énorme quantité de dioxyde de carbone et gaz méthane (voir Fig.1). (Mostafa &Uddin, 2016)

Ces émissions, qui augmentent le réchauffement climatique chaque année, ont un impact négatif sur l'environnement [6]. Les fibres de banane seront un nouveau bonus pour les matériaux de

construction. L'ajout de fibres de banane à la conception du mélange vise à augmenter considérablement la résistance interne du B-CEB par rapport au CEB. L'Égypte est un grand cas dans lequel ces plantes sont communément disponibles et génèrent des tonnes de déchets par an. Cette étude se concentrera sur l'effet des fibres de bananier sur les propriétés mécaniques des blocs. (Mostafa &Uddin, 2016)

Les constructions en maçonnerie ont été introduites pendant la période de civilisation mésopotamienne (environ 5000 à 3500 avant notre ère). À cette époque, des briques et des dépôts alluviaux étaient utilisés à des fins de construction [1]. (Malkanathi, Balthazaar, &Perera, 2020)

Actuellement, les briques sont le matériau de construction le plus couramment utilisé pour la construction en maçonnerie. Selon une enquête du Département du recensement et des statistiques, au Sri Lanka, environ 6,09 milliards de briques ont été utilisées en 2015 pour des travaux de construction [2]. Les blocs de terre stabilisée comprimée (CSEB) sont des blocs nouvellement introduits en raison des problèmes identifiés avec les briques d'argile cuites. Le principal problème concernant les briques est l'émission de CO₂ au cours du processus de fabrication des briques, ce qui entraîne de nombreux problèmes environnementaux, tels que les pluies acides et le réchauffement climatique. Les briques non cuites nécessitent moins d'énergie que les briques cuites et les émissions de CO₂ dans l'atmosphère sont 80% inférieures à celles des briques cuites [3]. Lorsque des CSEB sont utilisés, les émissions de CO₂ peuvent être contrôlées et les effets néfastes sur l'environnement peuvent être réduits. De plus, les coûts de fabrication des briques non cuites sont faibles par rapport à ceux des briques cuites [3]. Une comparaison des émissions de CO₂ et d'énergie entre les différents types de briques est présentée dans le tableau 1. Walker [4] a expliqué que la plupart des types de sols ont un manque de résistance, de durabilité et de stabilité dans des conditions naturelles. Par conséquent, les propriétés du sol doivent être améliorées en utilisant à la fois la stabilisation mécanique et chimique dans les CSEB. La stabilisation mécanique compacte le matériau du sol pour réduire les vides, et la stabilisation chimique ajoute des stabilisants au sol. Les stabilisants couramment utilisés sont le ciment, la chaux, les agents imperméables, les liants chimiques, le bitume, l'asphalte et les sous-produits naturels et industriels [4]. La chaux et le ciment sont les stabilisants les plus couramment utilisés pour la stabilisation dans la fabrication de blocs de terre stabilisés comprimés [1]. La chaux est utilisée depuis l'Antiquité comme stabilisateur de terre [5] et est actuellement utilisée pour la fabrication de CSEB [6]. Le ciment est le stabilisateur le plus populaire pour la stabilisation des blocs de terre. Compte tenu des procédés de fabrication du ciment et de la chaux, les émissions d'énergie

et de CO₂ sont élevées pour le ciment comme le montre le tableau 2 pour 1 m³ de matériau [7]. Par conséquent, la chaux a été choisie comme stabilisant pour cette étude. (Malkanthi, Balthazaar, & Perera, 2020)

I.3.11 Performance des blocs de terre stabilisés comprimés en milieu sulfaté

En Algérie, S. Chaibeddra, F. Kharchi ont étudié l'impact des sulfates sur le comportement des blocs de terre stabilisée comprimée (BTCS) produits à partir de deux sols de distribution granulométrique différente et stabilisés avec différents liants dont les ciments CEM II, CEM I résistants aux sulfates et à la chaux.

Les performances du matériau ont été examinées sur la base de l'évolution de la résistance à la compression et de l'aspect poids des blocs après durcissement chimique impliquant des sulfates.

Les résultats montrent que l'action des sulfates sur le BTCS est principalement régie par la nature du sol de base, mais dépend aussi du type de traitement et du niveau de compactage. Les produits de réaction au sulfate, notamment ettringite et le gypse ont une action néfaste sur la résistance à la compression du BTCS et sur sa masse autant que le sol de base contient de fines particules, et serait moins perturbateur lorsque le sol est de nature grossière. **Ces auteurs ont montré** que L'utilisation d'un ciment CEM I résistant aux sulfates pourrait atténuer les effets de dommages des sulfates sur les blocs, mais son efficacité est perceptible uniquement sur le sol grossier; sur les sols fins, ce type de ciment n'est pas efficace. D'un autre côté, l'expansion ultérieure liée à la formation de produits de réaction de sulfate (ettringite et gypse) est plus contraignante lorsque la densité des blocs est plus élevée et exerce une pression plus faible lorsque les blocs sont poreux (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

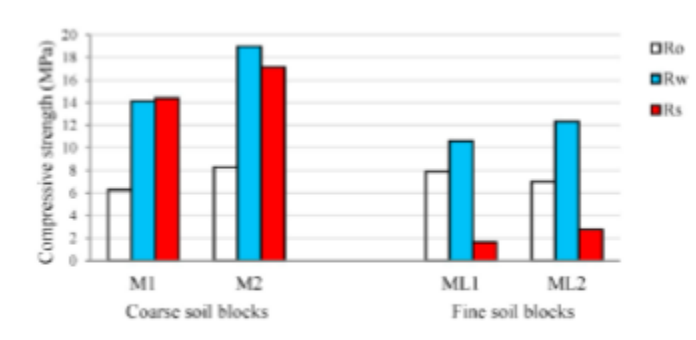


Figure I-40: Résistance mécanique à la compression des blocs de terre après cure chimique (Chaibeddra&Kharchi, 2019)

I.3.12 Etude des propriétés mécaniques des blocs de terre comprimés (Compression, Traction, Flexion)

Mesurer les propriétés mécaniques (résistance à la compression et module d'élasticité) de la maçonnerie réalisée à l'aide de la blocs de terre, une série de tests de petits prismes liés au prisme a

été réalisée. Les quatre prismes hauts en brique, Fig.4, ont été construits après que les blocs de ciment ont atteint 28 jours, ou les blocs activés par des alcalis ont été durcis à la chaleur pendant 3 jours (72 h) et séchés à l'air dans le laboratoire pendant environ 28 jours, et testé une fois que le mortier a atteint 28 jours supplémentaires à partir de la construction du prisme. Un mortier 1: 1: 6 (ciment: chaux: sable manufacturé, en volume) a été jugé approprié pour les résistances des blocs obtenues. Les blocs ont été posés avec un joint de mortier de 10 mm. Les prismes ont été recouverts en haut et en bas avec un ciment 1: 3: mortier de sable de rivière et durcis, enveloppés dans de la toile de jute,

pendant les 28 jours précédant le test. La résistance moyenne à la compression humide sur 28 jours du mortier de chaux de ciment 1: 1: 6 était de 5,3 N / mm². (Narayanaswamy, Walker, Reddy, & Al, 2020)



Figure I-41 Essai de compression pour déterminer le module d'élasticité (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

contreplaqué ont été placés entre le bloc et la platine. Les blocs ont été testés sous contrôle de charge, dans une machine d'essai uniaxiale, à un taux de 0,15 N / mm² / s jusqu'à la rupture. Comme pour les cylindres en pisé, les comprimés les blocs de terre ont été testés en deux phases : la série 1 a été testée à l'Indian Institute of Science, Inde après 3 jours (72 h) de durcissement thermique et séché à l'air pendant 28 jours (activé par les alcalis) ou 28 jours de durcissement (ciment et chaux) ; et la série 2 entre 200 et 230 jours après le compactage à l'Université de Bath, au Royaume-Uni. Pour chaque série de blocs, quatre prismes liés empilés ont été préparés pour les tests de compression. Les prismes n'ont été testés qu'à 28 jours de la construction et ont été immergés dans l'eau pendant 48 heures avant le test. Chaque essai a été réalisé à une vitesse de déplacement de 6 mm / s. Des extensomètres d'une longueur de 100 mm ont été utilisés pour mesurer la déformation longitudinale des échantillons sous chargement. (Nshimiyimana, Fagel, Messan, & Al, 2020)

(Nshimiyimana, Fagel, Messan, & Al, 2020)

Un minimum de trois blocs comprimés ont été testés en uniaxial compression pour chaque série. Les blocs n'ont été testés humides qu'après une immersion complète de 48 heures dans l'eau. Les grenouilles ont été remplies d'un ciment 1: 3: du sable de rivière, un mélange et des plaques de

Cependant, il n'y a toujours pas de consensus sur la procédure pour mesurer ses propriétés mécaniques. Ainsi, une étude avancée sur la mesure des propriétés mécaniques d'un type de BTCS a été menée par (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

En ce qui concerne la résistance à la compression, des blocs et des cubes de différentes longueurs de bord ont été testés sous différents états de contact. Les résultats montrent que le bloc entier recouvert de caoutchouc est la procédure appropriée pour obtenir la résistance réelle à la compression. De plus, il existe un effet de taille anormal, qui pourrait être lié à un éventuel endommagement des cubes découpés dans les blocs (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

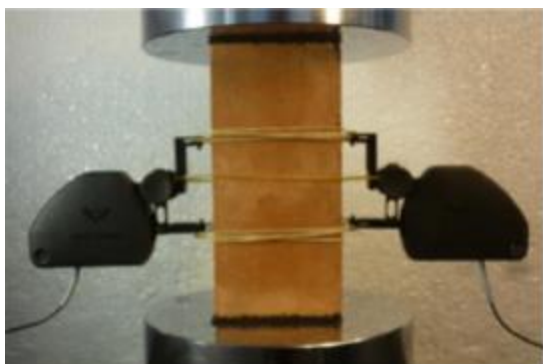


Figure 3 :

Figure I-42 Dispositif d'essai de flexion 3 points (Ruiz, Zhang, & Al, 2018)

I.3.13 Effets des Fibres de banane sur la résistance à la compression de la brique de terre

Le bloc de terre comprimé avec fibre de banane innovant a été proposé par (Mostafa & Uddin, 2016) se compose d'ingrédients BTCS ordinaires et de fibres de bananier. Les fibres de banane sont largement disponibles dans le monde en raison des déchets agricoles provenant de la culture de la banane.

En plus, les fibres de banane sont respectueuses de l'environnement et présentent des attributs importants, tels qu'une faible densité, un poids léger, un faible coût, une résistance à la traction élevée, en plus d'être hydrofuge et résistant au feu. Ce type de déchets a plus de chances d'être utilisé pour différentes applications dans la construction et les matériaux de construction afin d'améliorer les propriétés mécaniques des BTCS. Ces améliorations augmenteront le nombre d'étages d'un bâtiment pouvant être construit avec des BTCS. Des études expérimentales sur le BTCS classique sans fibres et le B-CEB ont été réalisées, y compris un essai de compression axiale et un essai de flexion (essai de flexion en trois points) en utilisant des méthodes d'essai selon les normes ASTM (American Society for Testing and Materials) (ASTM) C-67). (Mostafa & Uddin, 2016).

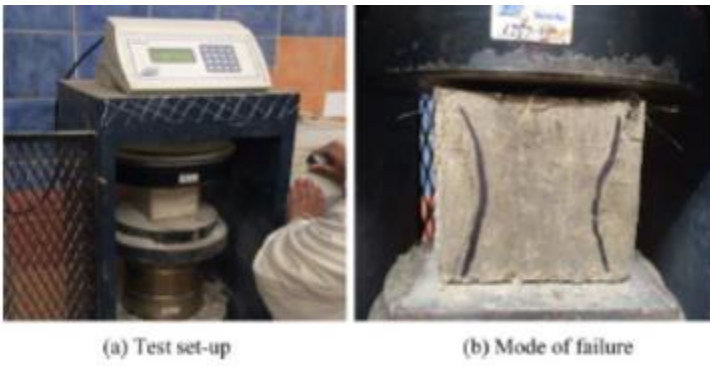


Figure I-43essai de résistance à la compression (Mostafa &Uddin, 2016)

Les résultats de cette étude mettront en évidence les tendances générales dans les propriétés de résistance des différents mélanges de conception en ajoutant différentes longueurs de fibres de bananier dans les CEB. Ces efforts sont nécessaires pour garantir que la technologie B-CEB qui devienne un matériau de construction plus largement accepté qui vérifiera la technologie de construction en terre pour offrir des maisons abordables (Mostafa &Uddin,

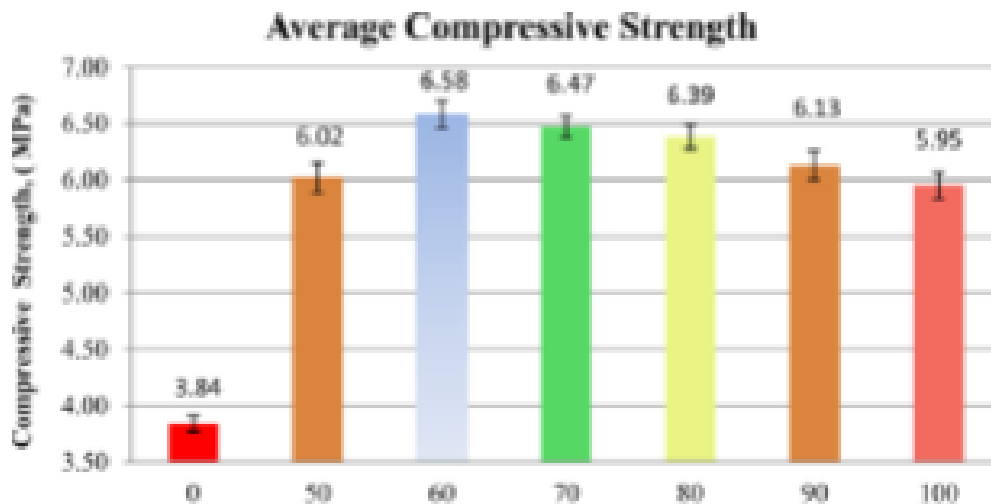


Figure I-44 Moyenne de la résistance de compression des BTCs (Mostafa &Uddin, 2016)

Mélange	Proportions	Relation
Argile	35%	Par rapport au mélange sec(A, S, G)
Sable	35%	
Gravier	30%	
Ciment	7%	Par rapport au mélange total sec
Fibre de banane	0% - 5%	Par rapport au ciment
Eau	10% - 12 %	

Figure I-45 proportion du mélange de la BTCS (Mostafa &Uddin, 2016)

Remarque : Un Tableau en annexe résume quelques travaux et recherches récents menés sur les :

- ✓ Les caractéristiques Mécaniques (compression, Flexion)
- ✓ Etude et Confort Thermique
- ✓ Effet des Ajouts : Poudre de brique ; Effet des fibres de bananes ; Matériaux Pouzzolaniques, Granulats recyclé de béton, Laitier haut fourneaux

I.4 Comparaison entre normes BTC : Résistance à La compression - Durabilité

(Mango-Itulamy, 2019) a réalisé une comparaison entre Les normes concernant l'usage des BTC trouvées dans la littérature concernant principalement la résistance à la compression.

dans certains pays, Il existe en effet depuis quelques années des normes d'utilisation des BTC en construction :

ARS (Afrique), ASTM E2392M-10 (Amérique), NBR (Brésil), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), KS 02-1070 (Kenya), IS 1725 (Inde), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), XP P13-901 (France), SLS 1382 (Sri Lanka), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique). Ces normes sont variables d'un pays à l'autre. La Fig.I-46 illustre un exemple de cette différence basée sur la résistance en compression minimale admissible.

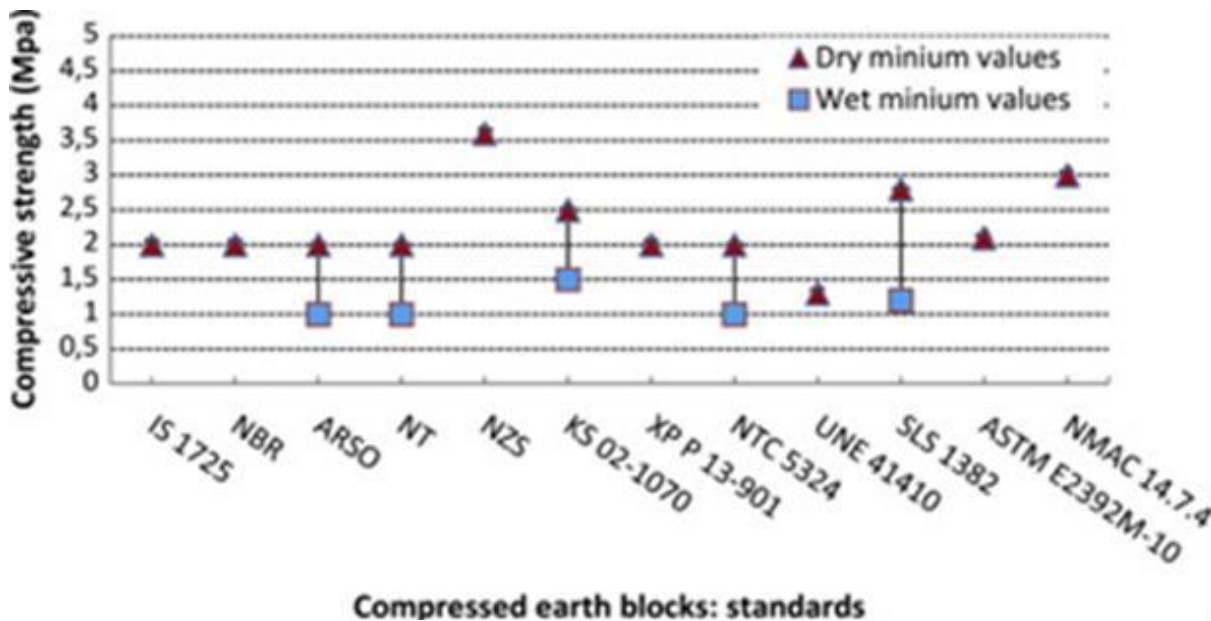
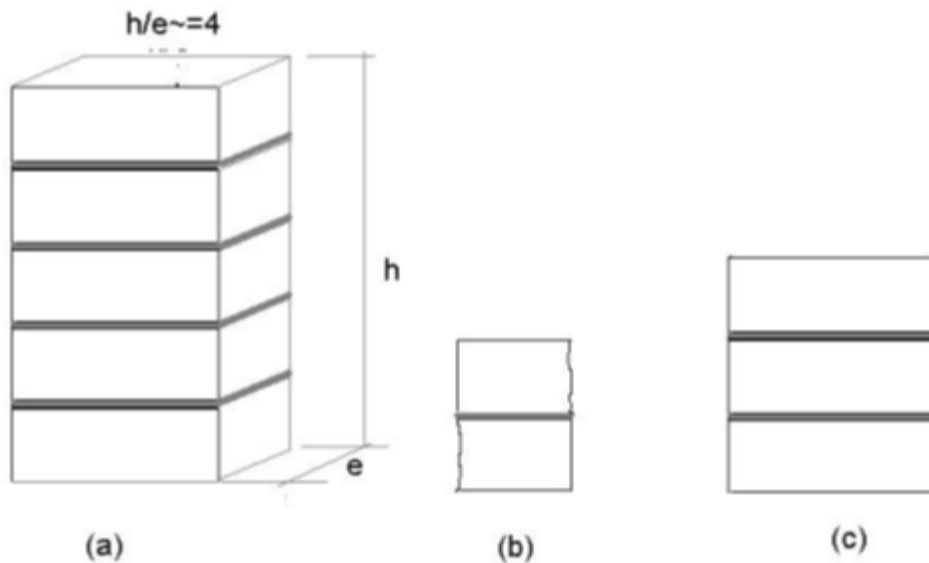


Figure I-46 Résistances à la compression minimales admises pour les BTC

La plupart de ces normes (NZS, NBR, NTC 5324) concernent les BTC stabilisés au ciment, fabriquées à l'aide d'une presse manuelle (Cid-Falceto et al. 2011). Notons également que ces normes encouragent la stabilisation au ciment et recommandent l'usage d'un enduit protecteur pour augmenter la durabilité des murs en terre (Bruce King, 2006).

Les conditions de test varient également d'une norme à l'autre. C'est pourquoi les valeurs obtenues doivent être comparées avec précaution. Seules les données avec les mêmes conditions de test (e.g., dimension des BTC, pression de mise en forme) peuvent être comparées (Bruce King, 2006). La Fig. I-47 illustre le mode opératoire de détermination de la résistance à la compression des BTC selon certaines normes. Les informations obtenues dans la bibliographie témoignent d'un manque de consensus sur la méthode à utiliser pour caractériser les BTC.

Certaines normes donnent des recommandations sur la durabilité ou la résistance à la flexion des BTC et sur leur usage (Tableau I-6).



I

Figure I-48 Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s'agit de blocs 29,5x14x9,5 cm (Lxlxh, d'après P'kla,2002).

Région	Durabilité	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Mise en œuvre
Afrique [NOR 98]			> 2 (compression 2 demi blocs, $h/e = 1,3$)	
USA [CID 91]	Capillarité < 4% après 7 jours ^b	> 0,34 (essai de flexion 3 points)	> 2 (compression d'un bloc entier)	Construction limitée à 2 étages, élancement $h/e = 10$
Pérou, Brésil, Cuba			0,2 ^a ; 2 ^b (compression simple sur maçonnerie)	
Inde [VEN 92]			2 ^{a,b} (compression 3 blocs maçonnés)	
Australie Bull. 5	Taux d'érosion < 1mm/min ^b		≥ 2 (compression sur bloc $h = 1,3$ à 2 fois e)	Mur extérieur ou intérieur
Nouvelle Zélande [NZS 4298]			3,5 ^b (compression d'un bloc entier)	
OIA 1970	Test d'érosion ^b		≥ 2,1	

Tableau I-7normes donnent des recommandations sur la durabilité ou la résistance à la flexion des BTC et sur leur usage

D'autre

s normes donnent la valeur de l'épaisseur du mur en terre en fonction de la résistance à la compression (Tableau I-8, données concernant la technique du pisé).

Pays	Norme	Épaisseur minimale du mur extérieur (mm)	Épaisseur minimale du mur intérieur (mm)	Résistance à la compression (MPa)
Australie	CSIRO Bull. 5 4th ed. (1995) et EBAA (2004)	200	200	0,7-1
Allemagne	Lehmbau Regein (2009)	400	400	0,3-0,5
Inde	IS : 2110 (1998)	300	200	1,4
Kirghizstan	PCH-2-87 (1998)			0,63-3,6
Nouvelle Zélande	NZS 4297-9	250		0,5
Suisse	Regein Zum Bauen mit Lehm (1994)	300		0,3-0,5
USA	14.7.4 NMAC (2006)	457	305	1,725-2,07
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	300		1,5 -2

Tableau I-9 Normes concernant l'épaisseur du mur en fonction des résistances à la compression (TotalBoox et TBX, 2012).

I.5 Conclusion

La synthèse de ces travaux de recherche nous a éclairé :

- Les principaux axes et perspectives de recherche basant sur l'amélioration des plus grands points faible du BTCS : **la résistance et la durabilité** en se concentrant sur l'étude des points suivants :
 - ✓ Les caractéristiques Mécaniques (compression, Flexion)
 - ✓ Etude et Confort Thermique
 - ✓ Effet des Ajouts : Poudre de brique ; Effet des fibres de bananes ; Matériaux Pouzzolaniques, Granulats recyclé de béton, Laitier haut fourneaux
- l'importance de l'identification du sol et la caractérisation du BTCS , pour pouvoir l'exploiter par les meilleures méthodes de conception et de constructions, ces dernières qui ont été bien exposées dans les articles de ces chercheurs ,dans leurs livres et guides, sans oublier leurs contributions à la formulation et au développement des règlements et des codes de différents pays.

Aussi la consultation de quelques construction modernes en terre affirment qu'elles représentent :

- Des matériaux et des finitions de haute qualité,
- Une flexibilité significative en termes d'ingénierie structurale avancée,
- La capacité de réguler passivement la température et l'humidité intérieures,
- D'améliorer le confort thermique et la qualité de l'air intérieur,
- Présentent une alternative viable à la maçonnerie porteuse ou aux murs en béton in situ avec de nombreux avantages fonctionnels.

Ces affirmations valideront cette perspective et nous encouragent à explorer les opportunités que la construction moderne en terre peut apporter. Ça nous a ramené à vouloir étudier :

- Les étapes et les dispositifs de construction du BTS
- Les différents codes pour pouvoir initier à établir le diagnostic de ce manque-à-voir le manque d'une norme ou d'un code parasismique Algérien en construction de terre-.

CHAPITRE II :

CONTEXTE EXPERIMENTALES

II. CHAPITRE II : CONTEXTE EXPERIMENTALES

II.1 Introduction :

Ce chapitre est destiné à la caractérisation de l'échantillons

Il est important de maîtriser l'ensemble des propriétés intrinsèques de la matière première (granulométrie, composition chimique et minéralogique, ...). En effet, la connaissance des propriétés et des spécificités des matériaux est essentielle pour l'identification de potentielles performances comptabilisées dans la confection des briques en terre crue. Les principaux essais de caractérisation physico-chimique et géotechnique ont été effectués sur un échantillon de matière première prélevée de la région Cheeba El Hamra Boukhmisa M'sila, selon les recommandations et les normes internationales. Ceci permis d'identifier et de classer notre sol suivant les classifications les plus connues (Classification triangulaire des sols, Diagramme de la plasticité des sols fins,).

II.2 Essais d'identifications de Sol :



Figure II-1 Sol argileu-sableu BOUKHMISSA M'sila

II.2.1 Paramètres d'état

Les paramètres d'état caractérisent le comportement des sols. Ils présentent les proportions des phases de gaz) de II.1. différentes (solide, liquide et des échantillons sols, comme le montre la figure Ils ne sont pas indépendants.

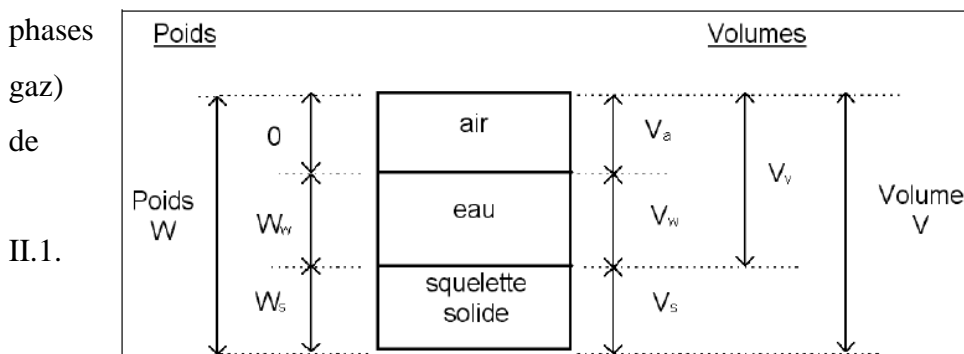


Figure II-2 Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol

La caractérisation de l'état de ces échantillons nécessite la détermination des trois paramètres indépendants tels que le poids volumique total, le poids volumique des grains solides et la teneur en eau.

II.2.1.1 Poids volumique total (γ)

Le poids volumique total d'un échantillon présente le poids global des trois phases par unité de volume. Il a été déterminé par la méthode de la pesée hydrostatique, comme le montre la figure suivante :



Figure II-3 Méthode de la pesée hydrostatique

II.2.1.2 Poids volumique des grains solides (γ_s)

Le poids volumique des grains solides présente le poids des particules solides du sol par unité de volume de la phase solide, sans tenir compte des vides présents dans ou entre les grains. Il a été déterminé à l'aide d'un pycnomètre présenté dans la figure II.4

Teneur en eau (ω)
La teneur en eau des différents échantillons a été déterminée par la méthode de la dessiccation à l'étuve, suivant la norme expérimentale [XP CEN ISO/TS 17892-1, 2005]. Il s'agit de déterminer la masse d'eau libre éliminée par séchage dans une étuve à une température de 105°C.



Figure II-4 pycnomètre

II.2.2 Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse .



Tamis (mm)	Refus Partiels	Refus Cumulés	Tamisât (%)
---------------	-------------------	------------------	----------------

(g)

Figure II-5 Tamiseuse de laboratoire à vibrations électromagnétiques par tamisage à sec ou humide des tamis Ø 200 à 315 mm source : (EL SAWARI CONTROLE)

Tamis	Refus	(g)	(%)	Tamisât
2.5	00	00	00	100
1.25	00	00	00	100
0.630	438	438	21.9	78.1
0.315	532.8	970.8	48.54	51.46
0.160	601.8	1572.6	78.63	21.37
0.08	302.7	1875.3	93.76	6.24
Fond	124.3	1999.6	99.98	0.02

Tableau II-1 Analyse granulométrique pour l'argile rouge

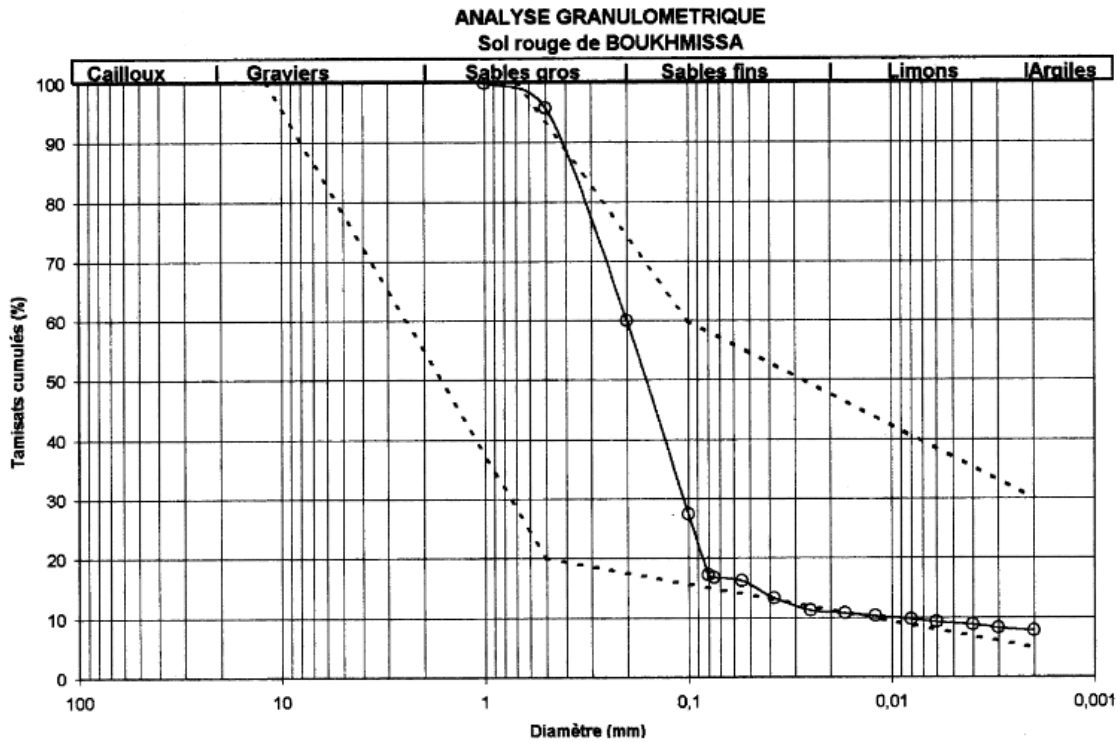


Figure II-6 Analyse granulométrique sole rouge Boukhmissa. (Sarmouk, 1998)

II.2.3 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_L).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).



Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_L - W_p$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon (Figure. II.7)

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II-28 Récapitulatif des limites d'Atterberg. (Sarmouk, 1998)

Limite de liquidité ω_1 (%)	Limite de plasticité ω_p (%)	Indice de plasticité I_p
23.52	13.67	9.85

On rappelle que les valeurs exigées par le

CNIRIB Sont :

$$07 \leq IP = \omega_1 - \omega_p \leq 29\%$$

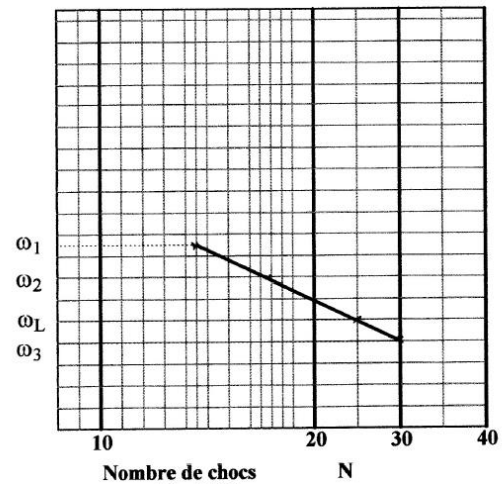


Figure II-8 courbe la limite de liquidité. (Sarmouk, 1998)

II.2.4 Essai ProctorNF P 94-0931

Mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933), L'essai consiste à damer un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant varier sa teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe en cloche. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum.

Les caractéristiques du creuset et de la dame utilisées pour l'essai sont explicitement définis par la norme NF P 94-0931, et correspondent aux conditions de compactage classique d'un engin de chantier pour les



Figure II-9 Appareillage Essai Proctor

terrassements. L'essai permet alors de mesurer l'optimum Proctor normal W_{OPN} et γ_{OPN} . L'énergie déployée lors de l'essai Proctor normal est équivalente à celles des compacteurs utilisés.

Tableau II-3 RESULTAT DE L'ESSAI PROCTOR T (Sarmouk, 1998)

Teneur en eau	Poids sec du sol(gr)	Poids de l'eau	Poids total du sol(gr)	Densité humide gr/cm ³	Densité sèche gr/cm ³
8	1863.5	160	5305.5	1.9645	1.8890
10	2036	200	5478	2.1464	1.9512
12	2060	240	5502	2.1717	1.9390
14	2011	280	5453	2.1200	1.8596

16	1968	320	5411	2.7472	1.78855
----	------	-----	------	--------	---------

- ESSAI PROCTOR -

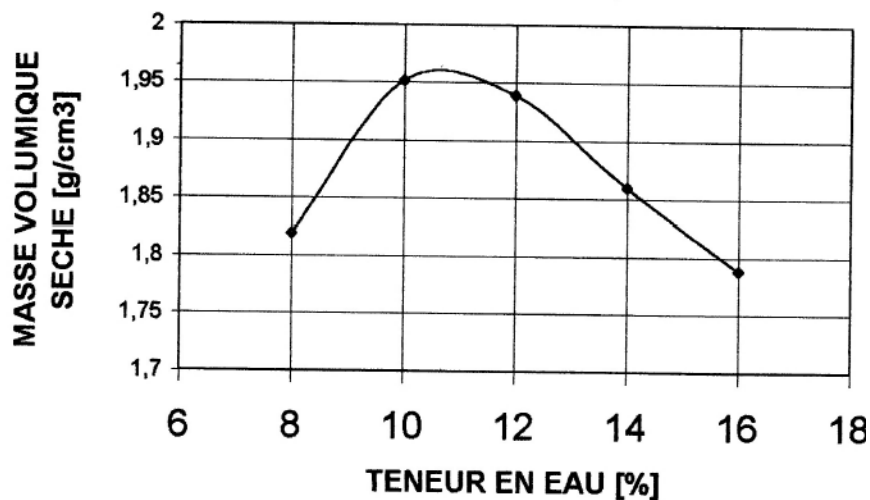


Figure II-10 courbe essai Proctor (Sarmouk, 1998)

II.2.5 L'essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068)

L'essai est réalisé sur la fraction <0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation.

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse (Abdelhamide, 2018).

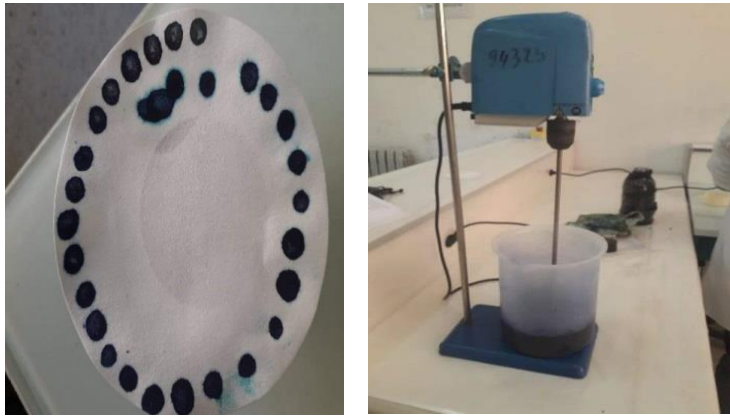


Figure II-11 Appareillage de L'essai au bleu de méthylène

Tableau II-4 Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche

	Masse dusol (g)	VOLUME de lasolution (cm ³)	VBS
Essai 1	80	125	1.68
Essai 2	80	115	1.56
Moyenne	80	120	1.62

La valeur de bleu VBS est égale à 1,62. D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux.

II.3 Le stabilisant : Ciment :

Le ciment utilisé comme stabilisant est un ciment portland blanc du groupe LAFARGE M'sila

II.4 L'adjuvant :

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

L'utilisation de superplastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure I.5) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.

On a utilisé l'adjuvant superplastifiant.

II.5 L'eau

L'eau utilisée est une eau de



de gâchage :

dans les mélanges est de robinet de laboratoire développé des Géo

matériaux Université de M'sila, l'eau gâchée des bétons doit être analysée Selon XP P18-303

Figure II-12 Mallette d'analyse de l'eau Selon XP P18-303

L'analyse du pH nous a donné une valeur de 8.5, donc l'eau utilisée n'est pas acide conforme aux recommandations du CNRIB

II.6 Confection des blocs :

Préparation des mélanges :

1-Tamisage : le sol a été tamisé à l'aide d'un tamis de 5mm de



Figure II-13 tamisage

maille.

2- la pesée : On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : argile, ciment blanc, adjuvant et eau.

3- Préparation des moules : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile, les moules sont prêts pour utilisation.

4- le malaxage : L'opération est exécutée comme suit :

On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment blanc et adjuvant, on malaxe le mélange à sec durant 60 à 120 secondes.



On ajoute une quantité d'eau puis on malaxe pendant 120 à 180 secondes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

Figure II-14 malaxage

Le malaxage et la préparation des moules sont des opérations importantes dans la fabrication de la BTC



5- Le moulage des éprouvettes : Lemoule utilisé est un moule rectangulaires des dimensions (20*10*5) cm.

6-le compactage : est effectué à l'aide d'une presse hydraulique confectionné au laboratoire.

7- La cure des éprouvettes :

Après démoulage, les blocs seront mis :

- dans le four pendant 24 heures .cette période de cure permet au stabilisant de durcir .le séchage s'est effectué à la température 50°.
- Cure dans une enceinte climatique : de te température e 50 C° et 100 % HUMIDITE pendant 28 jours.

Figure II-15: presse hydraulique confectionné dans le laboratoire: Moulage et compactage



Figure II-17 Eprouvette séchée dans l'étuve



Figure II-16 enceinte climatique pour lecture des éprouvettes

II.7 Essais de contrôle ou essai de caractérisation

II.7.1 Essais de résistances mécaniques

II.7.1.1 Résistance à la traction sèche

Cet essai est dérivé de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Il s'agit de soumettre le bloc après une cure de 28 jours à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autre d'un bloc, ce qui se traduit par une contrainte moyenne de traction suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes. Cet essai est réalisé selon la procédure de Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000) (figure 2.18)(Ouarda, 2016)..



Figure II-18 Essai de traction par fendage

$$R_t = 0.9 \times 10.2 / \pi \cdot 1 \cdot h$$

R_t: Résistance à la traction des blocs en Méga Pascal (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi- blocs en KN

I : Largeur du bloc en centimètres (cm).

h : Epaisseur du bloc en centimètres (cm).

II.7.1.2 Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance sèche des briques de terre comprimées destinés à la maçonnerie afin d'obtenir des résultats comparatifs indépendants du format de la brique. L'essai est réalisé selon la norme XP P 13-901. Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de ciment à une compression simple jusqu'à la rupture (figure 2.19) (Ouarda, 2016)..



Figure II-19 Essai d'écrasement de l'éprouvette

La résistance à la compression est donnée par la

formule

R_c = 10 * F / 50 où :

R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi-blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm².

II.7.1.3 Résistance à la compression humide

Les constructions sont souvent sujettes d'agressions de l'eau surtout par l'action de la capillarité et de l'aspersion ; par contre elles sont rarement immergées.

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté que l'échantillon soit humidifié par immersion complète durant deux heures

II.7.2 Essais de Durabilité

L'essai type recommandé conformément à la norme américaine AS.T.M.559.44 : essai de mouillage -séchage en 12 cycles.

a/But:

Cet essai permet de déterminer les pertes des matériaux, les variations d'humidité et les changements de volume (contraction-dilatation) qui se produisent à la suite de mouillage et séchage.

b/ Mode opératoire:

On prend les Eprouvettes préalablement conservées dans une ambiance humide pendant 7 jours puis pesées, ensuite elles sont soumises à une série de douze cycles identiques de mouillage et séchage, comprenant chacun 05 heures d'immersion totale, 42 heures d'étuvage puis une heure dans l'air ambiant du laboratoire après chaque cycle, les éprouvettes sont brossées et la perte du poids est mesurée ce qui permet d'établir une courbe montrant la perte du poids en fonction du nombre de cycles de mouillage-séchage

La perte de poids maximum admissible est de 10% (climat sec) ou 5% (autre climat) après 12 cycles de mouillage - séchage.

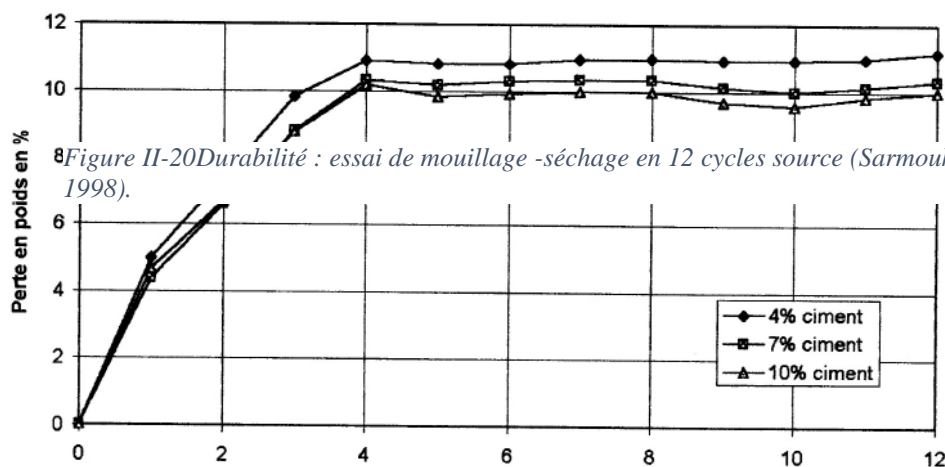
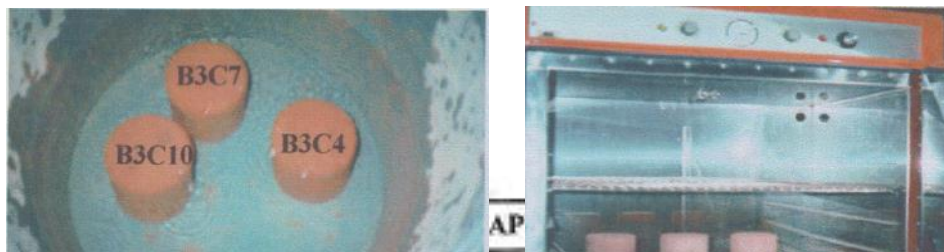


Figure II-21 Durabilité : courbe perte en poids en % source (Sarmouk, 1998)

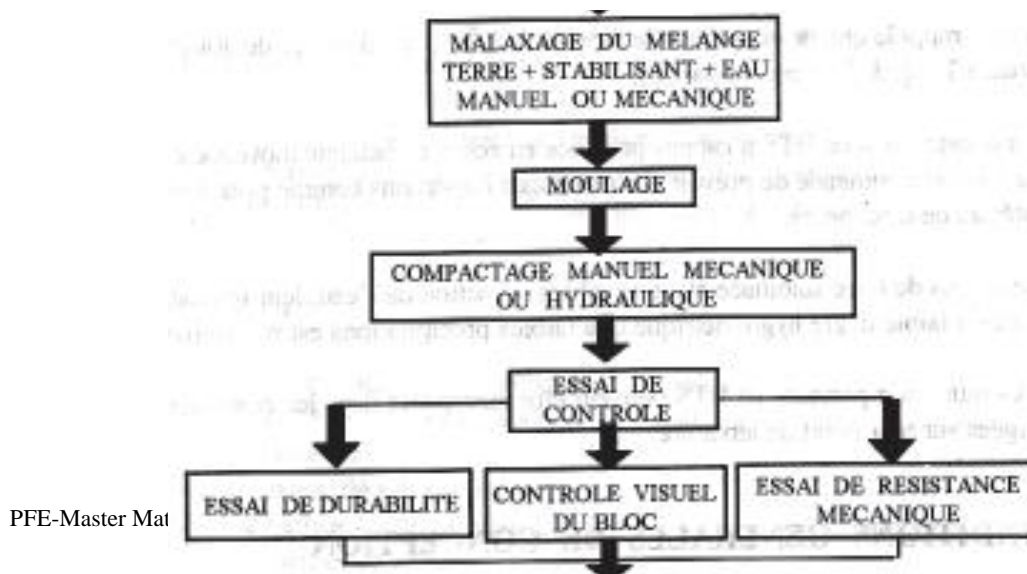


Figure II-22 Procédure de formulation et de caractérisations de BTS

CHAPITRE III :

CONSTRUCTION EN BCTS

III. CHAPITRE III : CONSTRUCTION EN BTCS

III.1 Introduction :

Dans une période de changement globale et en raison de nos aspirations sociales, le domaine de la construction en terre doit se développer, les bâtiments modernes en terre doivent avoir des formes similaires à celles des maisons construites avec des matériaux conventionnels, bien que les architectes et les ingénieurs exploitent de plus en plus les propriétés fonctionnelles inhérentes que ces murs en terre peuvent offrir au fonctionnement d'un bâtiment et à l'interaction avec ses occupants.

L'objectif de ce chapitre est de développer des **pratiques de construction durables par définition des étapes** et démarches à entreprendre afin de réaliser une construction moderne en briques de terre comprimée et stabilisée et qui soit durable, abordable et bioclimatique conforme aux normes dans la région de M'sila ?

Les étapes ou les démarches à entreprendre pour construire une habitation en BTCS sont généralement celles d'une construction courante en maçonnerie sauf que le matériau utilisé est en BTCS.

III.2 Choix de la méthode de la construction :

Une construction en BTCS est une construction en maçonnerie de petits éléments composée de matériaux manufacturés ou fabriqués manuellement, liés les uns aux autres par des joints de mortier traditionnel ou mortier - colle. Donc elle est soumise aux normes de conception et règles de calcul des structures ordinaires en maçonnerie avec des recommandations et des dispositions qualitatives et constructives spécialement conçues pour les constructions en BTCS.

Notre projet est situé à M'sila, une zone sismique IIa, les constructions en maçonnerie porteuse dans des sites jugés sismiques doivent satisfaire aux exigences établies par le **Règlement Parasismique Algérien** en vigueur et le **DTR C2-45**.

Le **RPA 2003** nous oriente vers la technique de **la maçonnerie chaînée**, étant plus tolérante aux erreurs, a démontré son efficacité en cas de séisme (séisme BENI YELMEN 2016)⁴, ce qui fait de cette technique une alternative pertinente.

Il faut en premier lieu respecter **les règles générales de conception** :

III.2.1 Les règles générales de conception selon le RPA 2003

:(BELAZOUGUI, et al., 2003)

III.2.1.1 Choix du site

Pour le choix du site, une attention particulière doit être portée aux conditions défavorables ou pénalisantes suivantes :

- *présence de failles reconnues actives*
- *zones suspectes de liquéfaction*
- *terrains instables :*
- *topographie superficielle accidentée :*
- *présence d'alluvions d'épaisseur*
- *présence de formations géologiques différentes*

Le choix définitif du site sera arrêté sur la base des résultats d'investigations dont l'importance sera en rapport avec celle de l'ouvrage projeté.

Le type et l'importance de ces investigations pourront être utilement orientés par les résultats d'études de micro zonage sismique là où elles existent.

III.2.1.2 Reconnaissances et études de sol

Les reconnaissances et études de sol sont obligatoires pour les ouvrages d'importance moyenne ou plus, implantés en zones de sismicité moyenne à élevée.

III.2.1.3 Implantation des ouvrages

Lors de l'implantation des ouvrages, il faudrait :

- éviter absolument la proximité immédiate d'une faille reconnue active pour les ouvrages importants et ceux d'importance vitale. Si le tracé de la faille a été localisé à l'issue d'une étude de site préalable, les ouvrages d'importance moyenne doivent faire l'objet d'un niveau de protection plus élevé et être implantés en dehors d'une bande de 100 m de large minimum de part et d'autre de la trace de la faille. Pour les ouvrages d'importance faible, la largeur de la bande à neutraliser est ramenée à 50 m, de part et d'autre de la

⁴Un séisme de magnitude de 3.7° sur l'échelle de Richter a secoué la région de Béni Yelmen dans la wilaya de Msila, samedi à 22 :06mn le 12 novembre 2016(centre de recherche en astrophysique et géophysique)

III.2.1.4 Infrastructure et fondations

L'infrastructure, constituée des éléments structuraux des sous-sols éventuels et le système de fondations doivent former un ensemble résistant et rigide, prenant, si possible, appui à un minimum de profondeur sur des formations en place compactes et homogènes, hors d'eau de préférence.

En outre, cet ensemble devra être capable de transmettre les charges sismiques horizontales en plus des charges verticales, de limiter les tassements différentiels et d'empêcher les déplacements horizontaux relatifs des points d'appui par solidarisation au moyen de longrines ou autre dispositif équivalent.

Les fondations sur remblais ou sols reconstitués ne sont pas admises, sauf justifications spéciales.

Le système de fondation doit être homogène (semelles superficielles, radier, pieux) avec un seul mode de fondation par bloc de construction, délimité par des joints. Il doit autant que possible constituer une assise horizontale unique sur toute l'emprise du bloc.

Pour notre projet L'emploi **du béton cyclopéen pour les fondations et le soubassement** est une solution intéressante au plan technique et économique

III.2.1.5 Superstructure

III.2.1.5.1 Régularité

Pour offrir une meilleure résistance aux séismes, les ouvrages doivent de préférence avoir, d'une part des formes simples, d'autre part, une distribution aussi régulière que possible des masses et des rigidités tant en plan qu'en élévation.

Le but recherché est d'assurer la meilleure répartition possible des sollicitations à travers la structure de façon à faire participer tous les éléments à l'absorption et à la dissipation de l'énergie développée par l'action sismique.

III.2.1.5.2 Joints

La disposition des joints sismiques peut coïncider avec les joints de dilatation ou de rupture. Ils doivent assurer l'indépendance complète des blocs qu'ils délimitent et empêcher leur entrechoquement.

En cas de sol de fondation homogène, il n'est pas nécessaire de les poursuivre en fondation. Les joints doivent être plans, sans décrochement et débarrassés de tout matériau ou corps étranger.

Ils sont disposés de façon :

- A limiter des longueurs de bâtiments trop importantes

- A séparer les blocs de bâtiments ou ouvrages accolés de géométrie et /ou de rigidités et de masses inégales.
- A simplifier les formes en plan de bâtiments présentant des configurations complexes (forme en T, U, L, H,).

III.2.1.6 Matériaux et techniques de construction

Les présentes règles concernent essentiellement les structures réalisées, avec la maçonnerie en brique de terre comprimée et stabilisée convenablement chaînées horizontalement et verticalement par des éléments en béton armé coulés en place.

Le comportement des matériaux aux séismes ne peut être dissocié du type de structure qu'ils constituent :

- les matériaux avec un rapport résistance/masse volumique tel que celui de l'acier permettent de réaliser des structures légères, résistantes et économiques.
- la rigidité des matériaux permet de limiter les problèmes de stabilité de forme.
- la ductilité est la capacité des matériaux à se déformer plastiquement lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement.
- les assemblages qui assurent la transmission des efforts entre les éléments constructifs, garantissant ainsi la continuité mécanique de la structure doivent être réalisés en béton armé coulé en place.
- l'utilisation de la précontrainte pour les éléments de contreventement est interdite en zone sismique. Par contre, l'utilisation d'éléments secondaires isostatiques en béton précontraint tels que pannes, poutrelles de plancher, prédalles est permise.
- les structures préfabriquées doivent :
 - satisfaire aux conditions générales de conception, de calcul, et d'exécution
 - faire l'objet d'agrément précisant les conditions d'utilisation en zones sismiques

III.2.1.7 Systèmes structurels

Les ouvrages doivent en général comporter des contreventements dans au moins les deux directions horizontales. Ces contreventements doivent être disposés de façon à :

- Reprendre une charge verticale suffisante pour assurer leur stabilité
- Assurer une transmission directe des forces aux fondations
- Minimiser les effets de torsion

Les éléments de contreventement devraient présenter une configuration régulière et former un système continu et cohérent aussi monolithique que possible. (BELAZOUGUI, et al., 2003)

III.2.1.8 Modélisation et méthodes de calcul

Le choix des méthodes de calcul et la modélisation de la structure doivent avoir pour objectif de reproduire au mieux le comportement réel de l'ouvrage.

III.3 Constructions BTCS en maçonnerie porteuse chaînée selon le

RPA2003(BELAZOUGUI, et al., 2003)

III.3.1 Principes architecturaux et concepts structuraux

III.3.1.1 Conception

- Les bâtiments en maçonnerie porteuse chaînée doivent présenter une configuration aussi régulière que possible et respecter les principes de bonne conception énoncés au paragraphe III.2.1
- Les murs doivent être suffisamment liés entre eux et aux planchers.
- Les éléments secondaires tels que corniches, balcons, ornements, devront être solidement liaisonnés à la structure du bâtiment.

III.3.1.2 Dimensions en plan, hauteur du bâtiment et nombre de niveaux

III.3.1.2.1 Dimensions en plan

Les dimensions en plan devront respecter les prescriptions y afférentes données par les règles de conception et de calcul des ouvrages en maçonnerie et béton armé. Par ailleurs le rapport longueur/largeur sera limité à 3.5

III.3.1.2.2 Hauteur et nombre de niveaux

La hauteur du bâtiment (en mètres) ainsi que le nombre de niveaux seront limitées compte tenu de la zone sismique (tableau suivant) :

Tableau III-1Hauteur et nombre de niveaux selon le RPA

		ZONE SISMIQUE			
		ZONE I	ZONE IIa	ZONE IIb	ZONE III
HAUTEUR	H	17	14	14	11
NOMBRE D'ETAGE	N	5	4	4	3

III.3.1.3 Répartition et densité des murs

- Les murs porteurs en maçonnerie devront être répartis de manière uniforme suivant les deux directions principales.
- Leur nombre doit être suffisant pour résister aux forces sismiques.
- L'aire totale des sections droites des murs porteurs dans une direction donnée et à chaque niveau ne devra pas être inférieure à 4 % de la surface de plancher au niveau considéré.

- Ces murs doivent être solidement liés (par l'intermédiaire des chaînages) aux planchers rigides ; ces derniers vont distribuer aux murs les forces d'inertie au prorata de leur rigidité.

On distingue :

- Les murs structuraux de contreventement capables de reprendre les charges verticales et les charges latérales dues au séisme. Ils auront une épaisseur minimale de 20 cm pour les murs chaînés.

- les murs non-structuraux qui ont une fonction exclusive de cloisonnement. Leurs poids propres sont transmis aux murs porteurs par l'intermédiaire des planchers.

- Les distances maximales (en mètres) entre les murs porteurs sont fixées en fonction de la zone sismique comme suit :

Tableau III-2 Distances maximales entre les murs porteurs selon zone sismique

	ZONE SISMIQUE			
	ZONE I	ZONE IIa	ZONE IIb	ZONE III
Distance (m)	10	8	8	6

III.3.1.4 Les ouvertures

Les ouvertures ont une grande influence de par leurs emplacements et leurs dimensions dans la résistance des bâtiments en maçonnerie.

Afin d'améliorer le comportement des bâtiments en maçonnerie il est fait les recommandations suivantes :

- la longueur totale d'ouverture dans un mur ne devra pas dépasser la moitié de la longueur de ce mur
- les niveaux supérieurs des ouvertures devront être situés à la même côte
- les ouvertures dans les murs devront être prévues autant que possible de façon symétrique eu égard à la configuration en plan du bâtiment pour assurer une distribution de rigidité et de résistance uniforme dans les deux directions du bâtiment.
- les ouvertures seront placées autant que possible sur le même alignement vertical
- les ouvertures seront placées en dehors des zones d'influence des charges localisées ramenées par les poutres ou autres éléments porteurs.

Les **dimensions des ouvertures et des éléments structuraux** doivent respecter par ailleurs les conditions suivantes (voir figure III.1):

$$\sum b_i \leq 0.5 L_i$$

Pour les trumeaux extrêmes :

$$a_1 \geq 1.00 \text{ m}$$

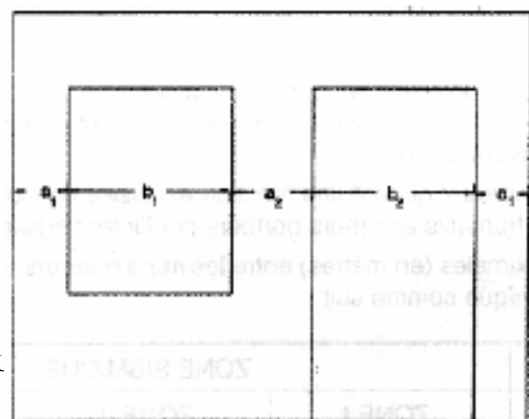


Figure III-11 l'emplacement et taille d'ouverture

Pour les autres trumeaux :

$a_2 \geq 1.00$ m pour la zone III

$a_2 \geq \frac{b_1+b_2}{3}$ pour les zones I IIa et IIb

III.3.1.5 Matériaux

III.3.1.5.1 Généralités

La qualité des matériaux utilisés dans la construction joue un rôle important dans la résistance aux efforts sismiques.

Les matériaux constitutifs sont :

- blocs de béton de terre stabilisée B.T.C.S
- mortier
- armatures métalliques
- béton

Le fournisseur doit établir un document donnant les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau en particulier la résistance caractéristique à la rupture en compression.

III.3.1.5.2 Spécifications concernant les blocs de béton de terre stabilisée B.T.C.S

Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux, et en particulier la résistance en compression, doivent être conforme aux recommandations du CNRIB ou d'autres normes équivalentes.

III.3.1.5.3 Mortiers

Les mortiers utilisés pour les constructions des structures en maçonnerie seront à base de ciment ou ciment - chaux hydraulique et leur résistance minimale caractéristique à la compression sera de 5 MPa.

III.3.1.5.4 Armatures

Les armatures sont celles prévues pour le béton armé et sont définies par les normes; la valeur de la résistance caractéristique à utiliser dans les calculs étant la limite d'élasticité f_e .

III.3.1.5.5 Béton

Pour les éléments en béton armé faisant partie du système structural, la résistance caractéristique minimale à la compression exigée est de 15 MPa.

III.3.2 Système de construction en maçonnerie porteuse chaînée

III.3.2.1 Principe

On appelle maçonneries chaînées les structures porteuses réalisées en maçonnerie de moellons ou de petits éléments manufacturés et comportant des chaînages en béton armé mis en œuvre après exécution de la maçonnerie ; on distingue :

- Les chaînages horizontaux :
 - . au niveau des fondations (éventuellement)
 - . au niveau de chaque plancher
 - . au niveau des toitures
- Les chaînages verticaux, au moins :
 - . à tous les angles saillants ou rentrants de la construction
 - . aux jonctions de murs
 - . encadrant les ouvertures de hauteur supérieure ou égale à 1.80m;avec les dispositions complémentaires énoncées ci-après.

Aucun élément de mur ne doit présenter de bord libre en maçonnerie

III.3.2.2 Les éléments structuraux principaux

Les éléments structuraux principaux doivent être prévus dans deux directions perpendiculaires.

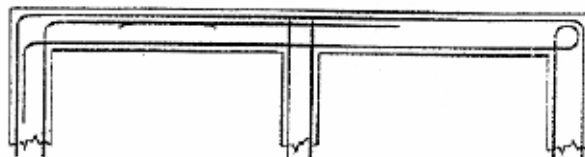
Ces éléments doivent être constitués de trumeaux bordés de chaînages verticaux et ne doivent comporter aucune ouverture. Il est toutefois toléré dans un panneau des percements de diamètre inférieur ou égal à 20 cm en dehors de l'emprise des bielles diagonales

Les **caractéristiques** géométriques **de ces trumeaux** doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- épaisseur brute minimale : 20 cm
- dimensions entre chaînages parallèles:
 - dimension inférieure ou égale à 5m
 - superficie inférieure ou égale à 20 m²
 - longueur de la diagonale inférieure ou égale à :
 - * 40 fois l'épaisseur brute pour les murs en éléments pleins
 - * 25 fois l'épaisseur brute pour les murs en éléments creux

III.3.2.3 Chaînages horizontaux

Les chaînages horizontaux (voir figure III.2) doivent régner sur toute l'épaisseur du mur (épaisseur totale du mur s'il s'agit d'un mur à double paroi). Toutefois pour permettre la réalisation de façades



dans lesquelles les éléments de béton armé ne restent pas apparents, il est admis que la dimension minimale des chaînages soit ramenée à 2/3 de l'épaisseur.

Les chaînages doivent avoir une hauteur minimale de 15 cm. Leur armature longitudinale doit être composée d'au moins une barre dans chaque angle de la section. Le minimum d'armature longitudinale des chaînages horizontaux est de 4 barres HA 10. L'espacement de deux barres d'une même nappe horizontale ne doit pas excéder 20 cm (voir figure III.3).

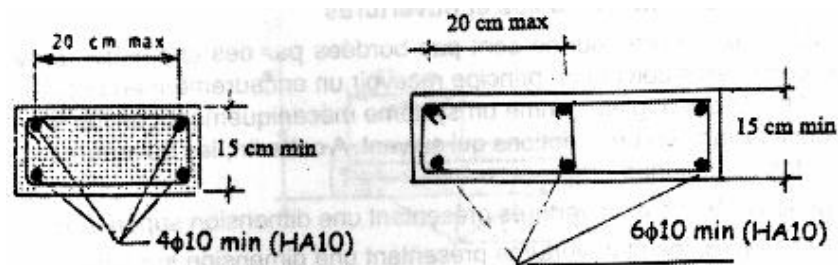


Figure III-3 chaînage des éléments structuraux

Tout chaînage horizontal doit comporter des armatures transversales d'espacement au plus égal à la hauteur du chaînage et à 25 cm. Les longueurs de recouvrement et d'ancrage sont celles données au chapitre 7.5.2.1 (RPA), soit 40ϕ en zone I et IIaIIb et 50ϕ en zone III

III.3.2.4 Chaînages verticaux

Ils seront réalisés sur toute la hauteur du mur et avec une section minimale 15cm x15 cm. Les sections et dispositions minima d'armatures sont les mêmes que celles concernant les chaînages horizontaux.

III.3.2.5 Nœuds des chaînages

La continuité et le recouvrement des armatures des divers chaînages concourant en un même nœud doivent être assurés dans les trois directions (voir figure III.4.)

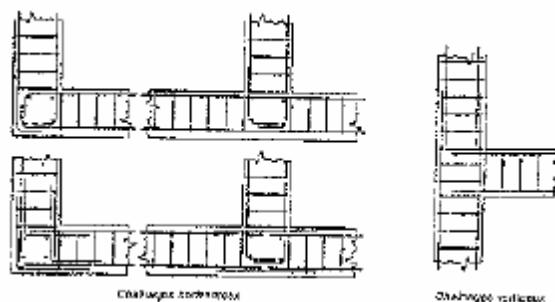


Figure III-4 Exemple de disposition constructive

III.3.2.6 Planchers

Les planchers seront réalisés en :

- Dalle en béton armé coulé en place
- Poutrelles et corps creux avec dalle de compression ; Les armatures des poutrelles doivent être convenablement ancrées dans les chaînages horizontaux ou dans les poutres principales.
- Poutrelles en bois ou métalliques ; Elles devront s'appuyer sur toute l'épaisseur du mur porteur.

Remarque : Le règlement néglige les toitures en voute ou coupole en BTCS.

III.3.2.7 Encadrements des baies et ouvertures

Les baies et ouvertures qui ne sont pas bordées par des chaînages prévus aux articles précédents doivent en principe recevoir un encadrement en béton armé ou en métal traité aux angles comme un système mécaniquement continu et relié aux chaînages suivant les prescriptions qui suivent. A cette fin, les ouvertures sont divisées en trois catégories :

- *Catégorie G* : Baies et ouvertures présentant une dimension supérieure à 2,50 m.
- *Catégorie M* : Baies et ouvertures présentant une dimension supérieure à 1.50 m (autre que celle de la catégorie G).
- *Catégorie P* : Baies et ouvertures autres que celles des catégories G et M

Les dispositions sont les suivantes :

- *Catégorie G* : Encadrement et liaisons aux chaînages obligatoires quelle que soit la zone sismique.

- *Catégorie M* : Zones III: encadrement et liaisons aux chaînages obligatoires.

Zone II: encadrement et liaisons aux chaînages obligatoires, sauf lorsque l'ouverture est pratiquée dans un panneau dont aucune dimension n 'excède 3.20 m

- *Catégorie P* : Zones III: encadrement obligatoire

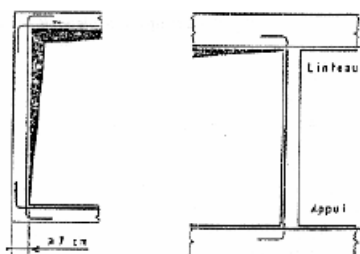
Zone IIaIIb: encadrement obligatoire, sauf lorsque la baie est pratiquée dans un panneau dont aucune dimension n 'excède 3.20 m

Les linteaux doivent être constitués par des poutres ou poutrelles en béton armé, en béton précontraint, en métal ou en bois.

Les encadrements en béton armé doivent avoir une hauteur minimale de 7 cm et leur armature longitudinale doit être constituée d 'au moins

deux

PFE-Master



barres, une au voisinage de chaque face latérale. Le

minimum d'armatures à disposer dans les encadrements est de 2 HA10 en zones I et II et 3 HA10 en zone III, l'espacement de deux barres ne doit pas excéder 20 cm (voir les figures III.5 et III.6)

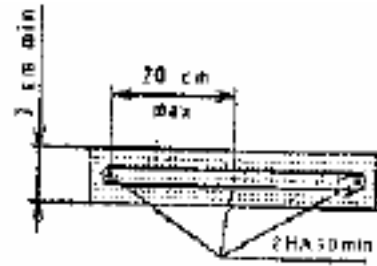


Figure III-6 encadrement en béton armé

Figure III-5 Dispositives constructives des encadrements des baies et ouvertures

Les encadrements en métal doivent avoir une résistance à la traction au moins égale à celle exigée des encadrements en béton armé.

III.3.2.8 *Calculs et vérifications des éléments structuraux principaux*

Les prescriptions qui suivent sont facultatives pour les constructions en maçonnerie porteuse chaînée de 01 niveau (hauteur maximum de 4 m) en zones I à III, et de 02 niveaux (hauteur maximum de 7 m) en zones I et II.

III.3.2.8.1 *Sollicitation agissante*

Les sollicitations agissantes sont déterminées suivant le chapitre V du RPA, à partir des combinaisons indiquées en 5.2, et en tenant compte du coefficient de comportement R indiqué au chapitre IV, paragraphe 4.2.3, tableau 4.3., soit **R= 2.5**.

III.3.2.8.2 *Sollicitations résistantes*

Les sollicitations résistantes sont calculées compte tenu de l'application aux résistances caractéristiques des matériaux ou considérées comme telles, les coefficients de sécurité partiels suivants :

Béton de granulats courants : $\gamma_m = 1.5$

Acier : $\gamma_m = 1.0$

Pierres

Briques et blocs de terre cuite

Blocs de béton

Blocs de béton cellulaire

} $\gamma_m =$ Voir valeurs données au tableau 9.1(*). ci-après:

(*) les valeurs données au tableau III.1 sont valables pour des élancements géométriques de murs dans le sens vertical inférieurs à 15.

Tableau III-3 Coefficient de sécurité partielle γ_m sur le matériau maçonnerie de pierre ou de petits éléments manufacturés

Matériaux	Chargement Centré	Chargement excentré
Briques creuses de terre cuite à faces de pose continues avec joints pleins	3,5	5
Briques creuses de terre cuite à rupture de joint ou à joints partiels	4,5	5,5
-Briques pleines ou perforées de terre cuite destinées à rester apparentes ou à être enduites -Blocs silico calcaires	3,5	4,5
Blocs perforés de terre cuite à perforations verticales destinés à rester apparents ou à être enduits	3,5	4,5
Blocs pleins ou creux en béton de granulats courants ou légers	3	4
Blocs de béton cellulaire autoclavé	4	5
Pierre de taille	4	5
Pierre en moellons ordinaires	5	6
Blocs de BTS et Blocs de plâtres	5	6

III.3.2.8.3 Principes de calcul

On considère les actions parallèles au plan moyen; Les éléments verticaux de mur (éléments structuraux principaux) sont considérés comme des consoles encastrées à leur base.

Le principe de calcul de résistance consiste à assimiler l'ensemble formé par les panneaux de maçonnerie et par les chaînages en béton armé qui les encadrent à un système triangulé dont les éléments diagonaux sont constitués par les bielles actives susceptibles de se former dans la maçonnerie.

Si les bielles ont une pente comprise entre 1/2 et 2, ce qui est en général le cas quand les prescriptions du paragraphe 9.32 du RPA sont respectées, il n'est pas nécessaire de justifier le non-glissement au droit des joints.

La largeur w de ces bielles est prise, dans les calculs, égale à la plus petite des deux valeurs $d/6$ et $4e$, soit : $w = \min (d/6 ; 4e)$ où :

d est la longueur de la bielle (diagonale du panneau),

e est l'épaisseur brute de la maçonnerie.

La contrainte de compression dans la maçonnerie doit être inférieure à la résistance caractéristique divisée par γ_m ; Les armatures des chaînages sont calculées suivant les règles du béton armé.

III.4 Prescriptions generales relatives à la conception des maçonneries selon le DTR C2-45 règles de conception et de calcul des maçonneries

(BACHA, et al., 1996)

III.4.1 Conditions requises des matériaux de constitution

III.4.1.1 Réception

La réception des matériaux doit se faire conformément aux prescriptions et exigences contenues dans le cahier des charges.

Les éléments présentant des cassures ou épaufrures importantes ne doivent pas être mis en œuvre tels quels.

III.4.1.2 Stockage

Sur chantier, si ces matériaux ne sont pas utilisés immédiatement, il est recommandé de les entreposer à l'abri des eaux pluviales et de l'humidité du sol. Ils doivent être empilés de manière à conserver leurs caractéristiques géométriques.

III.4.2 Caractéristiques techniques des matériaux

III.4.2.1 Caractéristiques des briques ou blocs

Ces matériaux ne doivent être mis en œuvre que lorsque leurs caractéristiques physico -mécaniques et chimiques sont conformes aux exigences contenues dans le cahier des charges et dans la fiche technique du matériau.

III.4.2.2 Caractéristiques Des Mortiers

Les constituants (liants, sable, résine,..) des mortiers doivent répondre aux exigences du cahier des charges et de leur fiche technique. Les mortiers doivent répondre aux exigences suivantes :

- maniabilité,
- adhérence aux blocs,
- résistance équivalente à celle du bloc,
- résistance aux conditions climatiques.

III.4.3 Conception des murs

III.4.3.1 Appareillage

Tous les appareillages utilisés ou en usage sont possibles à condition qu'ils soient conformes à la géométrie des éléments de maçonneries et assurent la stabilité des murs (voir tableau III.2),

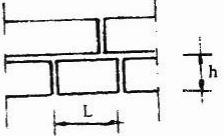
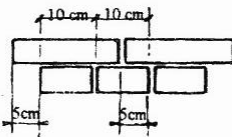
III.4.3.2 Joints

L'épaisseur du joint de mortier varie en général de 1, à 2 cm. Elle doit être de sorte qu'elle s'adapte aux dimensions des blocs ou briques.

L'écart entre deux joints verticaux successifs doit être supérieur ou égal au 1/4 de la longueur de la brique (voir tableau III-4).

Le tableau ci-après précise les règles à respecter en fonction de la nature du matériau

Tableau III-5 les règles des joints de mortier à respecter en fonction de la nature du matériau

Type de maçonnerie	Epaisseur des joints	Recouvrement	Schéma
Maçonnerie de bloc de grande taille	0,30 à 1 cm	<p>> 15 cm maçonnerie non porteuse</p> <p>> 0,75 h maçonnerie porteuse</p>	<p>h : désigne la hauteur du bloc L : désigne la longueur du bloc</p> 
Maçonnerie d'éléments manufacturés de petite taille	1 à 2 cm	<p>≥ 5 cm</p> <p>Liaison minimale</p>	

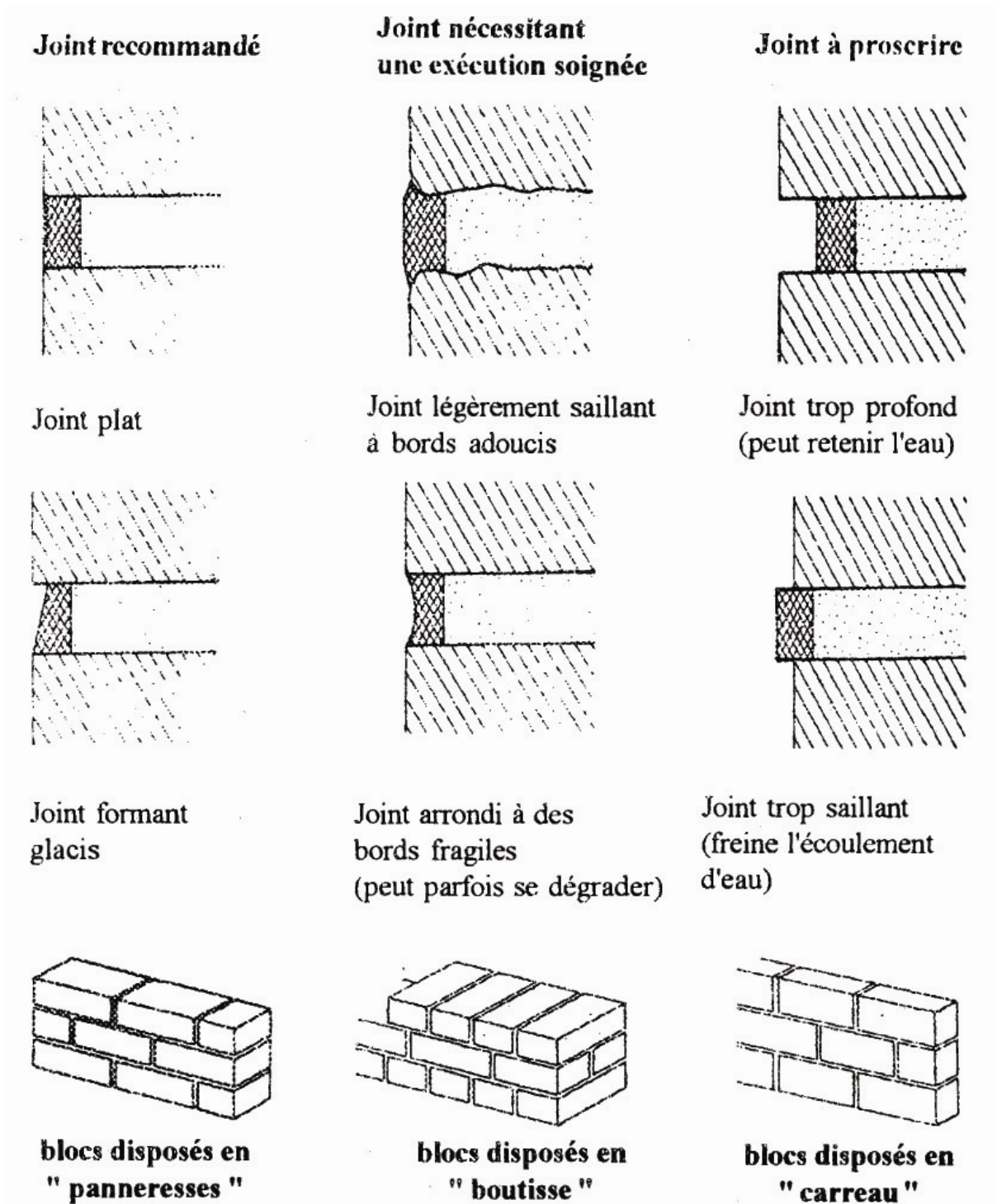


Figure III-7 Profils courants de joints de parements et exemples d'appareillages courants

Le rejointement est exécuté, une fois la maçonnerie montée, pour assurer l'étanchéité du mur et conserver à la fois l'aspect architectural recherché, Ce rejointement doit avoir un dosage en liant suffisant pour assurer cette étanchéité.

III.4.3.3 Dimensionnement et géométrie des murs

- Les assises doivent être horizontales et régulières.
- Le rapport des ouvertures et des pleins, dans un même mur, ne doit pas être inférieur ou égal à 1/3, et doit être le plus régulièrement réparti.

- Les portées classiques se limitent à 1,20 m. Surdimensionné les linteaux et les jambages pour les plus grandes baies.
- La largeur d'un trumeau doit être supérieure à l'épaisseur du mur et à un minimum de 1,00 m.

III.4.4 Maçonneries utilisées en soubassement

Les maçonneries de soubassement doivent être constituées de matériaux inaltérables à l'eau sur une hauteur minimale de 30 cm.

La conception globale de la partie non enterrée des murs de soubassement est à déterminer en fonction des exigences propres à ce mur, en particulier, l'étanchéité.

III.4.5 Fondations

Les fondations seront réalisées uniquement avec des matériaux inaltérables à l'eau (béton armé, béton cyclopéen, maçonnerie de pierre .).

- Quel que soit le type de maçonnerie à adopter et selon l'importance de l'ouvrage il convient de s'assurer de la qualité des sols des fondations par une étude géotechnique préliminaire.
- Tous les murs porteurs doivent avoir des fondations filantes.

III.4.6 Dispositions constructives minimales

III.4.6.1 Chaînages

Pour éviter des désordres dans la maçonnerie dû aux phénomènes de dilatation thermique, de retrait ou de tassement, on prévoit des joints et on complète ces dispositions par le chaînage des murs.

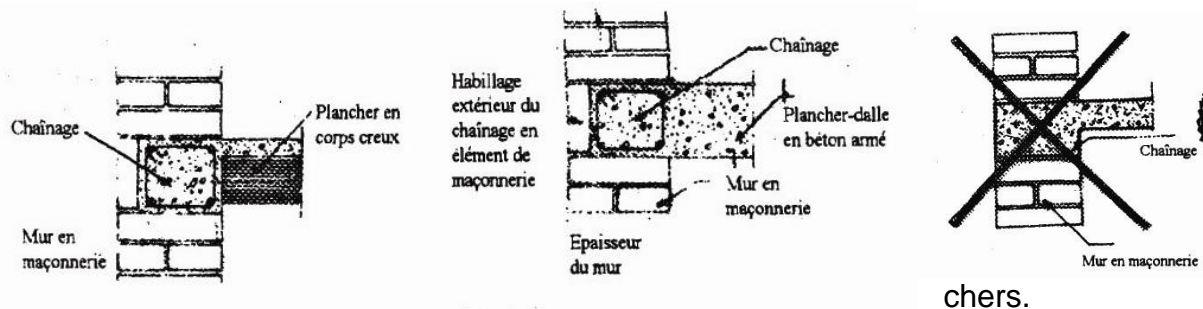
Dans le cas des murs porteurs, les planchers prennent appui sur les murs et il convient de prévoir des chaînages qui solidarisent tous les éléments verticaux et horizontaux du bâtiment.

Ces chaînages sont, en général, des éléments en béton armé mais parfois ils peuvent être constitués d'un autre matériau (métal ou bois).

L'habillage des chaînages doit être réalisé avec un matériau de même nature que la maçonnerie. Ce matériau doit être placé dans le coffrage et non pas rapporté après coup. Son épaisseur ne doit pas dépasser 1/3 de l'épaisseur du mur, (voir figure 8).

III.4.6.1.1 Chaînages horizontaux

Ces chaînages relient les murs porteurs entre eux de façon à renforcer la stabilité de l'ensemble, à reprendre les efforts horizontaux de traction dû aux sollicitations horizontales (séisme) et à mieux répartir sur les murs les charges des plan-



La section transversale du béton doit être limitée en façade, sa largeur doit être prise au plus égale au 2/3 de l'épaisseur du mur lui servant d'appui. Ce qui permettra de réaliser un habillage extérieur correct avec un matériau de même nature que la maçonnerie.

Commentaire *Figure III-8-réalisation des chaînages horizontaux*

En général, la hauteur d'un chaînage de façade doit être égale à celle du plancher qui lui est associé.

Les armatures des chaînages horizontaux doivent respecter les règles de bonne pratique du béton armé (recouvrement, ancrage, etc...)

III.4.6.1.2 Chaînages verticaux

- En général, les chaînages verticaux sont prévus lorsque les murs en maçonnerie sont porteurs et soumis à des sollicitations horizontales.
- Ils sont réalisés sur toute la hauteur du mur et avec une largeur supérieure ou égale à 15 cm.
- ils doivent être réalisés au moins dans les angles saillants et rentrants des maçonneries, ainsi que de part et d'autre des joints de fractionnement du bâtiment.
- Ces chaînages constituent de simples liaisons et n'interviennent pas comme des poteaux d'ossature. Ils ceinturent la maçonnerie en liaison avec les chaînages horizontal et. S'opposent par ailleurs au soulèvement des planchers dans les angles.
- Ces chaînages doivent être réalisés en utilisant de préférence des blocs spéciaux dits blocs d'angle.

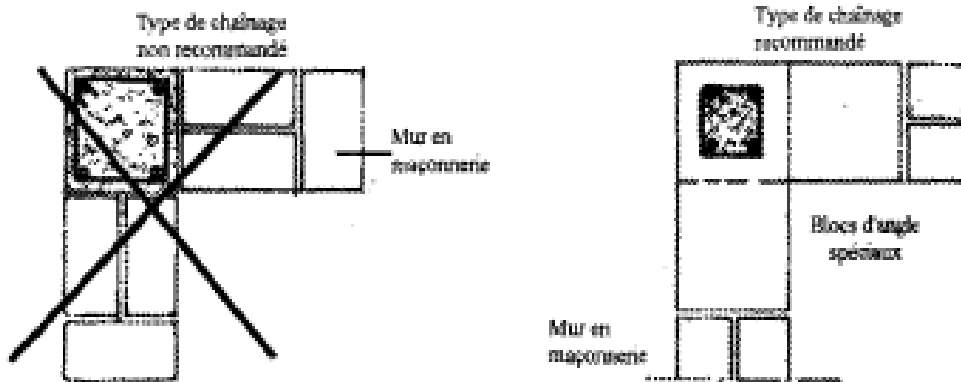


Figure III-9 Réalisation des chaînages verticaux

III.4.6.1.3 Ferrailage des chaînages

Ce ferrailage doit être conforme aux Règles Parasismiques Algériennes qui recommandent :

- Les armatures minimales à prévoir dans les chaînages verticaux et horizontaux ne devront pas être inférieures à 4 HA 12.
- Les armatures des chaînages verticaux seront convenablement ancrées dans les chaînages supérieurs des fondations et dans les chaînages horizontaux de la maçonnerie.
- Les armatures longitudinales des chaînages seront fixées par des armatures transversales dont l'espacement ne sera pas supérieur à la plus petite dimension de la section en béton.
- Les armatures transversales auront au minimum un diamètre de 8mm.
- Les longueurs d'ancrage et de recouvrement droit seront égales à 50Φ

A : min. 4 HA 12 A = section minimale d'armature transversale exprimée en cm:

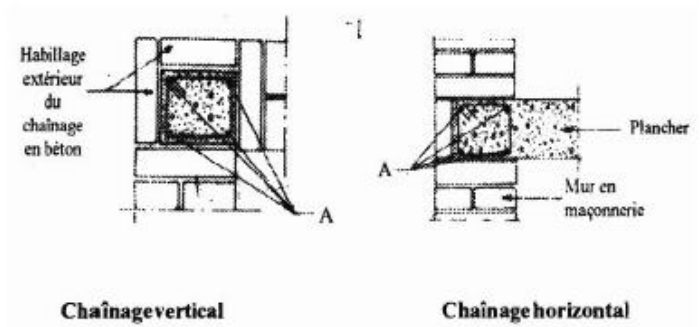


Figure III-10 Armatures minimales des chaînages horizontaux et verticaux

III.4.6.2 Appuis des planchers ou toitures

Ces appuis sont conçus de telle façon que la stabilité du mur ne soit pas compromise sous l'effet des charges provenant des planchers.

Il est recommandé de réaliser l'appui du plancher au moins égal au 2/3 de l'épaisseur du mur, enduits non compris (voir chaînages horizontaux figure 3).

III.4.6.3 Appuis des linteaux

On rappelle que les linteaux sont des éléments en béton armé (parfois en métal ou en bois) placés au dessus de chaque ouverture dans le mur (fenêtre, porte etc. ...) où ils doivent assurer la répartition des charges.

La longueur d'appui de linteaux sera au minimum égale à 20 cm (voir figure III -11a).

III.4.6.4 Trumeaux porteurs

D'après le Règlement Parasismique Algérien en vigueur, les ouvertures dans les murs porteurs extérieurs et les trumeaux doivent respecter les limitations suivantes (voir figure III -10b) :

- Pour les trumeaux extérieurs

$$a_1 \geq 1,00\text{m}$$

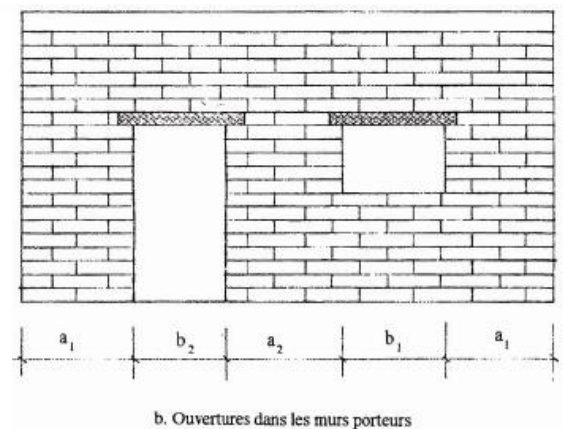
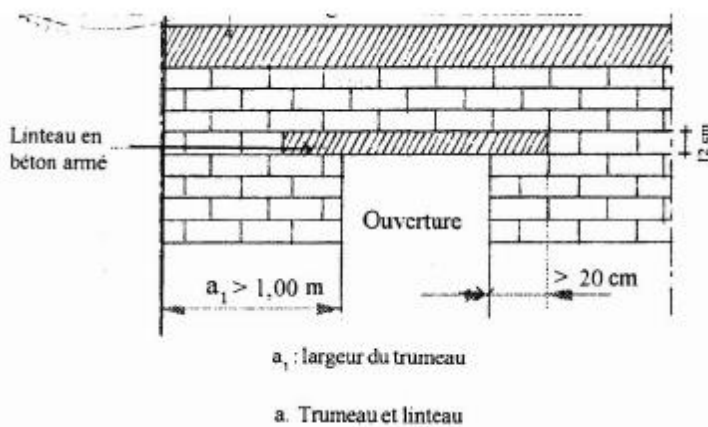
- Pour les autres trumeaux :

$$a_2 \geq 1,00 \text{ m pour la zone III}$$

$$a_2 \geq$$

$$\frac{b_1 + b_2}{3}$$

pour les zones I et IIaIIb



Les trumeaux porteurs de moins de 1,00 m de largeur doivent comporter un élément porteur en béton prolongé au moins jusqu'au chaînage horizontal (voir figure III-12).

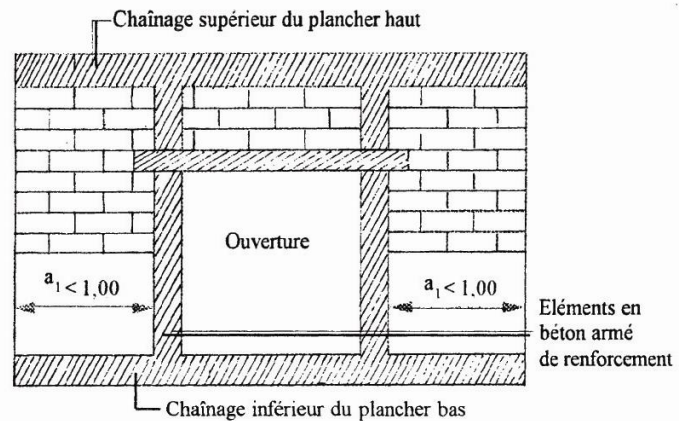


Figure III-1211 Renforcement des trumeaux pour $a_1 < 1,00m$

Commentaire

Quand les efforts transmis par cet élément porteur conduisent à des contraintes supérieures aux contraintes admissibles dans le matériau constitutif de la maçonnerie, une semelle de répartition ou un renforcement de ce chaînage est nécessaire. Les armatures du trumeau en béton sont ancrées dans cette semelle.

III.4.6.5 Appuis des baies

Les appuis de baies en béton armé de grande longueur (supérieure à 2,00 m) doivent comporter un pourcentage d'armatures longitudinales suffisant pour limiter les effets de retrait.

Commentaire

A défaut de justification, un pourcentage minimal forfaitaire de 0,25 % est admis.

III.4.6.6 Ouvrages saillants

Il s'agit des ouvrages en béton armé, saillants en façade (bandeaux, balcons, loggias, coursives ou corniches etc...) dont le but principal est de protéger les façades des eaux de ruissellement, tout en leur donnant un certain caractère architectural. Leur section doit être réduite à la valeur strictement nécessaire.

Commentaire

Il faut éviter les éléments extérieurs volumineux en béton, (voir Figure III.12).

III.4.6.7 Bandoaux saillants

- Leur débordement en façade ne doit pas être excessif. En général, il ne dépasse pas 5 cm.

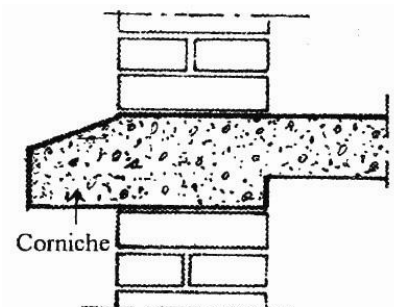


Figure III-13 Exemple de corniche non admise

- Leur longueur est en général égale à la distance entre joints de fractionnement de l'ouvrage.

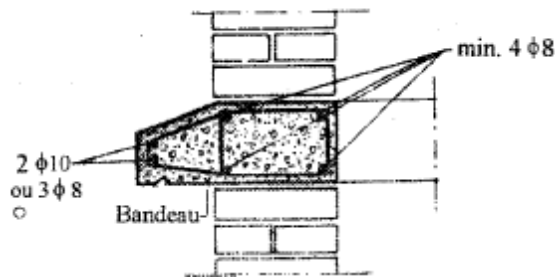


Figure III-14 Armature minimale d'un bandeau

- Ils doivent comporter une section longitudinale d'armature à haute adhérence, de la nuance Fe E40 au moins égale à 0,50 % de la section du béton.

Sur la partie apparente verticale, sont disposés au minimum 2 ϕ 10 ou 3 ϕ 8 suivant la hauteur de l'élément (Figure III III-14)

III.4.6.8 Balcons - Loggias - Coursives ou corniches

- Ces éléments sont recoupés par des joints transversaux. La distance entre deux joints successifs est au plus égale à :

4 m dans les régions humides

2 m dans les régions arides

- Ces éléments doivent comporter un pourcentage minimal d'armatures longitudinales de classe Fe 40 au moins égale à 0,25 % de la section du béton.

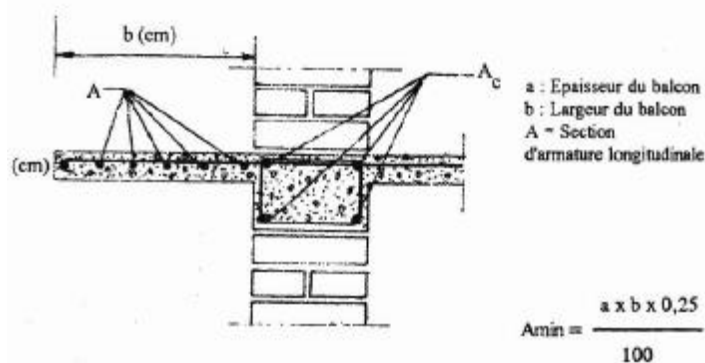


Figure III-15 Armature minimale d'un balcon

Commentaire

Les barres de très gros diamètre placées à l'extrémité d'un élément mince exposé aux intempéries sont à éviter en raison du risque de corrosion de l'acier et d'éclatement du béton.

III.4.6.9 Jonction et croisement des murs

A la rencontre de deux murs, on s'assurera de la continuité de l'appareillage au-delà du point de jonction.

Cette continuité peut être réalisée à partir d'un harpage soigneusement exécuté.

III.4.6.9.1 Cas des murs dont l'épaisseur est celle du matériau.

Pour les murs en briques par exemple, la jonction peut se faire par l'interposition de briques aux 3/4 dans la zone de jonction (voir figure III.17)

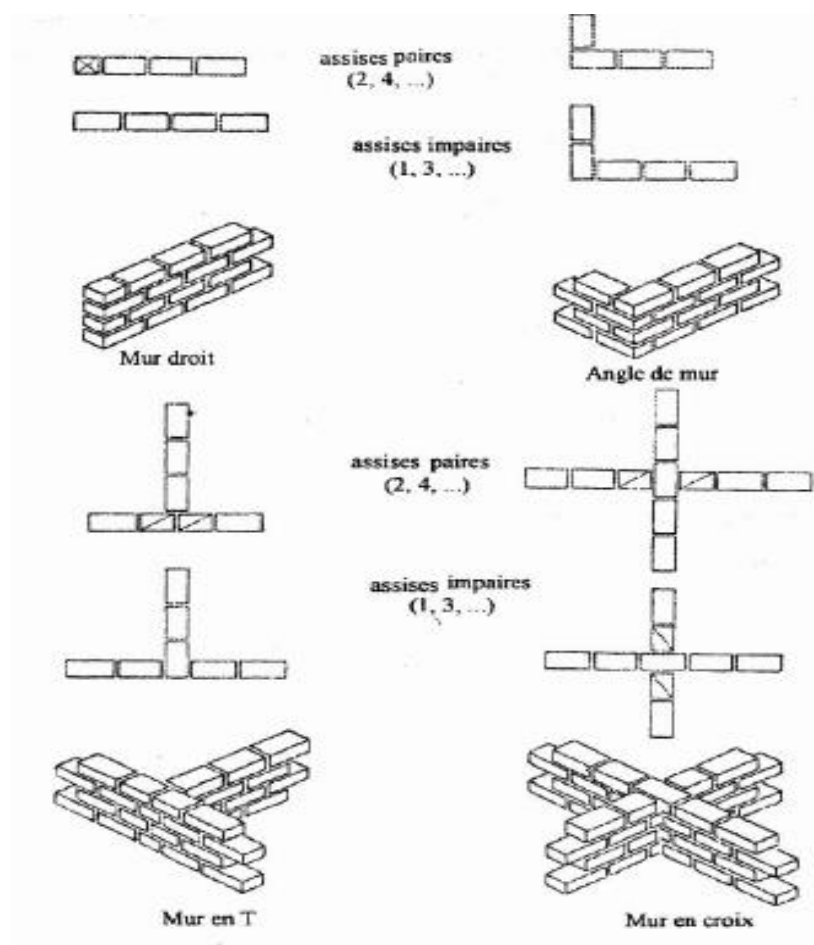


Figure III-16 jonction et croisement des murs dont l'épaisseur est celle du matériau

Pour les autres blocs, la jonction ou le croisement des murs peut se faire par la mise en place d'armature dans les joints avec une longueur d'ancrage de 0,90 m au-delà du croisement. IL est important de veiller au bon enrobage de ces armatures par le mortier (voir Figure III 18).

Le renforcement sera constitué par deux barres horizontales placées dans le mortier des joints horizontaux

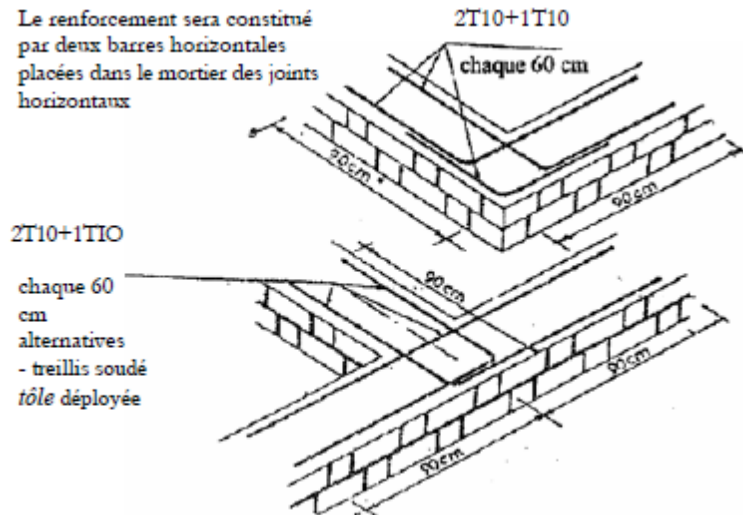


Figure III-17 Armatures dans les assises à l'endroit du croisement des murs

III.4.6.9.2 Cas des murs dont l'épaisseur est plus grande que celle du matériau.

La jonction ou le croisement des murs se fera par imbrication des briques ou blocs et par assises alternées. Pour augmenter la raideur de l'ensemble, il est recommandé de disposer des armatures dans les assises ou toutes les deux ou trois assises, par exemple à l'endroit du croisement des murs (voir figure III 19)

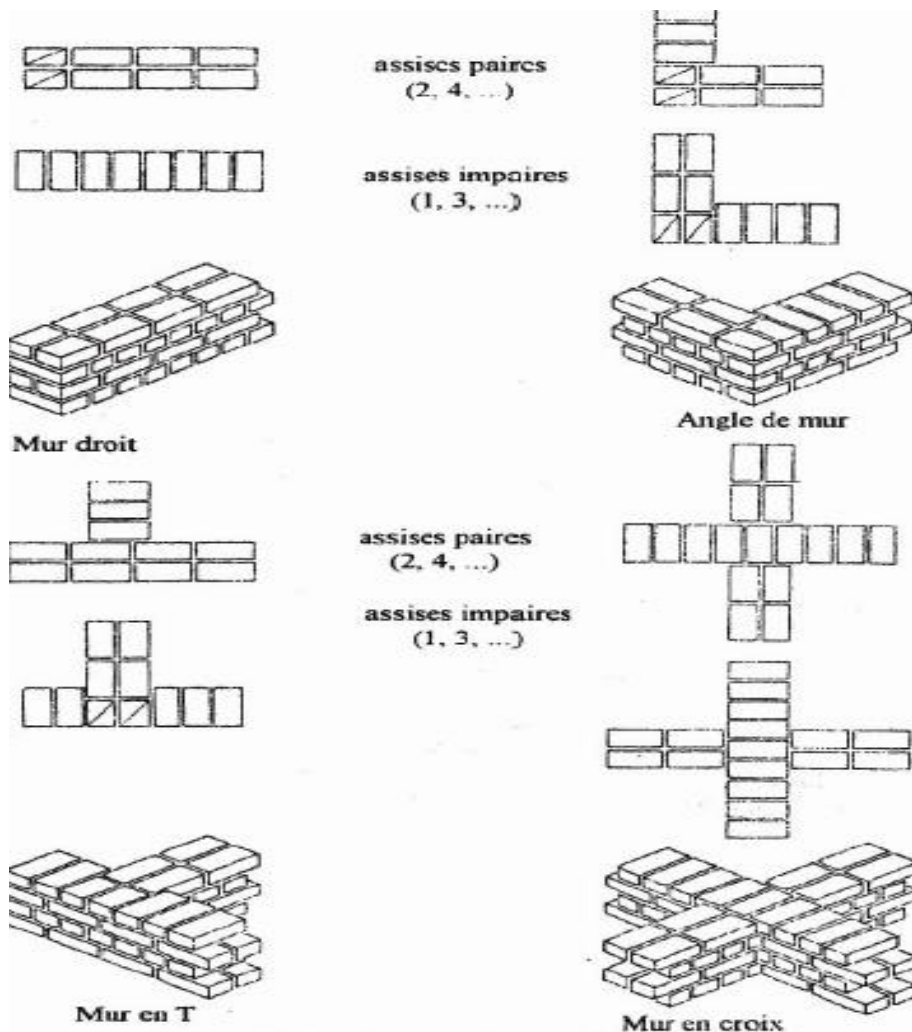


Figure III-18 Jonction et croisement des murs dont l'épaisseur est plus grande que celle du matériau

III.4.7 Epaisseur des murs

La conception des murs, en l'occurrence la détermination de l'épaisseur du mur de façade en maçonnerie, sera fonction, en majeure partie, de leur exposition à l'eau de pluie lorsque le mur est de remplissage et à la fois des efforts sollicitant le mur lorsque celui-ci est porteur.

Tableau III-6 Valeurs tolérées du coefficient de capillarité C

Éléments constitutifs de maçonnerie	Coefficient de capillarité C
Produits rouges	
- Brique creuse	≤ 15
- Brique perforée	≤ 30
- Brique pleine pressée	≤ 60
- Brique pleine filée à l'étireuse horizontale	≤ 40
Brique Silico-calcaire	≤ 10 zone non aride
Béton de terre stabilisée et bloc de plâtre	≤ 25 zone aride

L'épaisseur considérée est l'épaisseur brute des parois en maçonnerie des murs simples ou de la paroi extérieure des murs avec doublage.

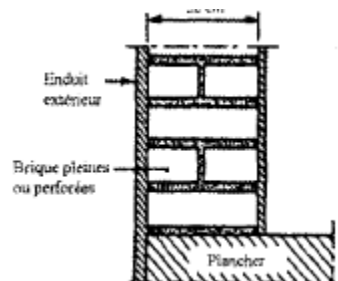


Figure III-19 Epaisseur minimale d'une paroi simple de maçonnerie de brique pleine de terre cuite, de BTS, de plâtre, silico-calcaire,

L'épaisseur minimale brute de la paroi extérieure en maçonnerie est en règle générale, et quel que soit le type de mur, de 20 cm.

Cette épaisseur minimale varie en fonction de la nature et des dimensions de fabrication des éléments constitutifs (brique ou bloc).

Blocs creux de granulats courants ou légers
Enduit Traditionnel

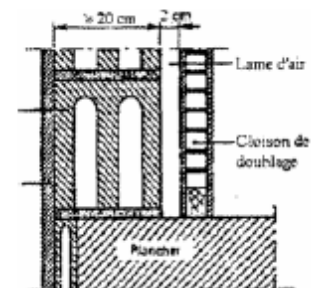


Figure III-20 Epaisseur minimale d'une paroi double de maçonnerie de blocs creux de granulats courants ou légers.

III.4.8 Prescriptions particulières

Les prescriptions particulières concernant les blocs de maçonnerie en plâtre et en béton de terre stabilisée (BTS) doivent répondre aux exigences des documents réglementaires y afférents :

- Recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée. **C.N.E.R.I.B.1993**(Approbation par Arrêté du 5 Décembre 1987).
- Recommandations pour la construction en plâtre. **C.N.E.R.I.B. 1993**(Approbation par Arrêté du 8 Novembre 1988).

III.4.9 Règles de calcul

III.4.9.1 Détermination des caractéristiques mécaniques des parois des maçonneries

III.4.9.1.1 Résistance moyenne de rupture à la compression

Pour la détermination de la résistance moyenne de rupture en compression R, deux méthodes peuvent être utilisées :

- Essais directs sur murets ou petits piliers effectués conformément aux modalités à l'annexe (1).
- Application de la formule (3.1.) connaissant les résistances des matériaux (blocs, mortier) de la maçonnerie :

$$R=0,551 \sqrt[3]{\sigma_m \times \sigma_b^2} \dots (3.1)$$

où :

R : résistance moyenne de rupture en compression exprimée en MPa

σ_m : résistance à la compression du mortier exprimée en MPa

σ_b : résistance à la compression du bloc ou de la brique exprimée en MPa

Commentaire

Des essais sur murs ou colonnes à échelle réelle, d'éléments de structure (hauteur d'étage) peuvent également être réalisés mais de tels essais sont très coûteux et il est difficile de les interpréter sur un nombre limité de maquettes.

L'application de la formule (3.1) est plus pratique. Les valeurs de **σ_m, σ_b** normalisées facilitent son application. Les modalités d'essais sont décrites en annexe.

Les résistances moyennes de rupture (en compression, flexion, cisaillement) permettent de déterminer les valeurs des résistances admissibles de calcul ainsi que le module de déformation longitudinale E.

Module de déformation longitudinale

Le module de déformation initiale E. est pris dans les calculs courants égal à :

$$E_o = \alpha \times R \quad \dots\dots (3.2)$$

(E_o exprimé en MPa),

R : valeur moyenne de la résistance de rupture exprimée en MPa.

α: constante élastique de la maçonnerie définie par le **DTR C2-45** en fonction du type de la maçonnerie et de la classe du mortier.

Tableau III-7 Valeur du Coefficient α

Type de maçonnerie	Classe du mortier (MPa)			Résistance nulle du mortier (mortier fraîchement posé)
	> 25	10	4	
- Brique pleine de terre cuite - Brique silico -calcaire - Brique de béton léger ou cellulaire	1000	750		200
- Béton de terre stabilisée - Plâtre		750	500	200
- Brique pleine de terre cuite creuse		750		200

Le module de déformation E est pris égal à E. pour des contraintes ne dépassant pas 0,2 R, au delà il est donné par la relation empirique suivante :

$$E = E_o (1 - \sigma) / 1,1 R \quad \dots\dots(3.3)$$

E : module de déformation longitudinale exprimée en MPa.

σ: contrainte appliquée à l'endroit sollicité de la maçonnerie exprimée en MPa.

Le module de Young à long terme est de l'ordre de 2/3 à 1 /3 du module de Young donné par la formule (3.3).

Résistance admissible de calcul en compression

La résistance admissible de calcul en compression est obtenue par application de la formule (3.4)

$$R_{adm} = R_n / K_{cb} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

K_c: coefficient de sécurité en fonction des caractéristiques géométriques, ou du processus de production de l'élément constitutif de maçonnerie, et donné au tableau III.8

Tableau III-8 Valeur de K

Eléments constitutifs de maçonnerie	K _c
Brique de forme habituelle (brique silico - calcaire, brique pleine de terre cuite)	1,4
Bloc de grande taille (béton cellulaire)	1,6
Brique ou bloc obtenu par vibrotraitement (béton de terre stabilisée, parpaing)	1,2

R_n : résistance normative de calcul définie comme étant la limite de résistance de la maçonnerie à 28 jours, arrêtée en tenant compte du chargement statique, sur la base d'expérience faite sur un poteau en maçonnerie de hauteur $h > 3d$ (d est le plus petit côté de la section transversale).

R_n est donnée par :

$$R_n = R (1 - 1,64 v) \dots\dots\dots(3.5)$$

R : résistance moyenne de rupture en compression définie en (3.1).

v : Coefficient de variation de la maçonnerie déterminé par la relation suivante

$$v = \frac{s}{R}, \quad s : \text{écart type donné par la relation}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (R_i - R_{moy})^2}{(n - 1)}}$$

R_i : Valeur de la résistance de l'échantillon "i"

n : Nombre d'essais effectués

R_{moy} = Résistance moyenne de rupture

En général, on prend

v = 0,15 pour une maçonnerie simple

v = 0,18 pour une maçonnerie spéciale : maçonnerie strictement contrôlée et soigneusement exécutée.

III.4.9.1.2 Résistance admissible à la traction due à la flexion latérale

La résistance admissible de calcul de la maçonnerie à 1 a flexion latérale est obtenue par:

$$R_{adm} = R_n / K_f \dots\dots\dots(3.6)$$

R_n : résistance normative donnée à l'article (3.1.3.) avec R résistance moyenne de rupture en flexion latérale conformément à l'annexe 1.

K_f : coefficient de sécurité donné au tableau III-8

Tableau III-9 Valeur de K_f

Eléments constitutifs de maçonnerie	K_f
Brique de forme habituelle (brique silico-calcaire, brique pleine de terre cuite)	1,6
Bloc de grande taille (béton cellulaire)	1,4
Brique ou bloc obtenu par vibrotraitement (brique de terre stabilisée, parpaing)	1,5

En l'absence de valeurs expérimentales, la résistance normative en flexion de la maçonnerie peut être prise égale à 0,5 MPa.

III.4.9.1.3 Résistance admissible au cisaillement

La résistance normative de la maçonnerie au cisaillement est déterminée :

- soit à partir d'essai direct de cisaillement.
- soit à partir de la relation :

$$R_n = \text{Min} (0,4 R_{\sigma g}, R_{lim}) \quad (3.7)$$

σ_g : contrainte de compression de la maçonnerie sous charge permanente au niveau considéré exprimée en MPa.

R : contrainte de cisaillement à contrainte verticale nulle exprimée en MPa..

R_{lim} : contrainte de cisaillement limite exprimée en MPa.

Les valeurs de R et R_{lim} sont données dans le tableau III-10 en fonction de la résistance à la compression du mortier et des éléments de la maçonnerie.

Tableau III-10 Valeurs de R et R_{lim}

Résistance des blocs ou briques (MPa)	Résistance du mortier (MPa)	R (MPa)	R_{lim} (MPa)
< 15	≥ 10	0,3	1
	< 10	0,2	
≥ 15	≥ 10	0,3	1,2
	< 10	0,2	

Les valeurs données au tableau III-10 sont à diviser par 2 dans le cas où le pourcentage de perforation excède 40%.

La résistance admissible au cisaillement est obtenue par la division de la résistance normative par le coefficient de sécurité K_f

$$f_{adm} = f_n / K_f \quad \dots\dots(3.8)$$

f_n étant la résistance normative de la maçonnerie au cisaillement exprimée en MP a.

Commentaire

La résistance de la maçonnerie aux efforts de cisaillement dépend du frottement dans les joints d'assise et de la cohésion de la maçonnerie,

- de la résistance à la traction des éléments de la maçonnerie,
- de la résistance à la compression de la maçonnerie.

La résistance au cisaillement de la maçonnerie est donnée par la plus petite valeur des trois relations suivantes (courbe enveloppe).

$$f_n = f_0 + 0,4 \sigma_g$$

$$f_n = 0,45 R_b^t \sqrt{1 + \frac{\sigma_g}{R_b^t}} \quad \dots\dots(3.8)$$

R_b^t : résistance à la traction du bloc exprimée en (MPa,

K_f : coefficient de sécurité défini dans le tableau III-12

σ_g : Contrainte de compression due aux charges permanentes.

C'est la première relation qui est généralement la plus faible.

III.4.9.1.4 Efforts sollicitant les parois de maçonnerie

Les efforts pris en compte sont les forces verticales (charges permanentes et surcharges) et les forces horizontales (actions du vent et du séisme).

Commentaire

Il ne sera pas envisagé les sollicitations exceptionnelles (chocs, explosions, etc...).

Les efforts dû aux charges verticales, sur une paroi donnée, à un niveau donné, Sont évalués en admettant la discontinuité des divers éléments de plancher au droit des murs, et une descente de charge selon les lignes de rupture.

Les efforts dûs aux charges horizontales (vent) sont évalués conformément au règlement en vigueur.

Les contraintes dues aux charges verticales sont supposées uniformément réparties en partie courante de la paroi (en général à mi-hauteur).

Aux points singuliers, la répartition des contraintes n'est pas uniforme. Il faut tenir compte de l'excentrement des charges.

Commentaire

Par points singuliers, on entend les points situés immédiatement au droit des sections horizontales des trumeaux, appuis de linteaux, appuis de poutres, appuis de plancher.

III.4.9.1.5 Cas des forces ponctuelles

Pour les forces ponctuelles verticales (appui d'une poutre par exemple), il est admis qu'elles se répartissent uniformément à l'intérieur de la zone délimitée par deux droites partant du point d'application de la charge et inclinées de 30° sur la verticale, (voir figure III.9).

Au niveau du point d'application de la charge localisée, la contrainte admissible est majorée de 25%, sans pour autant que la contrainte admissible soit dépassée au-dessous du niveau

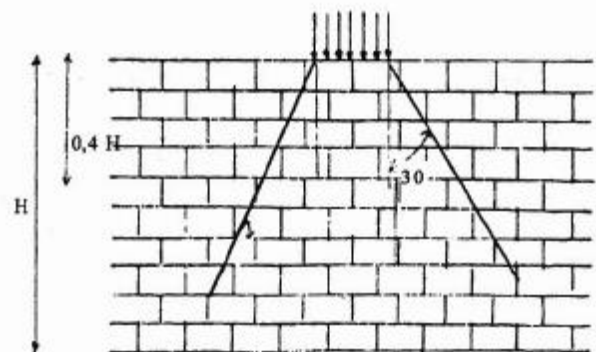


Figure III-21 Application d'une charge localisée

délimité par 0,4 H à partir du point d'application de la charge (H étant la hauteur du mur).

III.4.10 Méthode de calcul

III.4.10.1 Calcul en compression

La vérification des pièces comprimées, se fait en tenant compte de la diminution de la capacité portante, due au flambement, et de l'augmentation de la flèche due à l'action prolongée de la charge (fluage).

La contrainte de compression à la base du mur considérée (égale à l'effort vertical N divisé par la section d'appui effectif de N soit A_c) doit vérifier la relation suivante :

$$\sigma = N / A_c \leq m_{ld} \Phi_1 \cdot R_{adm} \cdot \omega \dots\dots(3.10)$$

où :

A_c: section effective d'appui exprimée en cm².

R_{adm}: résistance admissible de calcul en compression exprimée en MPa

m_{id}: coefficient de fluage de longue durée

Φ₁ : coefficient de flambement

ω: coefficient de majoration sur A,

Si la section du mur est rectangulaire (largeur b, épaisseur d) et si la charge N est excentrée de e_o, la valeur de **A_{cest}** donnée par :

$$\mathbf{A_c = b \times d \left(\frac{d}{2} - e_o \right) \dots\dots(3.11)}$$

L'excentricité de calcul (e_o) est évaluée en prenant en compte l'excentricité réelle (e_{o'}) et l'excentricité accidentelle (e_{oaccid}) exprimée en cm. C'est-à-dire :

$$\mathbf{e_o = e_o' + e_{accid} \dots\dots(3.12)}$$

avec : **e_{accid} = 2cm**

$$\mathbf{e_o' = M/N \dots\dots(3.13)}$$

où:

M : moment fléchissant exprimé en MN.m

N : effort normal agissant sur le mur exprimé en MN.

En général, Le coefficient de flambement **Φ₁** dépend des propriétés élastiques du matériau, caractérisé par la constante élastique a et par l'élancement du mur défini par le rapport :

$$\mathbf{\lambda_r = \frac{l_o}{r} \dots\dots(3.14)}$$

λ_r: coefficient d'élancement

l_o : longueur de flambement (m) selon 3.18

r : rayon de giration (m)

Le coefficient de flambement **Φ₁** est donné par :

$$\mathbf{\Phi_1 = \Phi_1 \left[1 - e_o / d \left(0,06 \lambda_h - 0,2 \right) \right] \dots\dots\dots(3.15)}$$

d : épaisseur du mur (cm)

λ_h: élancement géométrique du mur

Φ: coefficient de flambement qui dépend de λ_h et α

e_o: excentricité de calcul définie plus haut.

$$\mathbf{\lambda_h = l_o / d \dots\dots\dots (3.16)}$$

l_o= longueur de flambement donnée par la formule (3.18).

Le tableau 7 donne **Φ** en fonction de l'élancement fictif.

$$\lambda_h^f = \lambda_h \sqrt{\frac{1000}{\alpha}} \quad \dots\dots(3.17)$$

λ_h : Constante élastique du matériau

λ_h^f	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Φ	1	0,96	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,7	0,65	0,61	0,56	0,52	0,49 t	0,45

Tableau III-11 Valeur de Φ

La longueur du flambement l_0 d'un mur est donnée par :

$$l_0 = p.H \quad \dots\dots\dots(3.18) \text{ Avec } p :$$

coefficient déduit graphiquement de la figure 19 en fonction des Conditions de liaison des bords verticaux du mur et du rapport H/L. H et L sont définis dans la figure III.20.

Le coefficient de fluage m_{fd} est donné par :

$$m_{fd} = 1 - \eta (1 + 1,2e)/d \text{ pour l'épaisseur du mur } d < 30 \text{ cm (3.19)}$$

$m_{fd} = 1$ pour $d \geq 30$ cm avec η donné dans le tableau III-14, en fonction de $\lambda_h = I_0/d$

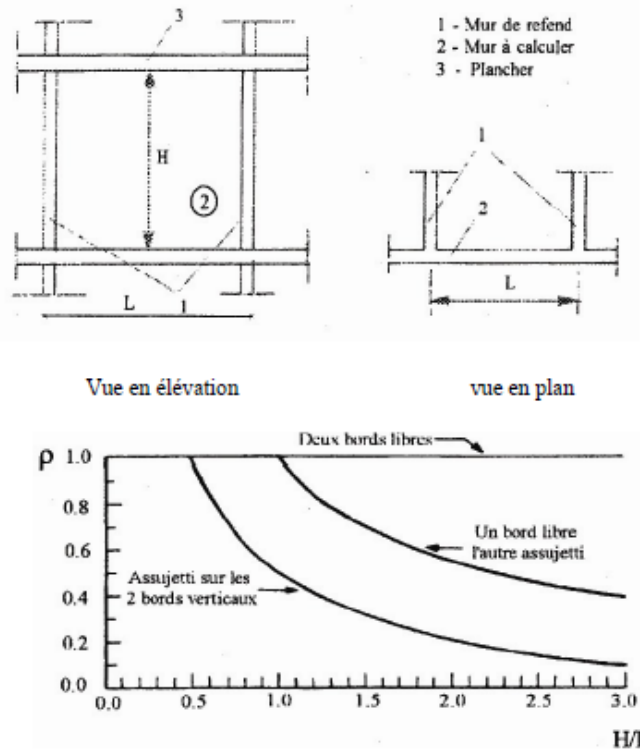


Figure III-22 Valeur de p en fonction des conditions de liaison des bords verticaux du mur et du rapport de la hauteur H à la longueur L du mur

Tableau III-12 Valeur de η

λ_h	< 10	12	14	16	18	20	22	24	26
η	0	0,04	0,08	0,12	0,15	0,2	0,24	0,27	0,31

Pour simplification, on peut prendre les valeurs suivantes de m_{fd} données par le tableau suivant

Tableau III-13 Valeur de m_{fd}

d (cm)	15	20	25
m_{fd}	0,76	0,87	0,96

Le coefficient ω de majoration de contraintes sur A est donné par :

$$\omega = (1 + e) / 1,5d \dots(3.20)$$

Pour une maçonnerie de pierre, ou de béton cellulaire et caverneux

$$\omega = 1$$

III.4.10.2 Calcul en flexion latérale

Le calcul des murs sous l'action des charges latérales s'effectue selon les méthodes de calcul des plaques supposées simplement appuyées à leurs bords.

Commentaire

Une approche plus simple consiste à décomposer le mur en plusieurs bandes et les dimensionner selon les hypothèses de calcul des poutres.

III.4.10.3 Calcul au cisaillement

La contrainte de cisaillement est donnée

$$\tau = (Q \cdot S_{mb}) / (I_m \times d) \dots\dots\dots(3.21)$$

Q : effort tranchant dans le mur exprimé en MN

S_m: moment statique de la section transversale du mur exprimée en m³

I_m : moment d'inertie de la section transversale exprimé en m⁴

d: épaisseur du mur exprimé en m

S_m et **I_m** sont à déterminer pour la partie comprimée de la section transversale du mur en cas de fissuration de celui-ci.

Procédure de conception d'un mur de maçonnerie sous des charges de gravité verticales

- 1 Tout d'abord, supposons l'épaisseur du mur de maçonnerie
- 2 Estimer la charge totale réalisée sur le mur et la contrainte de compression développée à la base du mur
- 3 Déterminer le rapport d'élancement et l'excentricité (en utilisant les directives du code de la maçonnerie) et obtenir les facteurs de réduction des contraintes à partir du code
- 4 Contrainte de compression admissible = (contrainte de compression de base) \times (facteurs de réduction des contraintes)
- 5 Assimiler la contrainte de compression admissible à la contrainte de compression développée à la base du mur et obtenir la valeur de contrainte de compression de base
- 6 Les codes de conception de la maçonnerie donnent des relations (sous forme tabulaire ou sous forme graphique) entre la résistance de l'élément de maçonnerie, le type de mortier et la

contrainte de compression de base. Pour toute valeur calculée de la contrainte de compression de base,

sélectionnez la résistance de la brique ou du bloc et le type de mortier à partir de ces relations, sous des charges concentriques et excentriques.

Des procédures de conception similaires peuvent être élaborées en utilisant les principes de conception aux états limites à condition qu'une procédure soit établie pour calculer la résistance à la compression caractéristique de la maçonnerie SSB en utilisant les valeurs de résistance des prismes de maçonnerie. Il est encore possible d'entreprendre d'autres études approfondies sur le comportement des murs de maçonnerie SSB à grande échelle

III.4.10.4 Cas des murs doubles

Dans les murs doubles porteurs, seule la paroi constituée avec le matériau le moins déformable est prise en considération.

Les attaches prévues entre deux parois, ne participent pas à la résistance sauf avec justifications spéciales.

Commentaire

Lorsque les deux parois ont des épaisseurs différentes, les deux parois sont à base de matériaux différents, celle qui est constituée par le matériau le moins déformable est normalement considérée comme porteuse.

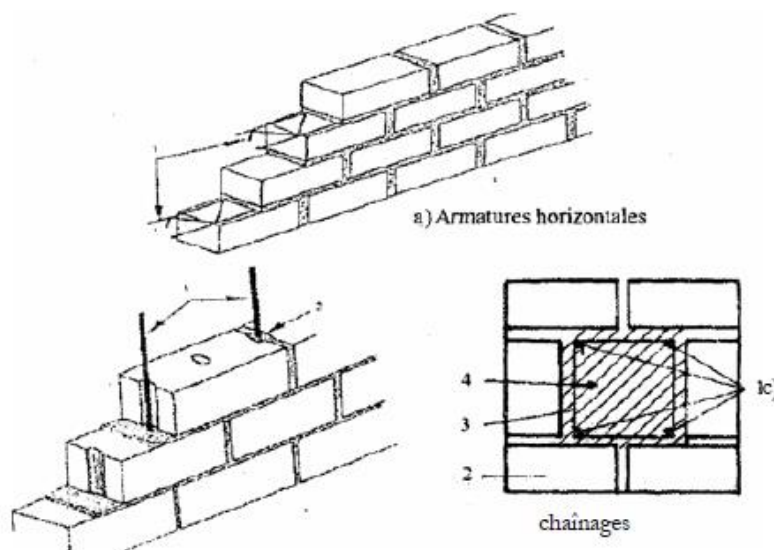
III.4.11 Maçonnerie armée

La maçonnerie armée est une maçonnerie de briques ou de blocs dans laquelle sont logées des armatures, soit horizontalement dans les joints

de
III.24a)

dans les
effet ou
les

(figure



b) Armatures verticales

1. armatures pour béton
2. coulis de mortier

1. armatures longitudinales
2. bloc ou brique
3. armature transversale
4. béton

mortiers (figure
soit
verticalement
cavités
ménagées à cet
existantes dans
éléments
maçonnés
III.24b).

Figure III-23 Armatures dans les maçonneries

Une telle maçonnerie devient plus robuste et plus stable.

Les armatures sont disposées de manière à reprendre les contraintes de traction, de cisaillement, et éventuellement de compression. L'armature est également utilisée comme moyen de prévention de fissures dues au retrait, à la dilatation et aux tassements.

Dans le cas où les armatures sont disposées horizontalement dans les joints de mortier, il faut assurer leur protection efficace vis à vis de la corrosion.

Parfois, on utilise aussi des maçonneries composites : maçonnerie renforcée avec du béton armé (figure III 21 c).

III.4.12 Calcul des murs de contreventement

III.4.12.1.1 Schémas statiques

- La résistance d'une structure en maçonnerie aux efforts horizontaux est généralement assurée par un système formé de planchers et de murs perpendiculaires aux façades.

Le cheminement des efforts est schématisé comme suit

- Les actions horizontales sont transmises aux planchers par les façades ;
- Les planchers agissent comme des diaphragmes horizontaux et distribuent les actions sur les murs transversaux ;
- Les murs transversaux agissent donc comme des consoles verticales encastrées au pied du bâtiment.

Si les planchers sont considérés comme très rigides, les efforts horizontaux se répartissent sur les murs de contreventement proportionnellement à leurs rigidités de flexion. Si par contre, les planchers sont faiblement rigides en comparaison des murs de contreventement, il est indiqué

de calculer chaque mur sous l'effet du vent agissant sur la tranche verticale de la façade qu'il raidit.

Des ouvertures dans les murs de contreventement peuvent modifier notablement leur comportement qui peut devenir intermédiaire entre celui d'une console unique et celui de plusieurs consoles reliées par des bielles. Il faut, dans ce cas, adopter un schéma approprié, qui permet de déterminer à la fois la résistance et la raideur des diverses consoles.

Pour le calcul de la résistance du mur de contreventement aux efforts horizontaux, une partie des murs perpendiculaires fonctionnant comme ailes d'un profil composé, peut être prise en compte pour autant que le croisement des murs soit correctement appareillé pour reprendre les contraintes tangentes à cet endroit.

Il faut tenir compte des moments de torsion se produisant lorsque la résultante des sollicitations est décentrée par rapport au centre de rigidité de l'ensemble de la structure.

III.4.12.2 Détermination des sollicitations

Dans l'analyse des murs de contreventement, il faut combiner les valeurs de calcul des actions horizontales aux charges verticales.

III.4.13 Exemple de calcul

III.4.13.1 Introduction

L'objet de cette partie est de montrer à travers un exemple simple l'application des différentes formules et expressions contenues dans le D.T.R. **C2-45 REGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES MACONNERIES**

Il est donné, dans ce qui suit, la méthodologie générale du calcul d'une structure en maçonnerie. (Détermination des caractéristiques mécaniques des parois des maçonnerie)

III.4.13.2 Méthodologie de calcul

a) - Effectuer la descente de charge

- Répartir les charges

* Charges verticales

* Charges horizontales

b) - Sélectionner les zones critiques

c) - vérifier la résistance et la stabilité des éléments de maçonnerie individuels aux endroits critiques pour les combinaisons de charges défavorables

III.4.13.3 Pré dimensionnement

On peut appliquer la formule de RONDLET

$$d = \frac{(H + D)}{48} + (0.027 \text{ à } 0.054)$$

Qui donne l'épaisseur du mur (d) en fonction de : H = Σh = hauteur en (m) mesurée du sommet à un plancher quelconque.

D = l'espace en (m) compris entre les deux murs, les coefficients 0,027 et 0,054 dépendent de la qualité de la maçonnerie, c'est-à-dire bonne ou médiocre.

Dans notre cas maçonnerie en BTC on suppose que l'épaisseur retenue pour les murs est de 30 cm.

III.4.13.4 Descente de charge

La charge revenant à chaque élément porteur se fait selon les règles habituelles en évaluant les charges et surcharges et en admettant l'hypothèse de discontinuité entre les divers éléments.

On admet :

- charges permanentes : G = 650 kg/m²

- surcharges : S = 175 kg/m²

Dans ce qui suit on suppose que la charge revenant au mur le plus sollicité.

III.4.13.5 Caractéristiques des matériaux

mortier $\sigma_m = 10$ MPa bloc $\sigma_b = 15$ MPa

III.4.13.6 Géométrie du mur le plus sollicité

Hauteur d'étage = 3,00 m

Largeur du mur = 2,00 m

III.4.13.7 Caractéristiques du mur en maçonnerie

Résistance moyenne de rupture

$$R = 0,551 \sqrt[3]{\sigma_m \times \sigma_b^2} \text{ Formule (3.1)}$$

$\sigma_m = 10$ MPa , $\sigma_b = 15$ MPa

d'où **R = 7,2 MPa**

Module de déformation longitudinale

E₀ = α x R , Formule (3.2) (tableau 3)

α = 750

E₀ = 5400 Mpa

Résistance admissible de calcul en compression.

$$R_{adm} = R_n / K_c \text{ Formule (3.4)}$$

$$R_n = R (1 - 1,64 V) \text{ Formule (3.5)}$$

$$V = 0,15 \quad R_n = 7,2(1 - 1,64 \cdot 0,15) = 5,43 \text{ MPa}$$

K_c = 1,4 (Tableau 4)

D'où $R_{adm} = 5,43 / 1,4 = 3,88 \text{ MPa}$

Résistance admissible en flexion latérale

On suppose que $R_n = 0,5 \text{ MPa}$ article 3.1.4

d'où $R_{adm} = 0,5 / 1,6 = 0,313 \text{ MPa}$

III.4.13.8 Résistance admissible au cisaillement

$\tau_n = \text{Min} (0,4 + 0,3 \sigma_g \cdot \tau_{lim})$ (Tableau 6) Formule (3.7)

Avec : $0,3 \tau = \text{MPa}$

$0,4 \cdot \sigma_g = 1,5 \text{ MPa}$

$\tau_{lim} = 1,2 \text{ MPa}$

$\tau_n = 1,2 \text{ MPa}$

$\tau_{ladm} = \tau_n / K_f$ Formule (3.8)

$K_f = 1,6$ (Tableau 5)

$\tau_{ladm} = 1,2 / 1,6 = 0,75 \text{ Mpa}$

III.4.13.9 CALCUL

- Calcul en compression

Contrainte appliquée de compression

$$\sigma = N/A_c$$

Considérons une bande de 1,00 ml découpée dans un mur: d'où

$b = 1,00 \text{ m}$. Excentricité

$$e_0 = e_{accid} + e_0' \text{ formule (3.12)}$$

$$e_{accid} = 2 \text{ cm}$$

$$e_0' = M/N \text{ à calculer forfaitairement Formule (3.13)}$$

On prend $M/N = 0,5 \text{ cm}$

Soit $e_0 = 2,5 \text{ cm}$

Remarque : $e_0' = 0$ (Pour le RDC compte tenu de l'importance de l'effort normal devant le moment fléchissant)

$$A_c = 1 \times 2 \times ((0,25/2) - (2,5 \times 10^{-2})) \text{ Formule (3.11)}$$

$$A_c = 0,2 \text{ m}^2/\text{ml}$$

Finalement Avec $N = 10 \text{ t/ml}$, $A_c = 0,2 \text{ m}^2/\text{ml}$

$$\sigma = 10 \cdot 10^{-2} / 0,2 = 0,5 \text{ MPa}$$

Vérification en compression

Il faut vérifier que la contrainte de compression appliquée reste toujours

inférieure à:

$$\sigma \leq m_{ld} \cdot \Phi R_{adm} \cdot \omega \quad \text{formule (3.10)}$$

avec :

$$\omega = 1 + e_0 = 1,067 \quad \omega = 1,067 \quad \text{formule (3.16)}$$

$$R_{adm} = 3,88 \text{ MPa}$$

Calcul de Φ

$$\lambda_h = l_0/d \quad \text{avec : } l_0 = p.H.$$

Selon le graphique (fig. 19) $p = 1$ (deux bords libres)

$$\text{d'où } l_0 = H = 3,00 \text{ m}$$

$$\lambda_h = l_0/d = 3/0,25 = 12$$

$$\lambda_h^f = \lambda_h \times \frac{\sqrt{1000}}{\alpha}$$

Avec $\alpha = 750$ on aura : formule (3.17)

$$\lambda_h^f = 12 \sqrt{1000} = 13,85 \approx 14$$

D'où : $\Phi = 0,79$ tableau (7)

$$\Phi_1 = \Phi [1 - e_0/d (0,06 \lambda_h - 0,2)] \quad \text{formule (3.15)}$$

$$\Phi_1 \approx 0,75$$

$$m_{ld} = (1 - n/0,04) (1 + 1,2 e_0/d) \quad \text{formule (3.19) Tableau (8)}$$

$m_{ld} = 0,955$ soit $m_{ld} \approx 0,96$ qui correspond bien à la valeur du tableau 9.

$$\sigma_{adm} = 0,96 \cdot 0,75 \cdot 3,88 \cdot 1,067 = 2,98 \text{ MPa}$$

On vérifie bien que : $\sigma < \sigma_{adm}$ c'est à dire **0,50 MPa < 2,98 MPa**

Calcul en flexion

Le projeteur ayant à calculer le mur soumis à la flexion latérale due au vent par exemple, peut envisager différents schémas de calcul :

- poutre sur deux appuis
- plaque appuyée sur un ou plusieurs côtés.

Il lui appartient également d'estimer le mode d'appui (appui simple, souple élastique, encastrement ...)

Supposons qu'il s'agit du calcul un mur appuyé sur ses deux bords horizontaux (au niveau des planchers) et que la charge qui le sollicite est de 0,25 t/ml ; la charge par ml est donc de 0,25.a t/ml (a, étant la largeur du mur)

Le moment fléchissant max est de :

$$M = \frac{0,25 \cdot a \cdot H^2}{8}$$

L'inertie $I = (a \cdot d^3 / 12)$, $\sigma_{\max} = (M / I) \cdot v = (M / I) \cdot (d / 2) = (6 M / a \cdot d^2)$

$\sigma_{\max} = (6 \cdot 0,25 \cdot a \cdot H^2 / (8 a \cdot d^2)) = 0,19 H^2 / d^2$

Pour $H = 3 \text{ m}$, $d = 25 \text{ cm}$ on a : $\sigma_{\max} = 27 \text{ t/m}^2 = 0,27 \text{ MPa}$

Cette contrainte est inférieure à la contrainte admissible en flexion du mur égale à **0,313 MPa**.

Calcul au cisaillement

Les efforts horizontaux (dus au vent par exemple) sont transmis aux murs Transversaux par l'intermédiaire des planchers.

Soit à calculer un mur au cisaillement en admettant que l'effort tranchant qui le sollicite à un niveau donné est Q .

La contrainte de cisaillement appliquée au mur est donnée par la formule :

$$\tau = \frac{Q \cdot S_m}{I_m \cdot d} \quad S = 0,5 \text{ m}^2 \text{ section du mur}$$

Avec : $\tau_{\max} = 1,5 Q/S$

S_m = moment statique de la section transversale du mur

d = épaisseur du mur

Soit S_f la surface exposée au vent perpendiculaire au mur étudié dans les paragraphes précédents et revenant à celui-ci.

$S_f = \ell \cdot H$ avec

H est la hauteur totale de la façade exposée au vent.

ℓ étant la largeur de la face exposée au vent revenant au mur étudié

On prend : $\ell = 8 \text{ m}$ et,

$H_t = 9 \text{ m}$ (qui correspond à peu près à la hauteur d'un bâtiment R+2).

L'effort tranchant dû au vent à la base est donc :

$Q = P \cdot \ell \cdot H$ où P = pression due au vent = 75 kg/m^2

D'où $Q = 75 \cdot 8 \cdot 9 = 5400 \text{ kg} = 0,054 \text{ MN}$

L'effort de cisaillement maximum produit par le vent est :

$$\tau_{\max} = 1,5 \times 0,054 / 0,5$$

$$\tau_{\max} = 0,16 \text{ MPa}$$

Si on majore cette contrainte de 50 % on aura

$\tau_{\max} = 0,24 \text{ MPa}$ Inférieure à $\tau_{\max} = 0,313 \text{ MPa}$

III.5 La mise en oeuvre des betons de terre stabilisee selon les recommandations du CNIRIB

III.5.1 Conditions générales de conception

- a. La conception de bâtiments en BTS doit prévoir tous les aménagements permettant d'éviter de forts degrés de saturation des murs à partir des différentes sources d'eaux naturelles ou accidentelle envisageables : inondations, ascensions capillaires, écoulement d'eaux pluviales, fuites accidentelles intérieures...
- b. Les constructions en maçonnerie de BTS sont soumises en général aux règles de l'art mise en oeuvre des maçonneries et aux prescriptions en usage (**DTU**). Les présentes recommandations rappellent certaines règles principales et précisent les règles spécifiques à la construction en BTS.
- c. Elles s'adressent aux entrepreneurs de maçonnerie et aux auto constructeurs.
- d. Les murs porteurs seront disposés autant que possible symétriquement par rapport aux axes principaux du bâtiment.
- e. La plus grande dimension en plan de la construction devra être inférieure ou égale à 15m. Au-delà de 15m, prévoir un joint de dilatation.

III.5.2 Mortier de hourdage

- a. Le rôle du mortier de pose, de montage ou de hourdage est de liaisonner les blocs entre-eux en assurant la résistance et l'étanchéité du mur.
- b. Un bon mortier doit être adhérent, résistant et étanche. Sa résistance doit être en harmonie (équivalente) avec celle du bloc.
- c. Les liants à utiliser doivent avoir des performances mécaniques moyennes voire modestes. Il faut écarter les ciments à durcissement rapide et utiliser des CPA de classe peu élevée, des chaux hydrauliques et des chaux grasses sous la forme de mélanges pour mortiers bâtards.

III.5.3 Montage des murs courants

III.5.3.1 Préparation des blocs

Les faces de pose doivent être préalablement humidifiées pour éviter le « brûlage » du mortier par succion excessive. Avant la pose un trempage de l'ordre de 5 secondes dans l'eau est suffisant.

III.5.3.2 Appareillage

- Tous les appareillages classiques sont possibles pour la pose des blocs de terre stabilisée.

- Pour les appareillages simples, éviter la superposition des joints verticaux (coup de sabre) ; le décalage entre joint verticaux doit être d'environ un demi bloc. Toutefois on peu tolérer que le décalage varie de $1/3$ à $2/3$ de bloc Figure III-25

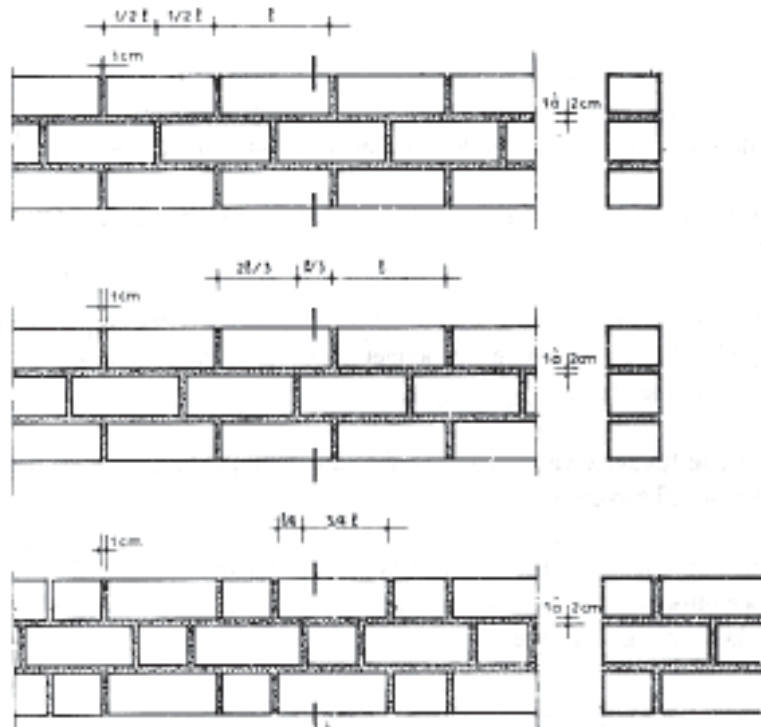


Figure III-24 Appareillage

- Ce décalage peut varier de $1/4$ à $3/4$ avec un minimum de 5 cm pour tout autre appareillage.
- Les joints en mortier doivent permettre la transmission régulière des charges verticales d'un lit à l'autre, tout en assurant la continuité des liaisons des blocs entre eux tant dans le sens vertical que dans le sens horizontal.
- Les cordons de mortier doivent être réguliers et pleins sur toute la surface de pose.
- L'épaisseur des joints devra être limitée, entre 1 et 2 cm.

III.5.3.3 Jonctions de murs

- Les jonctions des murs porteurs doivent être réalisées par harpage soigné de manière à assurer la continuité des murs.
- Les murs non porteurs peuvent être soit simplement en contact nu à nu avec un minimum de cinq encochements, soit ancrés de trois centimètres. Figure III-26
- Dans le cas où il est prévu des chaînages verticaux on pourra réaliser un harpage de blocs

de 2 modules

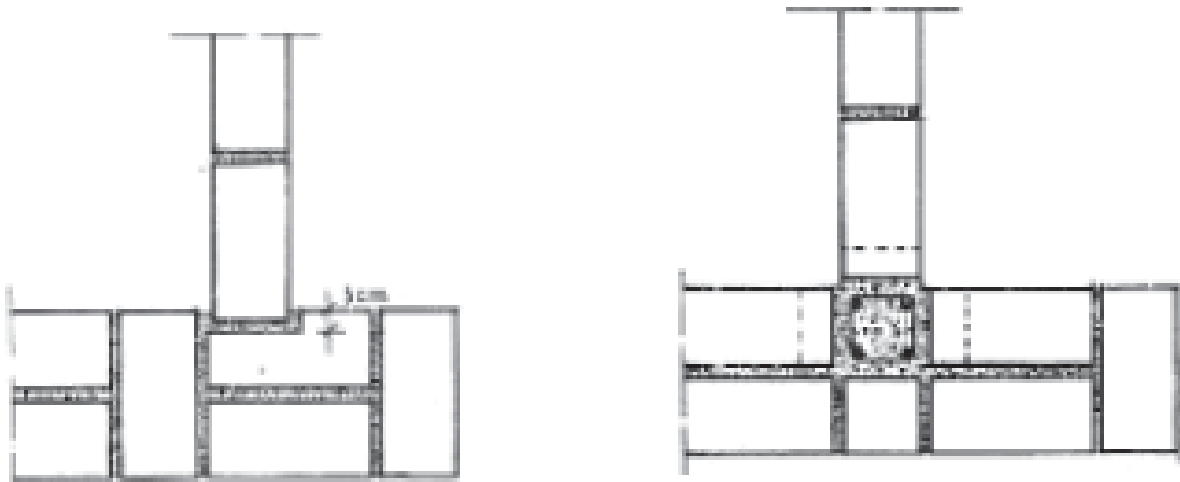


Figure III-25 Jonctions De Murs

III.5.4 Soubassements et bases des murs

- a. Les soubassements des murs, seront constitués de maçonnerie inaltérable à l'eau sur une hauteur minimale de 30 cm.
- b. La base des murs et des cloisons sera constituée de matériaux inaltérables à l'eau sur au moins 10 cm au-dessus du niveau du plancher (RDC ou étage) ; on pourra avantageusement profiter du chaînage pour assurer cette protection.

III.5.5 Protection, badigeons et enduits

- a. L'enduit ou le badigeon peuvent ne pas être nécessaires lorsque les blocs des murs extérieurs présentent une résistance minimale après immersion au moins égale au double de la contrainte admissible C (définie à l'article 7.4), et si l'aspect de la maçonnerie finie le permet.
- b. Dans les autres cas, un enduit bâtard ou un badigeon à la chaux aérienne (25 kg dans 40 litres d'eau) appliqué en deux couches à 48 heures d'intervalle, est suffisant lorsque l'aspect de la maçonnerie est satisfaisant. Ce badigeon peut être coloré éventuellement, et peut recevoir un traitement hydrophobe, assurant une imperméabilité à l'eau mais une perméabilité à la vapeur d'eau.
- c. Il est recommandé d'appliquer des enduits à la chaux et des enduits bâtards. On préférera les crépis grossiers aux enduits lissés. Des sillons descendants facilitant l'écoulement des eaux de pluies peuvent être prévus.
- d. Sur les faces intérieures des murs et cloisons, on pourra soit laisser la maçonnerie apparente si son aspect le permet, soit revêtir de badigeon ou d'enduit au plâtre ou de chaux-ciment.

e. A titre indicatif des compositions sont données dans le tableau suivant :

Tableau III-14 des compositions d'enduit à titre indicatif

	Chaux	Proportion sable	en (volume) autres	Epaisseur
Corps d'enduit finition	2	5 à 6 (0/4 à 0/5 mm)	1 ciment	15 mm
	1	2 à 3 (0/2 à 0/5 mm)	-	5 à 8 mm
Enduit plâtre et chaux	1	2 (0/2 mm)	3 (plâtre gros)	20 à 30 mm en 2 passes
Rejointements	2	2 à 3 (0/2 à 0/3 mm)	1 ciment	-
Torchis	1	1 (0/2 mm)	5 à 6 (argile)	-

III.5.6 Fondations

- Dans tous les cas, il convient de s'assurer de la qualité des sols de fondations par une étude préliminaire géotechnique (même partielle), compte tenu de l'incidence du sol sur la conception des fondations et des chaînages éventuels.
- Tous les murs porteurs auront des fondations filantes ; l'axe des murs de devra pas coïncider avec celui des fondations.
- Les semelles filantes constitueront un système plan et fermé. Elles reposeront sur un béton de propreté maigre de 5 cm d'épaisseur.
Les fondations seront réalisées en matériaux inaltérables à l'eau, (béton armé ordinaire, béton cyclopéen, maçonnerie de pierre, moellons...)
- En aucun cas les blocs de BTS ne seront admis pour la réalisation des fondations
- Les fondations filantes doivent avoir une profondeur minimale de 60 cm. (Figure III. 24)
- La largeur de la semelle sera établie à $b=e + (2 \times 5)$ cm avec un minimum de 40 cm (« e » étant l'épaisseur du mur).
- 5.8 - Les fondations comporteront un chaînage en béton armé (à la base des murs), dont la hauteur sera égale ou supérieure à 30 cm.

Ces chaînages auront un ferrailage minimum de 4T12, maintenus par des cadres dont l'espacement ne dépassera pas la hauteur des chaînages.

Commentaire:

Les murs en BTS sont plus sensibles aux effets de l'affaissement des fondations que les murs en matériaux de types courants. Les chaînages préconisés, prévus à cet effet sont un minimum requis, ils seront vérifiés au cas par cas.

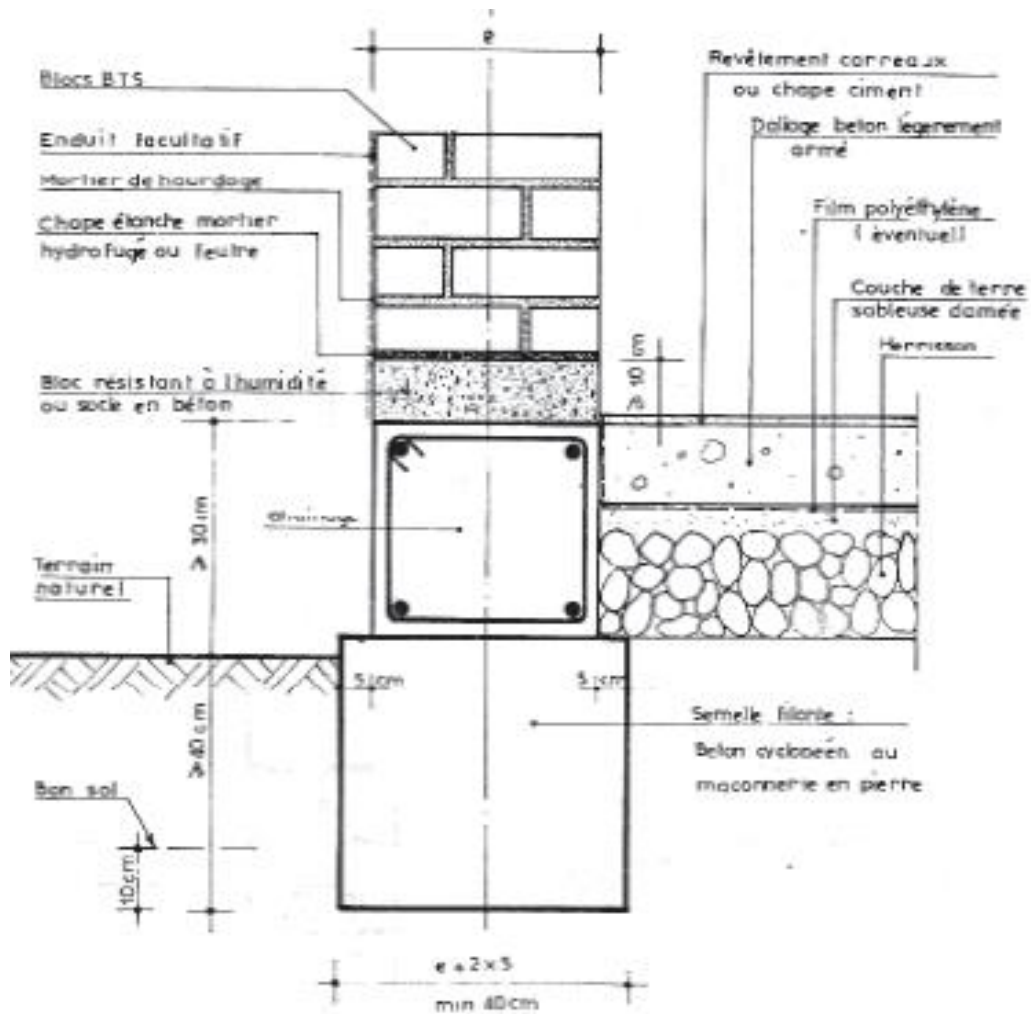


Figure III-26 Fondations

Par ailleurs l'étude des sols et la conception des fondations doivent faire l'objet de soins très attentifs.

Il est rappelé comme il est déjà indiqué à l'article, que pour éviter les remontées capillaires de l'humidité du sol, ainsi que les rejaillissements des eaux de pluie, les murs doivent obligatoirement reposer sur un soubassement de hauteur minimum de 30 cm au dessus du sol définitif (Figure III. 24)

8. Une couche étanche exécutée au-dessous de la première rangée de BTS et éventuellement au-dessous du plancher bas du rez-de-chaussée, sera prévue sur toute l'épaisseur du mur

Commentaire :

Cette couche étanche peut être constituée par une chape de mortier de ciment ou de chaux de 2 cm d'épaisseur richement dosée avec éventuellement l'incorporation d'un hydrofuge de masse. A titre d'exemple, pour le ciment, le dosage sera de 500 à 600 kg par m³ de sable 0/3.

Il est entendu que cette couche étanche devra être renforcée par les dispositions adéquates en cas de sol agressif.

III.5.7 Planchers

- Les planchers de rez-de-chaussée seront réalisés soit en chape de béton classique sur hérissos, soit pour les logements économiques en chape de BTS damée sur hérissos avec dallages en carreaux de terre stabilisée ou briques pleines BTS selon la technique décrite en annexe.

- Les planchers supérieurs seront réalisés selon les techniques classiques courantes :

- + Dalles en béton armé coulé en place ;
- + Poutrelles en corps creux avec dalle de compression ;
- + Poutrelles métalliques avec voûtains en plâtre ou Dalletes ;
- + Ou toute autre technique connue et approuvée (bacs acier collaborant, voûtes.)
- + L'appui des planchers sera au moins égal aux 2/3 de l'épaisseur des murs, enduit non compris

III.5.8 Les murs

a. Les murs porteurs ont pour but de transmettre aux fondations les poids propres ou charges permanentes de maçonneries (mur et éventuellement plancher) et de la toiture, de même que les surcharges de service.

Ils protègent également contre les agents climatiques ou autre (isolation thermique et acoustique).

b. L'élancement du mur $e=H/a$, (« H » étant la hauteur du mur et « a » son épaisseur) devra être inférieur ou égal à 15.

c. L'épaisseur des murs sera déterminée en fonction de la résistance des blocs qui constituent, des charges et surcharges qu'ils supportent, et du confort thermique recherché.

Elle sera supérieure ou égale à 30 cm pour les murs porteurs extérieurs, à 20 cm pour les murs porteurs intérieurs et à 15 cm pour les murs intérieurs non porteurs.

d. La contrainte de compression admissible C, à la base du mur devra être supérieure ou égale à 4 bars sous des charges centrées et à 3 bars sous charges excentrées.

$C = R/N$ avec **R** = Résistance nominale à l'écrasement du bloc (résultat essai)

N = Coefficient global de réduction égal à 8 pour les charges centrées et 10 pour les charges excentrées.

- Dans le cas où les élancements sont compris entre 15 et 20, les valeurs du coefficient global de réduction N sont à multiplier par un coefficient de majoration.

Elancement	16	17	18	19	20
Coefficient de majoration	1,07	1,13	1,20	1,27	1,33

Commentaire

- Ce contrôle de contrainte ne s'applique pas à la résistance minimale du bloc obtenue après immersion totale pendant 24 heures. Vis à Vis de cette résistance minimale, on vérifiera seulement que cette résistance reste supérieure à deux fois la contrainte maximale dans le mur.

- Pour les maçonneries en B.T.S l'épaisseur de 30 cm est suffisante pour un bon confort thermique.

- Bien que les murs en double peau ne soient pas interdits, il est recommandé des murs porteurs simples pour faciliter la mise en œuvre.

- Il est recommandé d'adopter une hauteur libre des murs, inférieure ou égale à 2,75 m (plancher à plafond).

La distance maximum entre les murs porteurs dans les deux directions ne dépassera pas 5m. Cette distance est conditionnée par la portée des planchers.

La surface totale des ouvertures dans les murs porteurs de façade (extérieurs) est conditionnée par les prescriptions et normes de confort pour les constructions en zones sahariennes.

Dans tous les cas, la surface totale des ouvertures dans les murs porteurs ne devra excéder le quart de la surface totale du mur (condition de portance).

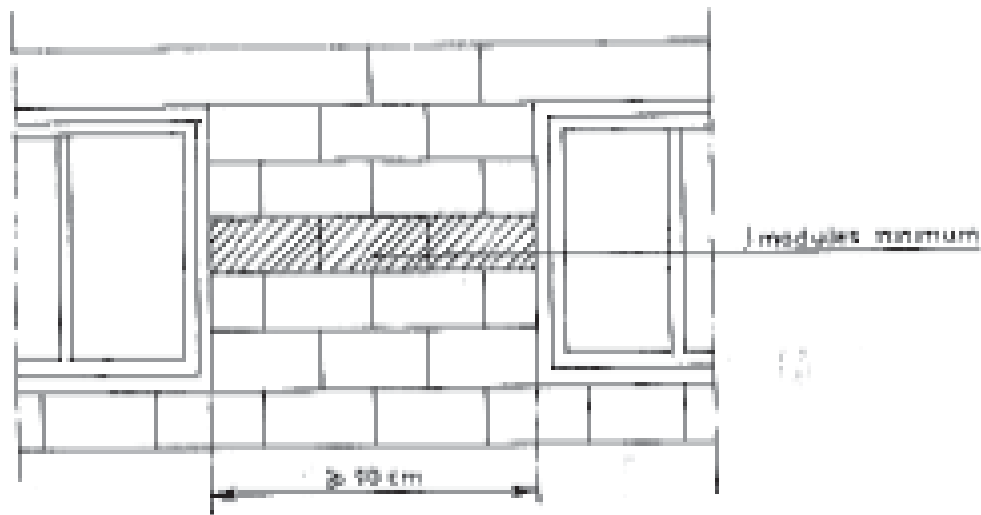
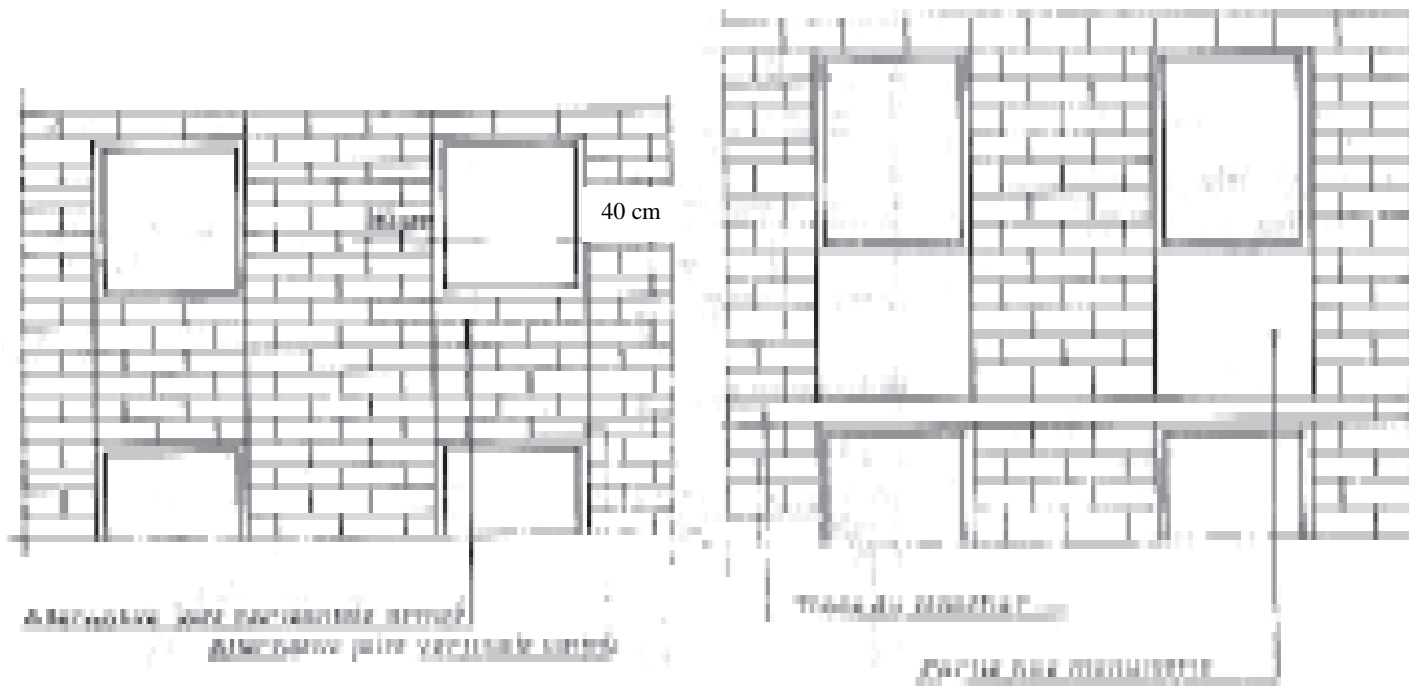


Figure III-27 trumeaux

Les trumeaux qui transmettent les charges du mur entre les ouvertures doivent avoir une largeur minimale de 90 cm et comporter au moins 3 modules complets, un lit sur deux (Figure III. 29)

L'allège est la partie ne recevant pas de charges. Du fait du chargement différent entre l'allège et le trumeau porteur, des efforts de cisaillement sont développés.



Trois solutions sont envisageables : (Figure III. 29)

- Soit placer des armatures (barres, treillis soudés ou métal déployé) de section équivalente à 2T10 dans le joint, sous la dernière rangée de cette maçonnerie (armature sera ancrée dans les trumeaux sur une longueur de 30cm) ;
- Soit dissocier l'allège par les joints ;
- Soit intégrer l'allège à la menuiserie pour constituer un panneau menuisé.

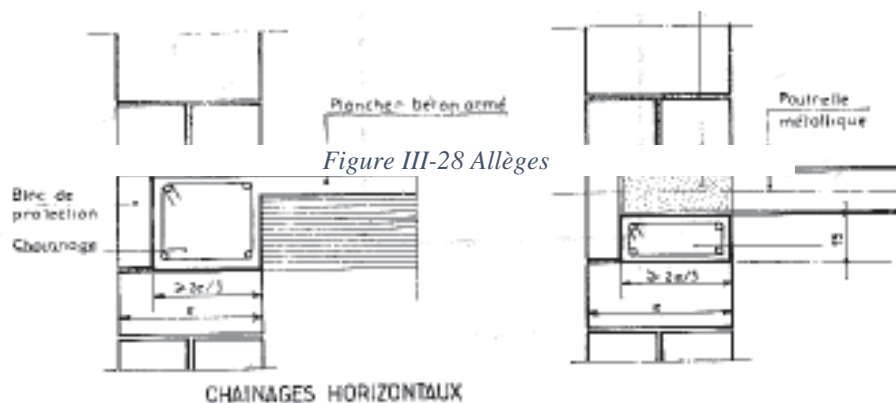


Figure III-29 chainages horizontaux

III.5.9 Les chaînages et linteaux

III.5.9.1 Chaînages horizontaux :

- 1) Le rôle des chaînages horizontaux en béton armé est de répartir uniformément sur les murs porteurs, les charges et surcharges dues aux planchers ou toitures, et de solidariser les éléments verticaux et horizontaux de la construction.
 - 2) Ils doivent être prévus dans les murs porteurs, au niveau du plancher et être continus, filants et fermés.
 - 3) Leur section est conditionnée par l'importance du bâtiment et sera adaptée au type du plancher. D'une manière générale les chaînages massifs sont à éviter.
 - 4) La section transversale du béton des chaînages doit être limitée en façade pour éviter les désordres dans la maçonnerie due aux dilatations thermiques. Les chaînages peuvent être protégés vers l'extérieur par des éléments de maçonnerie (Figure III. 30)
 - 5) La hauteur d'un chaînage de façade est celle du plancher qui lui est associé.
Pour les planchers à poutrelles métalliques, il est admis de réaliser un chaînage plat de 15 cm d'épaisseur (Figure III. 30)
 - 6) Il convient de prévoir des tire-fond scellés dans la dernière assise de parpaings de façon à solidariser le mur au chaînage.
 - 7) Le ferrailage des chaînages ne doit pas être inférieur à :
 - 7 cm² pour les aciers FeE22
 - 3,85 cm² pour les aciers FeE4
 - 3,08 cm² pour les aciers FeE45 et FeF50
- A section équivalente, plusieurs barres de faible diamètre sont préférables à des barres de gros diamètre.

III.5.9.2 Chaînages verticaux

- 1 - Dans la plupart des cas les chaînages verticaux traditionnels ne sont pas nécessaires ;
Il sera prévu néanmoins un renforcement par des aciers horizontaux dans le mortier de hourdage, approximativement tous les 60 cm, aux niveaux de toutes les intersections de murs formant angles saillants, angles rentrants et jonction des refends avec les murs de façade (figure10).
- 2 - Ces aciers de renforcement auront une section minimale équivalente à 2T10, de préférence des treillis soudés ou des tôles déployées
- 3 - La longueur de ces renforcements ne doit pas être inférieure à 90cm (voir figure 10).

4 - Les chaînages verticaux en béton armé sont obligatoires en présence de sol de fondation instable par l'étude géotechnique préliminaires (faible portance, gonflant, ou sujet à tassements importants).

5 - Dans ce cas, les chaînages constituent des liaisons indispensables à la jonction des murs ; ils n'interviennent pas comme des poteaux d'ossature.

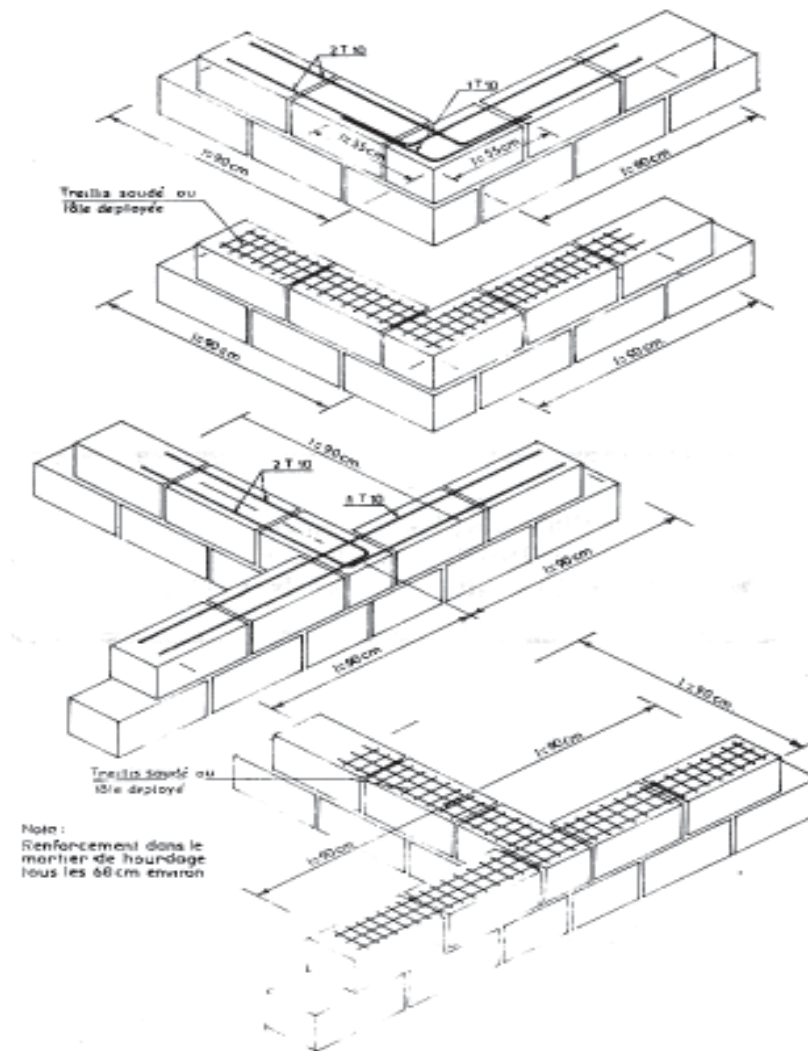


Figure III-30 Chaînage vertical - renforcements

6 - Ils seront éventuellement protégés de l'extérieur par un habillage en maçonnerie.

7 - Ils seront réalisés sur toute la hauteur du mur avec une section minimale de 150 cm², armés d'une section d'acier à haute adhérence au moins équivalente à 4T10 et convenablement ancrés aux planchers ou aux chaînages horizontaux.

8 - Les chaînages verticaux en BA peuvent être remplacés par des contreforts en maçonnerie de BTS. Ces contreforts auront la même épaisseur que les murs porteurs.

III.5.10 Linteaux :

1 - Les franchissements des ouvertures dans les murs porteurs peuvent être réalisés par assemblage traditionnel ou par des linteaux en béton armé.

Les linteaux en béton armé dont la portée ne doit pas dépasser 1,20 m, peuvent être coulés en place ou préfabriqués.

2 - Ils peuvent recevoir une protection thermique par habillage en maçonnerie de BTS

3 - La longueur de pénétration du linteau dans la maçonnerie ne sera pas inférieure à 20 cm

4 - La hauteur du linteau sera de 8 cm minimum et sa largeur supérieure ou égale à 2/3 ou de l'épaisseur du mur sans toutefois être inférieure à 18 cm.

.5 - Le ferrailage minimal du linteau sera au moins équivalent à 3T10.

6 - Au niveau des appuis des linteaux, la contrainte localisée doit rester inférieure ou égale au 1/6 de la résistance à l'écrasement du bloc de terre stabilisée.

III.5.11 Plancher sur hérisson en BTS

III.5.11.1 Revêtement en carreaux de terre stabilisée

Elément de revêtement, appelés dans certains pays carreaux de terre stabilisée. Pour disposer ces éléments, il faut d'abord niveler et tasser le sol de la même manière que pour des revêtements de béton de terre stabilisée préparés sur place.

Cette opération terminée, on répand sur le sol une certaine quantité de mortier de liaison suffisamment imprégné d'eau pour que l'on puisse facilement l'étendre en une couche de 2 cm d'épaisseur. Ce mortier est composé d'une partie de ciment pour six parties de terre sableuse.

Le pose des carreaux de terre stabilisée est identique à celle des carreaux classiques.

III.5.11.2 Revêtement en blocs de terre stabilisée

Pour être employés comme revêtement, les blocs doivent comporter à leur partie supérieure une couche destinée à les protéger contre l'usure et ayant des caractéristiques techniques identiques à celles des carreaux de terre stabilisée.

La pose de ces blocs sera faite conformément aux indications données pour l'installation des revêtements des carreaux de terre stabilisée.

III.5.11.3 Revêtement de béton de terre stabilisée préparé sur place

Le terrain sur lequel le revêtement sera posé doit être auparavant nivelé à la hauteur voulue, « niveau repère », il est ensuite aplani et tassé.

Cette dernière opération consiste à battre le sol après l'avoir suffisamment humidifié et y avoir répandu une couche de pierres fines ou de gravier.

III.5.12 Dispositions diverses

1 - Les murs de clôture doivent obligatoirement être revêtus sur leur partie supérieure d'un enduit étanche

2 - Les bandeaux et corniches en B.A de dimensions importantes sont à éviter.

3 - Les locaux humides (cuisines, salles d'eau, toilettes...) seront aérés et recevront une protection appropriée conformément aux règles de l'art.

4 - Les prescriptions concernant l'isolation et l'étanchéité des toitures en zone saharienne seront appliquées pour ce type de construction.

On accordera une attention particulière aux évacuations d'eaux pluviales afin d'éviter tout ruissellement sur les parois des murs et rejaillissements importants à la base.

5 - Les saignées pour encastrement des conduits d'électricité et canalisation d'eau sont proscrites sur les murs porteurs extérieurs.

Sur les murs intérieurs seules les saignées verticales sont tolérées, elles seront rebouchées d'un enduit similaire au mortier de hourdage.

III.6 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Il n'existe pas de solution unique pour la construction en BTC. Chaque projet architectural adaptera sa conception et ses détails constructifs en fonction du contexte dans lequel il s'inscrit et selon les attentes esthétiques, techniques et structurelles (CSTB, 2018)

Notre projet prototype est une construction habitable en maçonnerie en bloc de terre comprimés stabilisés BTCS en mortier de terre avec :

- Semelles filante béton cyclopien
- Murs porteurs
- Toiture sous forme de voute en BTCS

III.6.1 FONDATIONS ET SOUBASSEMENT

Le projet est implanté sur un du terrain face du laboratoire **LDGM** université **M'sila**, le tracée a été réalisé pour passer au décapage : l'enlèvement de la couche de terre végétale ensuite on va procéder au terrassement L'emploi du béton cyclopéen pour les fondations el le soubassement est une



Figure III-31 Choix du terrain et Piquetage en face du LDGM université M'sila

solution intéressante au plan technique et économique Les principes traditionnels d'implantation d'un bâtiment à partir de chaises en bois et de cordeaux sont très utiles pour garantir un bon tracé des fouilles de fondations

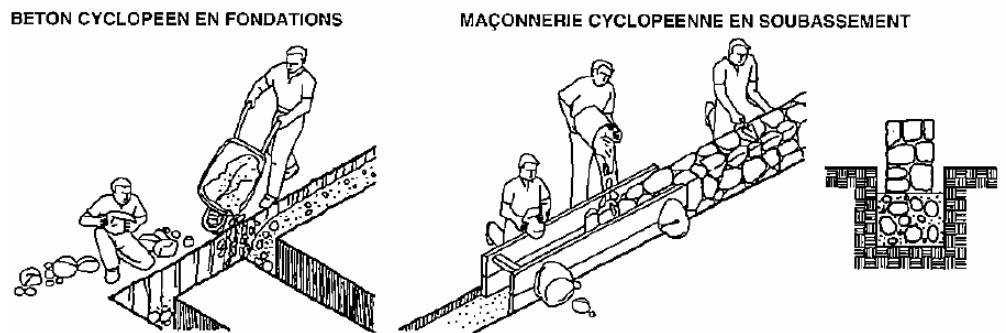


Figure III-32 L'emploi du béton cyclopéen pour la fondation et le soubassement est une solution intéressante au plan technique et économique (Guillaud, offroy, Odul, & CRATerre-EAG, 1995)

III.6.1.1 Réalisation d'un béton cyclopéen en fondations

- 1) Creusement des fondations en fouilles le plus régulièrement possible
- 2) Éviter que les fouilles creusées soient trop longtemps exposées aux intempéries.
(Réaliser en fond de fouilles, béton de propreté $e = 4$ à 5 cm et dosé à 150 kg/m^3)
- 3) Enchâsser des moellons de pierre dans des couches successives de mortier de béton (enrobage d'au moins 3 cm d'épaisseur).
- 4) Le béton est dosé à 250 kg/m^3 (250 kg de ciment, 400 l de sable et 500 l de graviers).

Largeur totale du massif de fondations sera d'au moins 40 cm ou d'un minimum de 20 cm de plus que l'épaisseur des murs.

La hauteur du massif de fondations sera au moins égale à la moitié de sa largeur

Ex : mur de 30 cm \Rightarrow $L = 50 \text{ cm}$; $H \geq 25 \text{ cm}$

(Guillaud, offroy, Odul, & CRATerre-EAG, 1995)

Idéalement, la fondation et le soubassement sont réalisés d'un seul tenant. Cela crée l'unité de cette maçonnerie. Le soubassement est coulé dans un coffrage posé en continuité de la tranchée de 20 ou 30 cm d'épaisseur.

Prévoir les réservations pour les entrées et sorties des drains d'air du hérisson de pierre sous la dalle de rez de chaussée.

Des réservations doivent être mise en place pour les évacuations des eaux usées, les arrivées d'eau et

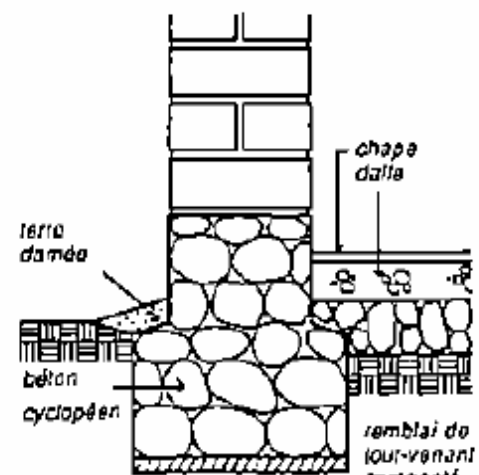


Figure III-33 un béton cyclopéen en fondations

d'électricité.

III.6.1.2 Pathologie de l'humidité

PROTECTIONS BASSE ET HAUTE DE MURS

FONDATION : elles seront construites en matériaux non sensibles à l'eau : béton banché, béton armé, maçonnerie, béton cyclopéen.

SOUBASSEMENT : il doit former un dispositif de rupture capillaire. Le soubassement aura une hauteur suffisante au-dessus de sol extérieur fini pour protéger du ruissellement de surface des eaux de pluie, du rejaillissement et des projections (circulation automobile par exemple).

COUVERTURE protégeant le haut des murs des écoulements et des infiltrations des eaux de pluie.

III.6.1.2.1.1 Drainage

À proximité des bâtiments en BTC, il convient de prévoir d'évacuer au mieux les eaux de surface et souterraines :

Drainer les abords des fondations lorsque la topographie et les conditions hydrogéologiques le nécessitent : une ceinture de drainage assurant une bonne évacuation des eaux est essentielle ;
Empêcher les apports et la stagnation d'eau en pied de mur (descentes d'eau pluviale, VRD, etc.). Le terrain aux abords directs sera nivelé avec des pentes écartant l'eau de l'ouvrage ;
Ne pas gêner l'évaporation dans le terrain à la périphérie de l'immeuble ;

III.6.1.2.1.2 Pièces humides

Il est nécessaire d'aborder de manière appropriée la conception des pièces où la présence d'humidité est importante (bain, douche)

Pour mémoire, la première des dispositions pour éviter la présence prolongée d'humidité est une bonne ventilation des pièces humides ainsi que celles des vides de constructions (dessous de baignoire, doublage des murs...)

III.6.2 Appareillage

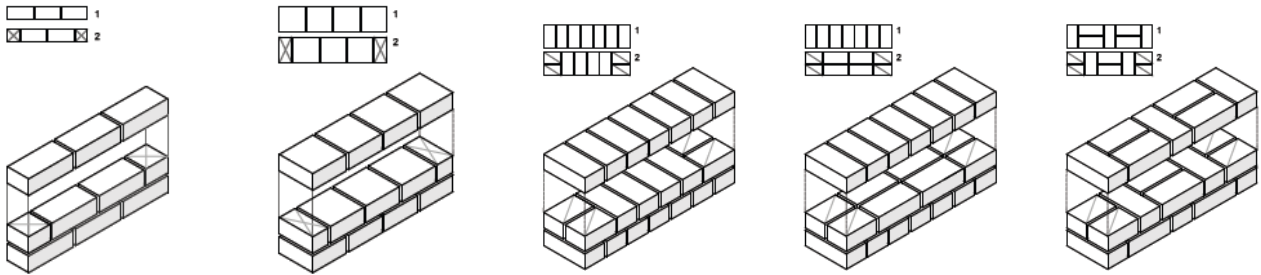
Le terme "appareillage" désigne le mode d'arrangement, d'assemblage et donc de liaison des blocs de terre comprimée entre eux, dans toutes les directions d'une structure en maçonnerie (plan horizontal et vertical, épaisseur du mur) (CSTB, 2018)

Exemples d'appareillage

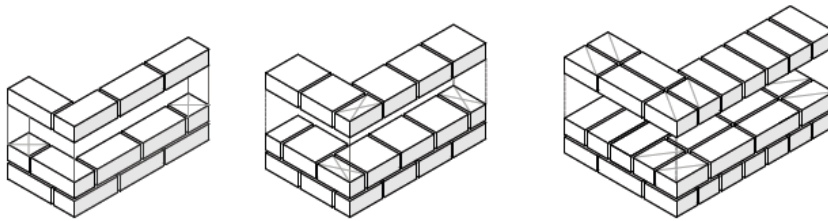
Il existe une multitude de types d'appareillages, les exemples ci-dessous sont donnés à titre indicatif mais de très nombreuses autres configurations sont possibles.

A. MUR DROIT SIMPLE ET DOUBLE ÉPAISSEUR

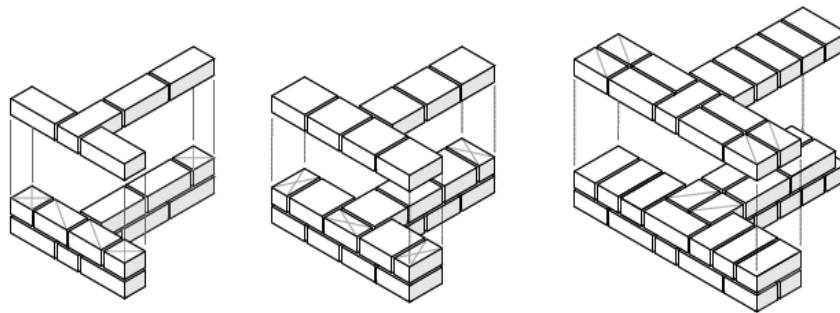
(les schémas présentés ci-dessous ne figure pas les chaînages verticaux qui sont nécessaires aux niveaux des bords libres des murs)



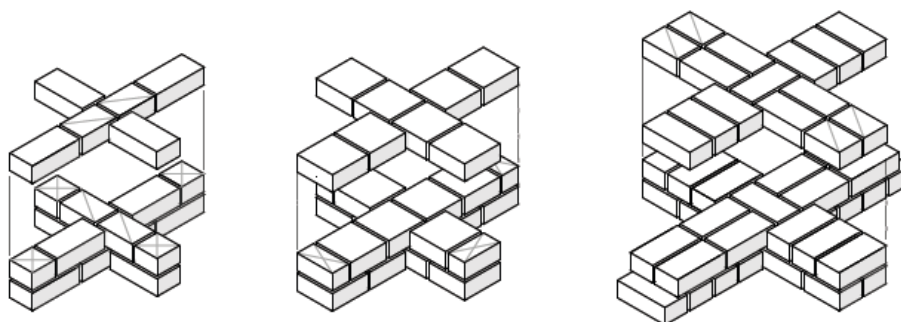
B. Angles de mur simple et double épaisseur de btc



C. MUR EN T



D. CROISEMENT DE MURS



III.6.3 Formes des BTC






Ttypes de blocs	Dimensions	Schemas des blocs	Destination	Mode de fabrication
Blocs pleins	14 × 29 × 9 14 × 29 × 14 25 × 12 × 7 23 × 11 × 6		murs porteurs murs porteurs murs séparateurs murs porteurs séparateurs	hydraulique mécanique manuelle
Blocs creux	15 × 20 × 40 20 × 20 × 40		murs porteurs	hydraulique
Blocs evides	15 × 20 × 40 20 × 20 × 40		murs porteurs séparateurs	hydraulique
Blocs en U	40 × 16 × 20		bloc pour chaînage	hydraulique
Dalletes	20 × 20 × H 25 × 25 × H 30 × 30 × H H variable		revêtements de sol	hydraulique

Tableau : dimensions – fabrication destination des blocs BTS (CNERIB, 1984)

Les blocs de terre comprimée sont des petits éléments de maçonnerie de forme parallélépipédique dont les dimensions diffèrent selon les types de presses et les moules utilisés. Les produits obtenus peuvent être extrêmement variés cependant la tradition de production des blocs de terre comprimée a adopté des dimensions permettant de réaliser des murs de 15, 30 ou 45 cm d'épaisseur.

Les BTC sont de forme générale parallélépipédique. Les produits les plus couramment produits sont :

les blocs dits “ courants”, qui sont utilisés pour constituer les parties pleines des murs ou des cloisons. Les blocs courants peuvent être entiers ou partiels ($\frac{3}{4}$ ou $\frac{1}{2}$). Ce sont des blocs pleins.

Les blocs “accessoires”, qui sont de formes ou de structures internes différentes de celles des blocs courants auxquels ils sont associés. Généralement ils présentent un évidement plus ou moins important pour la réalisation de points particuliers de la maçonnerie tels que : chaînage

vertical, linteau, etc. Exemples : blocs d'angle, blocs de chaînage, blocs feuillure, blocs linteau, blocs poteau, etc.

Les blocs dits "de parement", qui sont des blocs dans lesquels la ou les faces vues sont réalisées de manière à constituer le parement fini du mur. Il s'agit également de blocs pleins. (CSTB, 2018)

III.6.4 CALEPINAGE DES PLANS

Le "calepinage" désigne la planification de la disposition des blocs sur un plan ou une élévation. Cette étape est obligatoire dans la conception d'un édifice en maçonnerie de BTC. (CSTB, 2018)

Afin d'identifier les problèmes de superposition des joints verticaux, il est conseillé de réaliser les plans : Des deux premières assises ;

Des deux assises aux dessus du niveau des ouvertures ;

Des assises particulières.

le calepinage permet de déterminer avec précision :

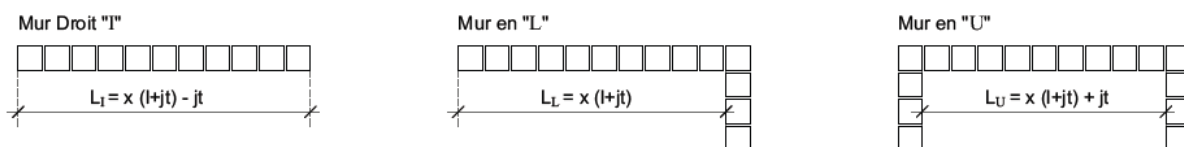
la manière dont les blocs sont disposés (notamment pour prendre en compte les cas particuliers tels que les angles, les jonctions, les baies) ; les types de blocs nécessaires (entier, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$) ; le nombre de blocs de chaque type.

Longuer L des murs suivant leur forme

x : nombre de demi-bloc

l : longueur du demi-bloc

jt : épaisseur du joint



III.6.5 Technique de mise en œuvre du BTC selon : L^AT_EX n°2588 CSTB

III.6.5.1 GÉNÉRALITÉS

Le montage de la maçonnerie doit être exécuté de sorte que la stabilité soit garantie en cours de construction. Il convient d'être particulièrement attentif aux murs très élancés et non encore chaînés, particulièrement face au risque de vent violent. Il faudra si nécessaire étayer momentanément les parois.

III.6.5.2 DISPOSITION DE STOCKAGE DES MATÉRIAUX SUR CHANTIER

Il convient de protéger les agrégats (sables pour mortiers), les liants et les BTC de la pluie et de l'humidité pendant toutes les phases de manutention et de stockage précédant la pose.

Si les blocs livrés sont conditionnés "filmés" - sous film plastique - il est préférable de retirer le film afin d'éviter des phénomènes de condensations qui peuvent s'avérer important et provoquer des tâches ou des efflorescences à la surface des blocs.

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures différentes. Pour éviter la pollution des granulats entre eux ou par de le sol du site ou des déchets, le stockage doit se faire sur une aire aménagée. Le stockage peut être fait sur palette ou sur une surface gravillonnée.

Le stockage sur site doit se faire sous bâches en saison des pluies. L'aire de stockage doit permettre un drainage correct des eaux. Il est préférable d'aménager une aire de stockage présentant une légère inclinaison.

Les sacs de liants destinés à la fabrication des mortiers, ciment et chaux, seront stockés à l'abri de la pluie, mais également protégés des remontées d'humidité du sol, des projections de boue et de tout choc mécanique susceptible de les déchirer.

Si plusieurs types de liant sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter des erreurs et mélange.

III.6.5.3 GÂCHAGE ET UTILISATION DES MORTIERS

Gâchage des mortiers :

Les mortiers doivent être gâchés juste avant leur utilisation sur une surface propre.

Le gâchage est effectué soit manuellement soit au moyen d'un mélangeur mécanique.

Un mélange à sec des granulats et du liant avant l'ajout de l'eau peut permettre d'éviter des défauts d'homogénéité.

La durée de gâchage commence à partir du moment où tous les matériaux, eau comprise, sont incorporés au mélange.

La durée de gâchage usuelle est comprise entre 3 et 5 min. Elle ne doit pas dépasser 15 min.

Entre différentes gâchées, il faut éviter les écarts importants des durées de gâchage.

Durée d'utilisation des mortiers :

Le mortier fabriqué sur le chantier doit être mis en oeuvre suivant les temps d'utilisation relatif au liant utilisé. En général il convient d'utiliser le mélange moins de 30 minutes après leur fabrication.

III.6.5.4 POSE DU BTC

La surface d'application du mortier doit être préparée et propre.

Pour garantir une bonne adhérence entre mortier et blocs, le plan de pose et les BTC seront humidifiés avant la pose. Les blocs seront plongés dans l'eau et retirés immédiatement, le plan de pose sera légèrement mouillé en aspergeant celui-ci.

Le mortier est appliqué sur les faces à jointoyer en quantités adaptées.

Les BTC sont posées et mises en place sur le lit de mortier par collage en les plaquant en pression ou en les faisant translater jusqu'à avoir trouvé la position requise. Par effet de succion les BTC s'immobilisent.

Les blocs sont positionnés de niveau à l'aide de piges ou d'un niveau à bulle. Des cordeaux sont utilisés pour permettre de réaliser des assises alignées.

Il ne faut pas vibrer excessivement les BTC pour les positionner sous peine de supprimer l'adhérence entre le bloc et le mortier. Frapper les BTC est également à proscrire, sous peine de fissurer ou déstabiliser les maçonneries précédemment mises en oeuvre.

III.6.5.5 CADENCE DE POSE ET LIMITE D'ÉLEVATION QUOTIDIENNE :

L'élévation, par jour, des maçonneries de BTC ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur (en 14 cm d'épais, 1,40 mètre maximum) au risque de désolidariser les premiers rangs par de trop fortes sollicitations latérales exercées sur l'ouvrage.

III.6.5.6 CONDITIONS CLIMATIQUES DE MISE EN OEUVRE

Il faut être très vigilant lors de la mise en œuvre aux conditions climatiques, particulièrement si celles-ci sont chaudes ⁽¹⁾ et venteuses.

Une dessiccation trop rapide de la maçonnerie peut entraîner l'apparition de fissures dues à un retrait important.

En règle générale, et par temps très chaud, dès que la température est durablement supérieure à 30 °C, et encore plus au-dessus de 35 °C ⁽¹⁾, Il sera préférable de préparer des petites quantités de mortier utilisable rapidement ⁽²⁾.

Quelques précautions simples peuvent également être prises : maçonner aux heures les moins chaudes, travailler sur les parties d'ouvrage non exposées au soleil et au vent, protéger les maçonneries de la dessiccation (arrosage léger, produit de cure ou bâche (paillasons humides, films plastiques, etc.)). Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques.

NOTE (1) De manière générale, les liants (chaux et ciment) ne doivent pas être utilisés à des températures supérieures à 35°C.

NOTE (2) Les mortiers avec liant sont sensibles aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur : la rhéologie du mortier et son évolution ; la vitesse de prise ; la cinétique de son durcissement et sa dessiccation. Cela influence sensiblement l'ouvrabilité mais également, à terme, la résistance mécanique du mortier, donc celle du mur.

III.6.5.7 PROTECTION DES OUVRAGES EN COURS DE CHANTIER

Lors des épisodes pluvieux, il convient de protéger la tête de mur, et particulièrement les plans de pose, des ouvrages en cours de réalisation.

Les assises fraîchement maçonnées doivent également recevoir une protection qui doit être maintenue durant tout l'épisode pluvieux si celui-ci est continu.

Protection contre les dommages mécaniques

Durant le chantier et jusqu'au repli de celui-ci, il faut, si possible, protéger les surfaces des murs et spécialement les angles saillants des chocs qui pourraient les endommager. Ces dommages sont le plus souvent dûs à la manutention d'éléments lourds durant le chantier (coffrages, échafaudages, outils divers) ou aux manoeuvres d'engins et véhicules évoluant sur le site.

III.6.5.8 REPRISE DE L'ÉLEVATION DE LA MAÇONNERIE

Lors de la reprise des travaux de maçonnerie, il convient de s'assurer que le plan de pose soit propre et dépoussiéré.

Jointoiment et rejointoiment

La liaison des blocs doit être correctement faite dans les deux directions de l'appareil des blocs, par la réalisation des joints horizontaux et verticaux.

Les joints verticaux doivent être bien bourrés.

L'excédent de mortier doit être raclé immédiatement après la pose du bloc et, si possible, les joints doivent être réalisés à frais pour une meilleure tenue (et limiter les tâches de laitance).

Le joint en cours d'exécution doit être serré avant qu'il ne perde sa plasticité.

La finition des joints peut être faite en demi-rond, en triangle ou au nu des blocs. Ils seront serrés avec un fer à lisser ou à la langue de chat.

Sauf indication contraire, le profil du joint en retrait aura une profondeur maximale de 5 mm.

Les joints en retrait de plus de 5 mm ne sont pas recommandés car ils peuvent entraîner une stagnation d'eau sur le dessus du bloc.

Les joints peuvent également être légèrement creusés si le mur est destiné à être rejointoyé ultérieurement.

Lorsqu'un rejointoiment doit être effectué, la profondeur du grattage du mortier non durci est d'au moins 15 mm, sans dépasser 15 % de l'épaisseur du mur mesurée à partir de la surface finie (Pour les blocs avec évidement, on ne dépassera par une profondeur maximum de 20 mm).

L'opération de rejointoiment est précédée d'un nettoyage de la zone entière et, si nécessaire, d'un mouillage pour obtenir la meilleure adhérence possible entre mur et mortier.

Les joints horizontaux et verticaux doivent présenter une épaisseur finie comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum.

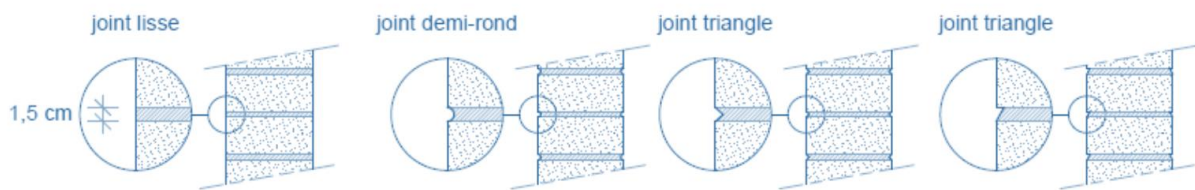


Figure III-34 FORME DE JOINTS

COUPE, TAILLE, PERÇAGE

Couramment, sur chantier, il est recommandé d'utiliser un ciseau de maçon et une massette pour couper les blocs aux dimensions requises. Il est également possible de réaliser les coupes à l'aide d'une meuleuse équipée d'un disque pour maçonnerie (type disque diamanté).

Les BTC contiennent des graviers et cailloux qui peuvent faire dévier du plan de coupe ou provoquer des éclats importants des blocs. Le taux de perte des blocs sur chantier et de l'ordre de 5%.

On privilégiera si possible l'utilisation de blocs $\frac{3}{4}$ et $\frac{1}{2}$ produits directement à ce format si un appareillage très soigné des maçonneries apparentes est souhaité.

Les tailles spéciales des blocs peuvent également s'effectuer à l'aide des mêmes outils (ciseaux de maçon ou meuleuse) mais également par perçage ou abrasion.

Les blocs se percent à l'aide de forets à béton (à pointe carbure ou diamanté) de préférence par abrasion et enlèvement de matière. Le perçage s'effectue par rotation sans percussion ou par rotation et percussion rapide à faible intensité avec une perceuse à percussion. On évitera l'usage de marteau perforateur délivrant une percussion lente à forte intensité.

Pour les perçages précis, il est recommandé d'utiliser des forets pour métaux.

Une scie cloche avec lèvres diamantées peut être utilisée pour réaliser les réservations des boîtes électriques rondes.

Le nettoyage des surfaces après la coupe ou des trous après le perçage, par aspiration ou soufflage, est indispensable. Une surface qui n'est pas nettoyée réduira la capacité d'adhérence entre matériaux. La poussière de forage ne permet pas une fixation correcte de la cheville dans le trou.

III.6.5.9 Mise en charge de la maçonnerie

La maçonnerie ne doit pas être chargée avant d'avoir atteint une résistance suffisante pour supporter la charge sans dommage.

La résistance du mortier avec liant hydraulique à 7 jours est d'environ 60 % de sa résistance maximale. On considère qu'il atteint sa résistance "conventionnelle" après 28 jours (80 % de la résistance maximum).

III.6.5.10 Finition de la maçonnerie

La disparition de l'humidité en excès dans le mur prend du temps, le séchage sera plus ou moins rapide en fonction de l'épaisseur du mur, de son niveau de ventilation, de la température ambiante et enfin des apports d'eau au moment de la mise en œuvre (humidité des mortiers et des blocs, intempéries) ou de la mise en œuvre des matériaux environnants.

Il conviendra d'être attentif à ce que la paroi ne présente pas un taux d'humidité trop important avant la mise en œuvre des revêtements de finitions (peintures, enduits, etc.). Il est fortement recommandé de respecter un délai minimum de séchage de 2 mois avant que ceux-ci ne soient réalisés.

Une fois la maçonnerie sèche, si nécessaire, elle peut être balayée et/ou aspirée afin d'éliminer des grains et poussières non adhérentes.

Pour uniformiser l'aspect, limiter les effets de laitance et quelques défauts visuels, un léger égrainage de la surface de la maçonnerie, sans trop insister, avec un abrasif - type papier de verre de grain 120 - peut être effectué.

La maçonnerie peut alors être laissée brute, ou, si nécessaire, une finition peut être appliquée

Finition - Revêtement intérieur et extérieur

Si le mur est destiné à être enduit, il doit être soigneusement brossé (brosse métallique). Le mur ne doit pas absorber l'eau contenue dans l'enduit sous peine de compromettre sa prise et son durcissement et de réduire son adhérence. Il faut donc humidifier le mur pour éviter une succion capillaire sans trop le mouiller pour ne pas créer un film d'eau superficiel qui limiterait l'adhérence de l'enduit.

Il ne faut jamais enduire un mur de terre avant que le tassement du mur ne se soit opéré. Il faut donc attendre un achèvement complet du gros œuvre y compris toutes charges de planchers et toitures.

III.6.5.11 SÉCURITÉ DES INTERVENANTS

Les mesures de sécurité à prendre sont identiques à celles concernant la réalisation d'un ouvrage en maçonnerie classique de petits éléments.

Il n'existe pas de conditions spécifiques de sécurité liées à la mise en œuvre de murs en BTC. Suivant l'importance des ouvrages à réaliser, les dispositions de sécurité peuvent être détaillées dans un PPSPS permettant d'assurer la sécurité des intervenants pendant toute la durée du chantier.

III.6.6 Construction des toitures en voûtes

L'héritage d'une tradition

Les toitures en blocs de terre comprimés sont issues de la tradition des toitures en adobe développés dans des régions à climats sec où le bon bois de charpente faisait défaut (Mésopotamie, Egypte, Iran).

En réalisant des voûtes et des coupes en terre, les constructeurs exploitaient "l'intelligence constructive" du matériau, à savoir son aptitude à travailler en compression. Ce type de toiture offre en outre un intérêt esthétique certain tant pour la forme architecturale que pour les ambiances intérieures qui retiennent l'intérêt des architectes et de leurs clients.

Le problème des poussées

Les toitures en blocs de terre sont généralement lourdes et induisent des poussées latérales très fortes sur les murs qu'il faut rétablir dans leur verticalité. L'utilisation de chaînages, des charges en post-compression (acrotère), de murs épais ou de contrefortes. Eventuellement de tirants pour les voûtes à grande portée, permet de maîtriser ces poussées exercées sur les murs et de les orienter vers les fondations.

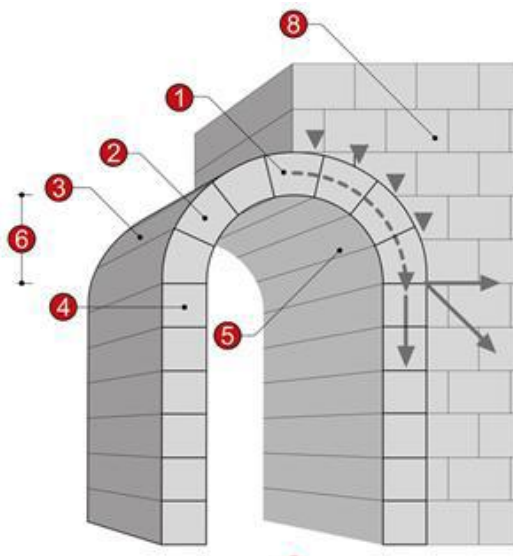
Autres problèmes

La question du calcul de structure de ces toitures en voûtes et coupes doit être préalablement traitée. Elle peut l'être graphiquement (par le tracé funiculaire des poussées ou par l'épure de Mery). Un autre problème est très important : celui de l'étanchéité. Les voûtes et coupes sont souvent très sensibles aux dilatations thermiques (climat chaud, écart des températures diurnes et nocturnes) qui peuvent causer des microfissurations pouvant être à l'origine d'une infiltration. Elles doivent donc être protégées avec soin par des enduits étanches régulièrement entretenus (couche de peinture bitumineuse puis mortier de ciment fortement dosé grillagé et enfin peinture étanche ou badigeonnable à la chaux).

Ces toitures sont finalement davantage utilisées pour l'effet esthétique et pour le confort thermique qu'elles procurent et sont de plus en plus souvent protégées par une sur-toiture de conception traditionnelle.

III.6.6.1 Le vocabulaire relatif aux arcs et voûtes

À la base de l'arc et de la voûte à claveaux **2**, on trouve l'imposte **4**, à son sommet la clef d'arc ou de voûte **1** : dernier claveau que l'on pose au



sommet de l'arc ou de la voûte pour les fermer. L'intérieur de l'arc est l'intrados **5**, l'extérieur est l'extrados **3**. L'arc ou la voûte sont définis par leur portée **7** et leur flèche **6** ; le rapport de la portée sur la flèche qualifie l'élançement de l'arc ou la voûte. Enfin l'écoinçon **8** est l'espace entre deux arcs ou entre deux arcs ou entre un arc et une délimitation rectangulaire

III.6.7 NOTIONS DE STABILITE

III.6.7.1 Principes structurels de base(L'Auroville, 2020)

III.6.7.1.1 Forces agissant dans les arcs et les voûtes

Les arcs et les voûtes sont caractérisés par une poussée dont l'intensité et l'angle peuvent perturber la stabilité

de l'ensemble. La poussée est la résultante de deux forces : le poids de l'arc et la poussée horizontale. Ainsi, la poussée pousse toujours vers le bas avec un angle qui dépend du profil et du poids de la voûte. L'intensité de

la poussée horizontale est générée par le poids des voussoirs, qui reposent les uns sur les autres, et la planéité

de l'arc. Plus l'arc est plat, plus la poussée horizontale est intense.

La poussée horizontale (HT) est appliquée sur les deux ressorts, mais elle se trouve également sur le dessus

de l'arc, car elle représente l'équilibre de la seconde moitié de l'arc. La poussée horizontale peut être minimisée par l'optimisation du profil de la voûte. Néanmoins, il y aura toujours une poussée qui peut être neutralisée au moyen de contreforts, de barres de toit ou de poutres annulaires.

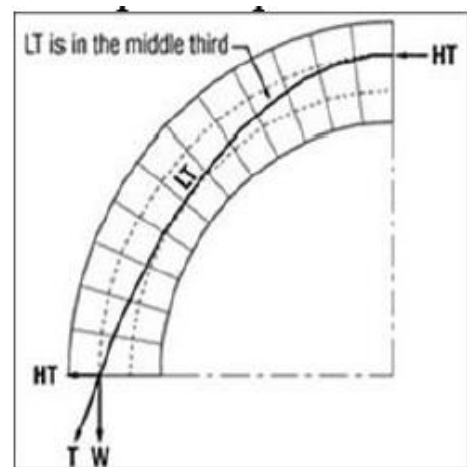


Figure III-36 Forces agissant dans les arcs et les voûtes

L'action successive des voussoirs sur ceux du dessous crée une Ligne de Poussée (LT). Un arc ou une voûte est stable tant que LT reste dans le tiers médian de la section de l'arche.

Figure III-37 Forces agissant dans les arcs et les voûtes

Lorsque LT pénètre dans le tiers interne de l'arc, ce dernier aura tendance à éclater vers l'extérieur.

Lorsque LT pénètre dans le tiers extérieur de l'arc, ce dernier aura tendance à s'effondrer vers l'intérieur

$$HT = \text{Poussée horizontale de l'AVD}$$

- LT = Ligne de poussée qui représente l'action successive des voussoirs
- W = Masse verticale de la maçonnerie et surcharge (morte et vive)
- T = Poussée, force résultante de la poussée horizontale et du poids

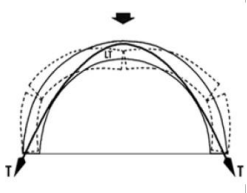
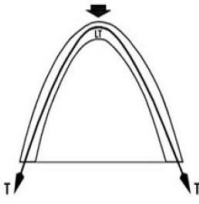
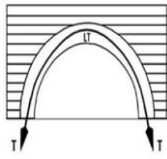
III.6.7.1.2 Principe de stabilité

La ligne de poussée doit toujours rester dans le tiers médian de la section de l'arche et du pilier. C'est une condition sûre de stabilité qui donne une grande marge de sécurité. Si la ligne de poussée ne reste pas dans le tiers médian, l'arc subit des tensions et une surcompression dans certaines zones mais il peut ne pas s'effondrer. L'effondrement se produit uniquement lorsque la ligne de poussée devient tangente à un point de la section de l'arche.

Exemple 1:

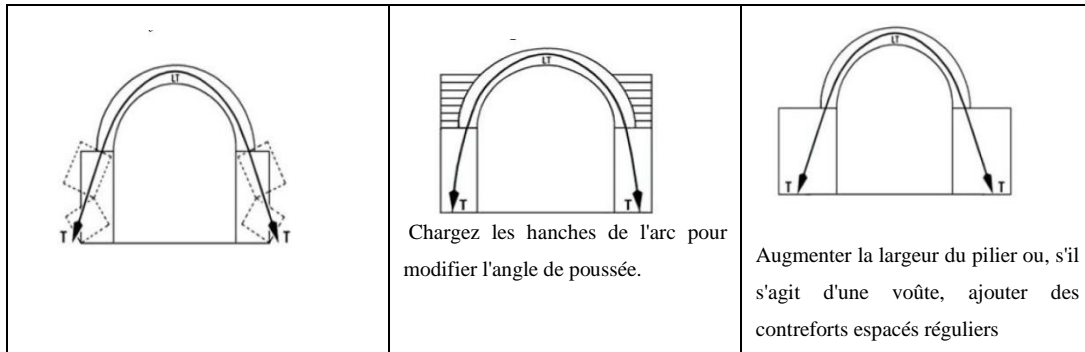
Une forte charge centrale est appliquée sur le dessus de l'arc, ou la forme est disproportionnée.

La ligne de poussée passe dans le tiers intrados et provoquera une panne.

Exemple 1 <i>Charge centrale et panne</i>	Remède 1 à l'exemple 1	Remède 2 à l'exemple 1
	<p>Modifiez la forme de l'arc. <i>Arc caténaire</i></p> 	<p>Conservez la forme et chargez les hanche s. <i>Arc chargé</i></p> 

Exemple 2: La ligne de poussée se situe dans le tiers médian de l'arc, mais pas dans le tiers médian de la jetée. Ce dernier n'est pas assez large et va s'effondrer.

Exemple 1 Pierre trop mince et défaillance	Remède 1 à l'exemple 2	Remède 2 à l'exemple 2



III.6.7.1.3 Courbe caténaire de la ligne de poussée

Les arches peuvent avoir différentes formes et tailles, mais la ligne de poussée suit toujours la forme d'une courbe caténaire inversée.

Une caténaire est la courbe assumée par une chaîne ou un câble flexible librement suspendu sous l'action de la gravité. La ligne centrale des maillons est la ligne de contrainte de traction. Dans un arc, la ligne de poussée est la ligne de contrainte de compression et prend la forme d'une caténaire inversée car c'est la courbe de transfert de charge naturelle dans la maçonnerie.

Dans un arc qui a la forme d'une parfaite courbure caténaire inversée, les voussoirs correspondent aux maillons de la chaîne. Les maillons de la chaîne étant sous tension, les voussoirs de l'arc caténaire inversé sont en compression et LT est centré dans les voussoirs. Les arcs caténaux sont toujours les plus stables,

leur épaisseur peut donc être réduite. Les arcs segmentaires sont également très stables, car LT est près du centre de l'arc.

La ligne de poussée est centrée dans l'arc uniquement dans le cas d'arcs caténaux inversés. Tous les autres types d'arcs auront LT se déplaçant dans le tiers médian de l'épaisseur de l'arche, mais il ne sera jamais centré. Par conséquent, l'arc sera soumis à une combinaison de forces de compression et de traction, ce qui aura tendance à provoquer une rupture.

Comme LT est la ligne de contrainte de compression, la voûte entière ne sera sollicitée que sous compression lorsque LT est proche du centre. Lorsque LT s'éloigne du centre, mais reste toujours dans le tiers médian, cela créera une contrainte de traction sur le côté opposé de l'excentricité de LT. Pour optimiser le comportement d'un arc, il faut essayer

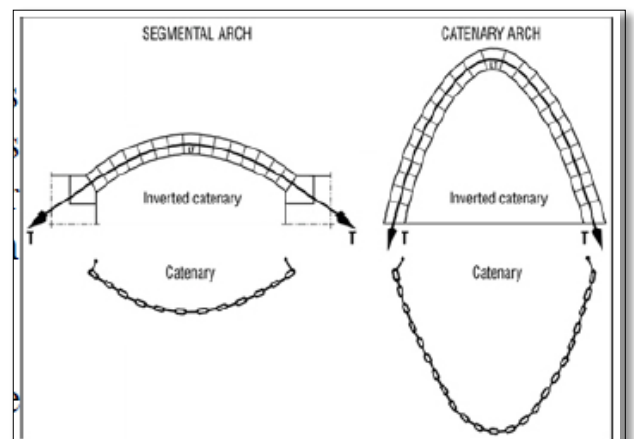


Figure III-38 Courbes et arcs caténaux

de rapprocher le plus possible LT du centre.

En fonction de la charge appliquée sur l'arc, la ligne de poussée prendra une courbe particulière et l'arc sera façonné en conséquence.

III.6.7.2 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE L'ARCHE SUR LA STABILITÉ

Notez qu'ici nous n'utilisons que le nom Arch mais toute cette approche est également valable pour un coffre-fort, car un arc génère un coffre-fort. Nous avons vu que la ligne de poussée prend la forme d'une courbe caténaire inversée et doit toujours rester dans le tiers médian de l'arc.

Les arcades semi-circulaires ont un profil très différent de la courbe caténaire. Par conséquent, LT s'éloignera du centre et cela créera beaucoup de tensions dans l'arc. Afin d'obtenir LT dans le tiers médian de l'arc, l'épaisseur doit être en relation avec la travée. Les arcs semi-circulaires doivent avoir une épaisseur minimale de:

$$t \geq S/5 \quad (\text{Où } t \text{ est l'épaisseur et } S \text{ la portée})$$

Par conséquent, un arc semi-circulaire doit être très épais pour être stable sans aucune charge sur les hanches :

Un arc de 6 m de portée nécessite 1,20 m d'épaisseur, de manière à obtenir LT à la limite inférieure du tiers médian.

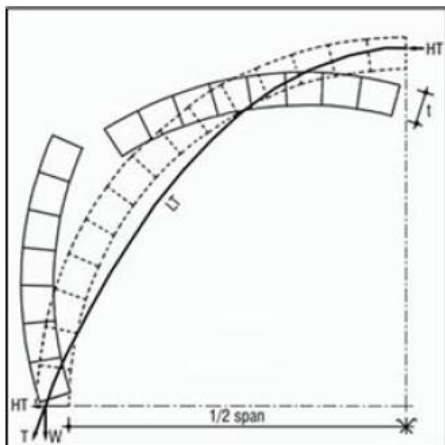


Figure III-39 Instabilité avec un arc trop fin:
 $t = S/20$

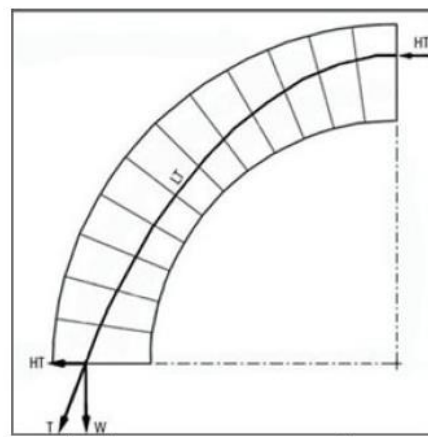


Figure III-40 Stabilité avec la bonne épaisseur de voûte: $t = S/5$

Cette relation explique pourquoi les voûtes en berceau semi-circulaires doivent être très épaisses, car les hanches ne peuvent pas toujours être chargées. Notez que l'épaisseur d'un arc semi-circulaire peut être réduite si les jarrets sont chargés. Cela aura trois effets :

1. LT entrera dans le tiers central de l'arc et deviendra stable.
2. La charge sur les hanches chargera le pilier et amènera la poussée plus verticale. Ainsi, la largeur du pilier peut également être réduite.
3. La poussée horizontale est diminuée, mais le poids et la poussée résultante sont augmentés.

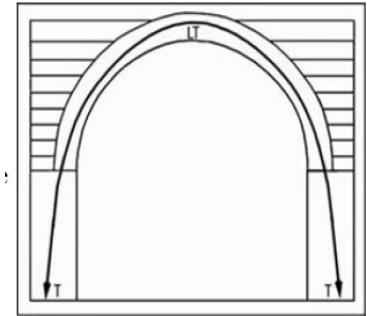


Figure III-41 Épaisseur réduite avec charge sur les hanches : $t = S / 10$

III.6.7.2.1 INFLUENCE DU MORTIER SUR LA STABILITÉ

Les différentes méthodes décrites ci-après pour le calcul de la stabilité des voûtes et voûtes ne prennent pas en compte l'effet du mortier sur la résistance des structures voûtées. Les calculs sont effectués comme si les structures voûtées étaient construites avec de la maçonnerie empilée à sec.

Le mortier lie les blocs et transmet les forces de compression. A noter qu'à l'intrados la transmission des forces se fait directement de bloc en bloc : ils se touchent. A l'extrados le contact est assuré par le mortier qui transmet les efforts de compression.

Lorsque les voûtes et les dômes sont construits avec les techniques Nubien ou Free Spanning, la qualité du mortier est essentielle pour coller les blocs les uns sur les autres. Mais cela n'est nécessaire que lors de la construction de la structure. Une fois la structure achevée, la transmission des efforts se fait également à travers le mortier, sollicité sous compression.

Notez que les mortiers ciment-sable ne peuvent pas être utilisés pour la construction de voûtes et de dômes sans support. De la terre brute ou des mortiers de terre stabilisée sont nécessaires pour les construire de cette manière. Les mortiers ont en général une faible résistance à la traction et ils ne doivent pas être pris en compte pour donner de la résistance aux structures

Empêcher les apports et la stagnation d'eau en pied de mur (descentes d'eau pluviale, VRD, etc.). Le terrain aux abords directs sera nivelé avec des pentes écartant l'eau de l'ouvrage ;

Ne pas gêner l'évaporation dans le terrain à la périphérie de l'immeuble

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Nous avons prévu dans notre travail de réaliser un prototype d'une construction en BTCS ,lefait qui nous permet d'examiner les dispositions qualitatives et constructives étudiés à travers la bibliographie.

L'année universitaire 2019/2020, s'est avérée exceptionnelle de par la pandémie Covid-19, ce qui a entravé notre cheminement de la recherche et a constitué un obstacle contre notre expérimentation qui devait débiter le mois de mars. Du coup, nous n'avons pas pu concrétiser notre travail, qui aurait pu nous permettre d'aboutir aux résultats que nous attendions, d'une manière hypothétique et qui auraient pu donner une certaine crédibilité à notre expérimentation.

Notre recherche sur la fabrication du BTCS et les techniques de constructions de maçonnerie en BTCS est loin d'être achevée, mais sur les résultats obtenus et les observations faites nous pouvons tirer les corollaires suivants :

- ✚ Notre sol présente des caractéristiques très satisfaisantes et qui réponds aux recommandations de différents guides notamment celles de CNERIB.
 - ✚ Pour donner enfin des résultats intéressants en matière de résistance à la compression et de durabilité.
 - ✚ La comparaison entre plusieurs codes et règlements parasismiques et celui de l'Algérie nous fait conclure qu'une étude approfondie doit être effectuée sur les points manquants, absents et rassembler toutes les recommandations dans un seul document qui traitera la construction en terre en générale et en BTCS plus précisément.
 - ✚ Les techniques de construction en BTCS ne sont pas différentes de celles des éléments de maçonnerie porteuses ou non porteuses, chaînés ou non chaînés.
 - ✚ la prédominance des ossatures en béton armé « dans la construction parasismique de tout genre de bâtiments et ceci dans le monde entier. Cependant le requis au niveau du détail autant que de l'exécution d'une part, et le bas niveau de formation de la main d'œuvre fréquemment rencontré dans des pays pauvres d'autre part, font que la technique de maçonnerie chaînée reste hautement vulnérable face aux tremblements de terre »
 - ✚ La nécessité de développement d'actions coordonnées menées dans le cadre de réseaux de compétences organisant des plateformes ou comités de travail sur les thèmes très porteurs de la recherche, la formation, la documentation, la normalisation, les patrimoines. De telles initiatives, bien préparées et valorisant les motivations autant que les nécessités désormais communes à plusieurs pays, devraient pouvoir retenir l'attention des plus hautes instances internationales notamment l'UNESCO pour un soutien institutionnel et financier.
- ❖ Nous voulons ici souhaiter que de tels actes de collaborations et coordinations pourront être concrétisés dans un proche avenir afin de contribuer à un avancement plus décisif des questions de l'environnement et au développement durable pour une meilleure valorisation utile du potentiel des cultures constructives des architectures de terre, en Algérie ou dans le monde entier

Références

- A. Guettala, A. Abibsi, & H. Houari. (2006). Étude de durabilité du béton de terre stabilisé sous les deux exposition en laboratoire et conditions climatiques. *Construction and Building Materials*, 20, 119–127.
- Abdelhamide, H. (2018). Contribution à la production des blocs de terre comprimée et renforcée par des fibres.
- Abdelouhab, L., & Ahmed, H. (2017). Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre).

- Ahmed Ali-Ait Kadi, S. (2012, -06 14). Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semiarides : cas de Timimoune. *thèse magistère*. Tizi-Ouzou 15000 Algérie.
- Ahmed, A., & Lakdar, T. (2018). Caractérisation de durabilité de la brique de terre comprimée et stabilisée (BTC) sous l'effet des actions cycliques de mouillage-séchage.
- Amar, G. (2016). COURS DE MECANIQUE DE SOL. *Chapitre 2. Identification et classification des sols*, 23-28. UNIVERSITE DE SETIF.
- Arar, M. A. (2020, 06 24). *La lumière | Le modernisme d'Albuquerque*. Récupéré sur <http://albuquerquemodernism.unm.edu>.
- BACHA, S., REMAS, A., BELKACEM, A., AZZI.m, BELHAMEL.f, & BELHAMEL.a. (1996, Juillet 24). REGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL DES ET DE CALCUL DES MACONNERIES. *DOCUMENT TECHNIQUE REGLEMENTAIRE D.T.R. C2-45*. Alger, CENTRE DOCUMENTATION - VEILLE RÉGLEMENTAIRE, Algérie: MINISTERE DE L'HABITAT.
- Bachir, T. (2014). ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES.
- BELAZOUGUI, M., Hamid, M. A., Boualem, M. A., Ouahiba, B., Mohamed, F., Ahmed, O., & Abdelkader, R. (2003). REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA 99 / VERSION 2003. *NORME deconstruction DOCUMENT TECHNIQUE REGLEMENTAIRE DTR B C 2 48*. MINISTERE DE L'HABITAT CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE APPLIQUEE EN GENIE-PARASISMIQUE.
- Boulerbah, T. (2019, Juillet 07). L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement de l'espace patio. Cas d'étude secteur sauvegardé de la ville de Laghouat.
- chrislucasabq. (s.d.). *3-d-walking-tour-for-6817-nagoya-road-ne-in-rio-rancho*. Récupéré sur <http://www.chrislucasabq.com/blog/>.
- CNERIB, C. N. (1984, septembre 12). RECOMMANDATIONS POUR LA PRODUCTION ET LA MISE EN OEUVRE DES BETONS DE TERRE STABILISEE.
- CSTB. (2018, MAI 24). ATEx de type : a numéro de référence : 2588. *APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION*. MARNE LA- VALLE, -PARIS, FRANCE.
- Damme, H. V., & Houben, H. (2020). Reply to the discussion of the paper "Earth Concrete. Stabilization. *Cement and Concrete Research*, 130 .

- Delbecque, C. (2011, octobre 21). Histoire de la construction en terre.
- Doat, A., Hays, H., Houben, S., Matuk. (1979). *construire en terre CRATERRE*. An Architecture.
- Guillaud, H., Offroy, T. J., Odul, P., & CRATerre-EAG. (1995). *Blocs de terre comprimée Volume II. Manuel de conception et de construction*. Eschborn Allemagne: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE.
- Guyane, D. (2016, avril). Construire en terre crue de Guyane.
- H. Lamouri-Hannani. (2014). Etude comparative de la durabilité des adobes des constructions en terre anciennes et contemporaines à Timimoun. *memoire master*. ADRAR, Université Ahmed Draia, Algérie.
- Hachem, C. (2017). Contribution à l'étude des propriétés thermo-mécaniques des briques en terre confectionnée par des fibres végétales locales. (Cas de la ville de Ouargla).
- Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (Woodhead Publishing Limited, 2012). *Materials, engineering, construction and applications*. Woodhead Publishing Limited.
- <https://www.travauxavenue.com/construction-maconnerie/guide-travaux/construction-maison/etapes-construction-maison/>. (2020).
- Kasongo wa Mutombo Portance, M., Elysée, K. N., Libasse, S., & Marie, L. I. (2019, April). *European Scientific Journal edition*, 15,(12).
- Krayenhoff, M. (2012). SIREWALL Inc. Dans M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff, *Modern earth buildings*. Woodhead Publishing Limited.
- Laib, A. B. (2017, Décembre 21). Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses.
- L'Auroville, E. I. (2020, MAI). <http://www.earth-auroville.com>. Récupéré sur http://www.earth-auroville.com/stability_calculations_en.php.
- Izemmourena, O., & Guettala, A. (2014). Improved durability of compressed earth bricks based on a soil of the region of Biskra. *MATEC Web of Conferences*.
- MALANDA, N., LOUZOLO-KIMBEMBE, P., & TAMBA-NSEMI, Y. D. (2017, December). Etude des caractéristiques mécaniques d'une brique en terre stabilisée à l'aide de la mélasse de canne à sucre. *CAMES – Sci. Appl. & de l'Ing.*, Vol. 2(2), pp. 1-9.
- Mango-Itulamy, L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. *Thèse de Doctorat*. Université de Liège.
- Marsh, T. A., Heath, A., Walker, P., Reddy, B. V., & Habert, G. (2020). Discussion of "Earth concrete. Stabilization revisited". *Cement and Concrete Research*, 130.

- Minke, G. (2006). *Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture*.
Basel · Berlin · Boston: Birkhäuser – Publishers for Architecture.
- Miraucourt, D. (2017). Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso. *Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte*.
- Mohemed, D. (2007, Février 14). Confection d'une brique à base de sable de dunes.
- MOLINARO, A. A.-C. (2016, 11 6). Conception et construction des arcs. saclay, Paris france.
- Narayanaswamy, A. H., Walker, P., Reddy, B. V., Heath, A., & Maskell, D. (2020). Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. *Construction and Building Materials*, 243 , 096-118.
- Néhémson, R. (2015, avril 23). ESSAI DE FABRICATION DE BRIQUE EN TERRE COMPRESSEE RENFORCEE PAR DES FIBRES DE BAMBOU.
- Nshimiyimana, P., Fagel, N., Messan, A., Wetshondo, D. O., & Courard, L. (2020, Januar 17). Physico-chemical and mineralogical characterization of clay materials suitable for production of stabilized compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 241, pp. 097-118.
- Ouarda, I. (2016, Décembre 11). Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée.
- Ouedraogo, K. A., Aubert, J.-E., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236.
- Oussama, D. (2018, juin). Valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment et de la chaux. *mémoire PFE*.
- Pacheco-torgal, F. L.-E.-e. ((2014)). *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks Design, Properties and Durability*. Woodhead Publishing Elsevier.
- PAULUS, J. (2015). CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:. *MeMoire PFE*.
- Reddy, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural. Dans M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff, *Modern earth buildings Materials, engineering, construction* (p. 353). Indian Institute of Science, Bangalore, India: Woodhead Publishing Limited.
- S.Safia. (2014). la construction en pise entre performances energetiques et perception des usagers cas du village kabyle ait itchir .

- Sarmouk, F. (1998). formulation et caractérisation d 'un béton de terre stabiisé. *Memoire PFE ingenieur*. M'sila, Algérie.
- Schacher, T. (2010). *Maçonnerie chaînée pour maison à deux niveaux guides pour techniciens et artsants*.
- SIREWALL.Inc. (2020). <https://sirewall.com/>.
- Soumia, H. (2015, Mai 20). Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya de Ouargla.
- Taallah, B. (2014). ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES.
- Walker, P. J. (1995). Strength, Durability and Shrinkage Characteristic of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cemenf & Concrete Composites*, 17 , pp. 301-310.

ANNEXES

TABLEAUX Etat Actuel de Recherche sur la Brique de Terre Compressée et Stabilisée (BTCS)

	PAYS	SUJET	APPREIL	NOUVEAUTE	RESULTAT
(RUIZ, Zhang, Edris, Canas, & Garijo, 2018)	Madrid ,spain	Une étude approfondie des propriétés mécaniques des blocs de terre comprimée	Compression Flexion traction	étudier les propriétés mécaniques d'une type BTCS	La compressibilité des échantillons recouverts de caoutchouc, c'est environ 60%de mois que cela

				(résistance à la compression)	couvert de contreplaqué ou sans couvercle
(J.C.MOREL ,&A.Pkla)	France	Un modèle pour mesurer la résistance à la compression de blocs de terre comprimée avec le test de flexion en 3 point	Flexion	Test de flexion en trios points(BTCS)	
(Ouedraogo, Aubert, Tridout, & Escadeillas)	France	La stabilisation des briques de terre avec une faible teneur en ciment ou en chaux est-elle pertinente	deux type de terre et deux type de liants inorganiques . divers mélanges ont été préparés avec les sols et ces liants en utilisant des teneurs massiques de (0% ,2%,4%)	La stabilisation des briques de terre à faible teneur en ciment ou en chaux (mois de 40%)	L'ajout de petites quantités de liant minéraux modifie considérablement le terre pour valeur tampon eau et humidité
(A.Lima, Vrarum, Sales, & f.Netto, 2012)	Brazil	Analyse des propriétés mécaniques de la maçonnerie en blocs de terre comprimée utilisant la cendre de bagasse de canne à sucre	Préparez deux lots de blocs avec 6% et 12%de ciment plus terre avec l'ajout de	Analyse de l'ajout de la bagasse cendre de canne à sucre aux blocs de terre compressée	La cendre de bagasse peut être incorporée dans les BTCS et la maçonnerie sans endommager les propriétés mécanique
(Tallah & Guettala, 2016)	Algérie	Les propriétés mécaniques et physiques du bloc de terre comprimée stabilisé à la chaux et chargé de fibres de palmier dattier non traitées et alcalines	sol concassé et sable comme matrice principale ,la chaux comme stabilisant des fibres de palmier en tant que matière fibreuse	Etude des propriétés mécaniques et physiques du BTC stabilisé à la chaux vive et chargé de fibres de palme	Les valeurs de résistance du BTC chargé de fibres traitées alcalines sont légèrement supérieures à celles des fibres non traitées

(Darshan C.Sekhar ;Sitaram Nayak;2018)	India	Utilisation de laitier et de ciment granulés de haut fourneau dans la fabrication de(BTCS)	Compression	L'utilisation du laitier granulé de haut fourneau et de ciment dans la fabrication de (BTCS)	Le BTCS préparé avec du (LGHF) et du ciment peuvent être utilisés dans la maçonnerie pour la construction de murs porteurs.
(Bing Qu, C.Janse W.Bland, &T.Laurs 2015)	USA	Test de murs en blocs de terre compressée imbriqués à dominante flexion	Flexion	Résultats du test de comportement des murs des blocs de terre comprimée imbriqués contrôlés par	Le mure ICEB la flexion peuvent présenter un comportement hystérétique stable jusqu'à ce une rupture ductile se produite . La ductilité du mur augmente avec

				flexion	l'augmentation du rapport hauteur /largeur lorsque les autres paramètres de conception restent les mêmes. La résistance du mur peut être améliorée en ayant un rebord à une extrémité ,et elle peut être réduite en ayant une ouverture
(A.Gutteal,A .Abi bsi ;H.Houari 2005)	Biskra ,Algérie	Etude de durabilité du béton de terre stabilisée dans des conditions d'exposition à la fois de laboratoire et climatique	Constriction de 8 mures (15 cm d'épaisseur)	Etudier la possibilité d'améliorer significativement la résistance du terre en ajoutant plusieurs stabilisants	Le ciment et la résine ont un meilleur comportement de durabilité que les quatre stabilisateurs (ciment, chaux, ciment plus chaux et ciment plus résine)
(Mansour, Jelidi, Cherif, &Jabrallah, 2016)	Tunisie	Optimisation des performances thermiques et mécaniques des blocs des terre comprimée (BTC)	Compression Mesure de la conductivité thermique du BTC par la méthode du fil chaud	Obtenir un BTC légers en faisant varier leur densité apparent afin de modifier leur porosité et par conséquent d'agir sur leur conductivité	La densité apparente a une forte influence sur le comportement thermique et mécanique du BTC .la diminution de la densité apparente du BTC s'est accompagnée d'une diminution significative de sa conductivité thermique et de son efficacité thermique

Auteur	Pays	SUJET	APAR EIL	NOUVEAUTE	RESULTAT
Bachir Taallah , Abdelhamid Guettala (2016)	Biskra, Algeria	Les propriétés mécaniques et physiques du bloc de terre comprimée stabilisé à la chaux et rempli de dattes non traitées et alcalines fibres de palme	CT-mètre commercial	Ajoutez de la chaux vive et remplie de fibres de palme	L'utilisation de fibres de palme entraîne une diminution de la conductivité thermique et de la densité apparente Il augmente l'absorption capillaire des amas. Effet négatif sur la conductivité thermique du CEB

Philbert Nshimiyimana , Nathalie Fagel , AdamahMessan , Dominique OsombaWetshondo , Luc Courard (2020)	Burkina Faso	Caractérisation physico-chimique et minéralogique des matériaux argileux convient à la production de blocs de terre comprimée stabilisée	Essais d'aptitude de du matériau argileux	Mélanger 0-20% en poids de CCR (résidu de carbure de calcium) avec du CEB et durcir pendant 45 jours à 40 ± 2 c.	La résistance à la compression des CEB a été stabilisée avec 20% CCR amélioré par dix (0,8-8,3 MPa) pour Saba et seulement 2,6 (2-7,1 MPa) pour Papri. Matériaux d'argile Dans cette étude, il convient à la production de CEB CCR stables pour la construction de roulements.
Wesley V.D.C. Bezerra ,Givanildo A. Azeredo (2019)	Brazil	Attaque externe au sulfate sur des blocs de terre stabilisés comprimés	Attaque de sulfate	Présentation du CSEB aux cycles d'absorption capillaire de solution de sulfate de sodium et séchage.	Le temps d'absorption capillaire et la concentration en sulfate affectent les masses solides comprimées stables (CSEB).
A. Ammari, K. Bouassriab, M. Cherraj, H. Bouabid, &S. Charif D'ouazzanec (2017)	Morocco	Effet combiné de la minéralogie et de la texture granulaire sur l'optimum technico-économique de l'adobe et de la terre comprimée blocs	compression	Ajouter deux types de stabilisants ciment et chaux	La résistance à la compression augmente avec la teneur en ciment Présence de chaux vive (avec de l'eau) dans L'argile peut se déposer avec carbonatation.
María Catalina Niño Villamizar , Vanessa SpinosiAraque , Carlos Alberto Ríos Reyes ,Reinaldo Sandoval Silva (2012)	Colombia	Effet de l'ajout de cendres de charbon et d'écorces de manioc sur les propriétés techniques de blocs de terre comprimée	compression	Ajoutez de la cendre de charbon et utilisez la peau de manioc comme nouvelle matière organique dans la préparation des Blocs de sol compressés.	Les masses terrestres compactées se sont stabilisées avec les cendres de charbon résultantes Meilleurs résultats avec une dose inférieure ou égale à 5%. .
Seick Omar Sore ,AdamahMessan , Elodie Prud'homme , Gilles Escadeillas , François Tsobnang(2018)	France	Stabilisation des blocs de terre comprimée (CEB) par liant géopolymère à base de matériaux locaux du Burkina Faso	26	L'utilisation de géopolymères et de ciment Portland	La polymérisation géologique des CEB a grandement amélioré leurs performances mécaniques. Les CEB sont stabilisés par cémentation, notamment en ce qui concerne leur stabilité dans l'eau.

C. Egenti , J.M. Khatib , D. Oloke (2014)	Nigeria	Conceptualisation et étude pilote d'un bloc de terre compressée bombé pour un logement durable au Nigeria	Test de durabilité des échantillons CEB compression	Ajout du ciment	L'ajout de ciment était faisable et a ainsi ouvert la voie à de nouveaux travaux de recherche sur l'éjection compacte de la terre (SCEB).
Boumediene Serbah , Nabil Abou-Bekr , Salima Bouchemella , Joanna Eid , SaidTaibi (2018)	Algeria	Valorisation des sédiments dragués dans les blocs de terre comprimée: aspiration et effet de la teneur en eau sur leurs propriétés mécaniques	Préparation d'échantillons compactés: appareil et échantillons	Valorisation des sédiments naturels dragués dans les masses de terres compactées (CEB).Le sédiment a été modifié au sable et pressé à une pression de MPO + 25.	évaluation des gisements naturels de dragage de la CEB qui y répond aux Recommandations. Sur la base des tests hydrauliques et mécaniques réalisés, le comportement du CEB sur site a été choisi.

Liste de figures

Figure I-1 Représentation schématique des interactions qui régissent le développement durable	1
Figure I-1 salles de classe opéra village	8
Figure I-2 logements des enseignants	8

Figure I-3Centre médical en BTC	9
Figure I-4des bois d'eucalyptus entre les briques et la tôle.	9
Figure I-5Résidence cum office, Kassel, Allemagne	10
Figure I-6 plans : Résidence cum office, Kassel, Allemagne	10
Figure I-7 Résidence cum office, Kassel, Allemagne vues d'intérieur	11
Figure I-8Maison pour trois familles, Stein sur le Rhin, Suisse travaux de réalisation	12
Figure I-9 Maison pour trois familles, Stein sur le Rhin, Suisse	12
Figure I-10Mosquée Baitul Muqet, Wabern, Allemagne	12
Figure I-11 Mosquée Baitul Muqet, Wabern, Allemagne	12
Figure I-12Bibliothèque publique du comté de Sublette à Pinedale, Wyoming - USA.....	13
Figure I-13Bibliothèque publique du comté de Sublette à Pinedale, Wyoming - USA vue d'interieur.....	13
Figure I-14Antoine Predock, plan du site de La Luz, 1967. Source: Brad Collins, éd.,.....	14
Figure I-15. La Luz, Albuquerque, NM, novembre 2015.	15
Figure I-16Espace commun avec fontaine, La Luz, novembre 2015.....	15
Figure I-17 pland'unemaison à La Luz (chrislucasabq),	15
Figure I-18 Siège social de Telenor, Islamabad	16
Figure I-19 logements en B.T.C à Tamanrasset (Le CNERIB.....	18
Figure I-20premières assises du prototype de (S.Safia, 2014).....	18
Figure I-21: Prototype achevé (S.Safia, 2014)	18
Figure I-22maison en pisé au village Madher à Boussada (S.Safia, 2014).....	18
Figure I-23maison circulaire Hakka source : https://maison-monde.com/maisons-circulaires 20	
Figure I-24 coupe d'une maison circulaire Hakka source : https://maison-monde.com/maisons-circulaires-hakka/	20
Figure I-25Fort de pisé à Basgo, Inde.	20
Figure I-26Section de pisé du monastère de Kyichu Lhakhang, Bhouta	21
Figure I-27 Les Techniques De Construction En Terre Anciennes CRATERRE	23
Figure I-28 La bauge	24
Figure I-29 les trois techniques de torchis	25
Figure I-30 : Moulage et séchage des blocs adobes (Hanane, 2018)	26
Figure I-31 Construction d'un mur en pisé.....	27
Figure I-32Différents produits de blocs de terre comprimée(Ahmed & Lakdar, 2018)	29
Figure I-33Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Bachir T. , 2014)	36

Figure I-34	Prise du laitier (Laib, 2017).....	40
Figure I-35	: Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm).....	42
Figure I-36	Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité.....	43
Figure I-37	Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers	45
Figure I-38	Mur Après 48 mois d'exposition avec 5% stabilisant (ciment) (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006).....	50
Figure I-39	Vue générale des murs en briques de terre.....	50
Figure I-40:	Résistance mécanique à la compression des blocs de terre après cure chimique (Chaibeddra & Kharchi, 2019).....	58
Figure I-41	Essai de compression pour déterminer le module d'élasticité (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).....	59
Figure I-42	Dispositif d'essai de de flexion 3 points (Ruiz, Zhang, & Al, 2018).....	60
Figure I-43	essai de résistance à la compression (Mostafa & Uddin, 2016).....	61
Figure I-44	Moyenne de la résistance de compression des BTCs (Mostafa & Uddin, 2016....	62
Figure I-45	proportion du mélange de la BTCS (Mostafa & Uddin, 2016).....	62
Figure I-46	Résistances à la compression minimales admises pour les BTC	63
	Les conditions de test varient également d'une norme à l'autre. C'est pourquoi les valeurs obtenues doivent être comparées avec précaution. Seules les données avec les mêmes conditions de test (e.g., dimension des BTC, pression de mise en forme) peuvent être comparées (Bruce King, 2006). La Fig. I-47 illustre le mode opératoire de détermination de la résistance à la compression des BTC selon certaines normes. Les informations obtenues dans la bibliographie témoignent d'un manque de consensus sur la méthode à utiliser pour caractériser les BTC.	63
Figure I-48	Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s'agit de blocs 29,5x14x9,5 cm (Lxlxh, d'après P'kla,2002).	64
Figure II-1	Sol argileu-sableu BOUKHMISSA M'sila.....	68
Figure II-2	Diagramme des poids et volumes des constituants d'un sol.....	68
Figure II-3	Méthode de la pesée hydrostatique	69
Figure II-4	pycnomètre.....	69
Figure II-5	Tamiseuse de laboratoire à vibrations électromagnétiques par tamisage à sec ou humide des tamis Ø 200 à 315 mm source : (EL SAWARI CONTROLE).....	70
Figure II-6	Analyse granulométrique sole rouge Boukhmissa. (Sarmouk, 1998).....	71

Figure II-7Essai limites d'Atterberg.....	71
Figure II-8courbe la limite de liquidité. (Sarmouk, 1998)	72
Figure II-9 Appareillage Essai Proctor.....	72
Figure II-10courbe essai Proctor (Sarmouk, 1998).....	73
Figure II-11 Appareillage de L'essai au bleu de méthylène	74
Figure II-12Mallette d'analyse de l'eau Selon XP P18-303	75
Figure II-13tamisage	75
Figure II-14malaxage	75
Figure II-15:presse hydraulique confectionné dans le laboratoire: Moulage et compactage...	76
Figure II-16 enceinte climatique pour le cure des éprouvettes	76
Figure II-17Eprouvette séchée dans l'étuve	76
Figure II-18Essai de traction par fendage	76
Figure II-19Essai d'écrasement de l'éprouvette.....	77
Figure II-20Durabilité : essai de mouillage -séchage en 12 cycles source (Sarmouk, 1998)..	78
Figure II-21Durabilité : courbe perte en poids en % source (Sarmouk, 1998)	78
Figure II-22 Procédure de formulation etdecaractérisétions deBTS	78
Figure III-11 l'emplacement et taille d'ouverture	85
Figure III-2Dispositions typiques des chaînages en plan.....	87
Figure III-3chaînage des éléments structuraux	88
Figure III-4Exemple de disposition constructive	88
Figure III-5Dispositives constructives des encadrement des bais et ouvertures	90
Figure III-6encadrement en béton armé	90
Figure III-7Profils courants de joints de parements et exemples d'appareillages courants	94
Figure III-8 réalisation des chaînages horizontaux	96
Figure III-9 Réalisation des chaînages verticaux	97
Figure III-10Armatures minimales des chaînages horizontaux et verticaux.....	97
Figure III-11Dimensions, appuis des linteaux et largeur minimale du trumeau	98
Figure III-1211 Renforcement des trumeaux pour $a_1 < 1,00m$	99
Figure III-13Exemple de corniche non admise	99
Figure III-14 Armature minimale d'un bandeau.....	100
Figure III-16 Armature minimale d'un balcon	100
Figure III-17jonction et croisement des murs dont l'épaisseur est celle du matériau	101
Figure III-18Armatures dans les assises à l'endroit du croisement des murs.....	102

Figure III-19 Jonction et croisement des murs dont l'épaisseur est plus grande que celle du matériau	103
Figure III-20 Epaisseur minimale d'une paroi simple de maçonnerie de brique pleine de terre cuite, de BTS, de plâtre, silico- calcaire,.....	103
Figure III-21 Epaisseur minimale d'une paroi double de maçonnerie de blocs creux de granulats courants ou légers.	103
Figure III-22 Application d'une charge localisée	109
Figure III-23 Valeur de p en fonction des conditions de liaison des bords verticaux du mur et du rapport de la hauteur H à la longueur L du mur	111
Figure III-24 Armatures dans les maçonneries	114
Figure III-25 Appareillage.....	121
Figure III-26 Jonctions De Murs	122
Figure III-27 Fondations	124
Figure III-28 trumeaux	126
Figure III-29 Allèges	127
Figure III-30 chaînages horizontaux	127
Figure III-31 Chaînage verticaux - renforcements	129
Figure III-32 Choix du terrain et Piquetage en face du LDGM université M'sila.....	131
Figure III-33 L'emplois du béton cyclopéen pour la fondation et le soubassement est une solution intéressante au plan technique et économique (Guillaud, offroy, Odul, & CRATERRE-EAG,1995)	132
Figure III-34 un béton cyclopéen en fondations	132
Figure III-35 FORME DE JOINTS.....	140
Figure III-36 Vocabulaire relatif aux arcs et voûtes	142
Figure III-37 Forces agissant dans les arcs et les voûtes.....	143
Figure III-38 Forces agissant dans les arcs et les voûtes.....	143
Figure III-39 Courbes et arcs caténaux.....	145
Figure III-40 Instabilité avec un arc trop fin: $t = S / 20$	146
Figure III-41 Stabilité avec la bonne épaisseur de voûte: $t = S / 5$	146
Figure III-42 Épaisseur réduite avec charge sur les hanches : $t = S / 10$	147

Liste des tableaux :

Tableau I-1 les opérations de construction en terre en Algérie (H.Lamouri-Hannani, 2014)..	17
Tableau I-2: Brique de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle (Soumia, 2015).....	28

Tableau I-3 Moyens de stabilisation des terre remaniées (Hanane, 2018)	32
Tableau I-4 Les groupes de sols.	43
Tableau I-5 Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm).....	43
Certaines normes donnent des recommandations sur la durabilité ou la résistance à la flexion des BTC et sur leur usage (Tableau I-6).	63
Tableau I-7 normes donnent des recommandations sur la durabilité ou la résistance à la flexion des BTC et sur leur usage	64
D'autres normes donnent la valeur de l'épaisseur du mur en terre en fonction de la résistance à la compression (Tableau I-8, données concernent la technique du pisé).	64
Tableau I-9 Normes concernant l'épaisseur du mur en fonction des résistances à la compression (TotalBoox et TBX, 2012).	65
<i>Tableau II-1 Analyse granulométrique pour l'argile rouge</i>	70
Tableau II-28 Récapitulatif des limites d'Atterberg. (Sarmouk, 1998)	71
Tableau II-3 RESULTAT DE L'ESSAI PROCTOR T (Sarmouk, 1998)	72
Tableau II-4 Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche	74
Tableau III-1 Hauteur et nombre de niveaux selon le RPA	84
Tableau III-2 Distances maximales entre les murs porteurs selon zone sismique	85
Tableau III-3 Coefficient de sécurité partielle γ_m sur le matériau maçonnerie	90
L'écart entre deux joints verticaux successifs doit être supérieur ou égal au 1/4 de la longueur de la brique (voir tableau III-4).	93
Tableau III-5 les règles des joints de mortier à respecter en fonction de la nature du matériau	93
Tableau III-6 Valeurs tolérées du coefficient de capillarité C	103
Tableau III-7 Valeur du Coefficient α	105
Tableau III-8 Valeur de K	106
Tableau III-9 Valeur de K_f	107
Tableau III-10 Valeurs de θ_n et $n_{lim i}$	107
Tableau III-11 Valeur de Φ	111
Tableau III-12 Valeur de η	111
Tableau III-13 Valeur de mld	111
Tableau III-14 des compositions d'enduit à titre indicatif	123