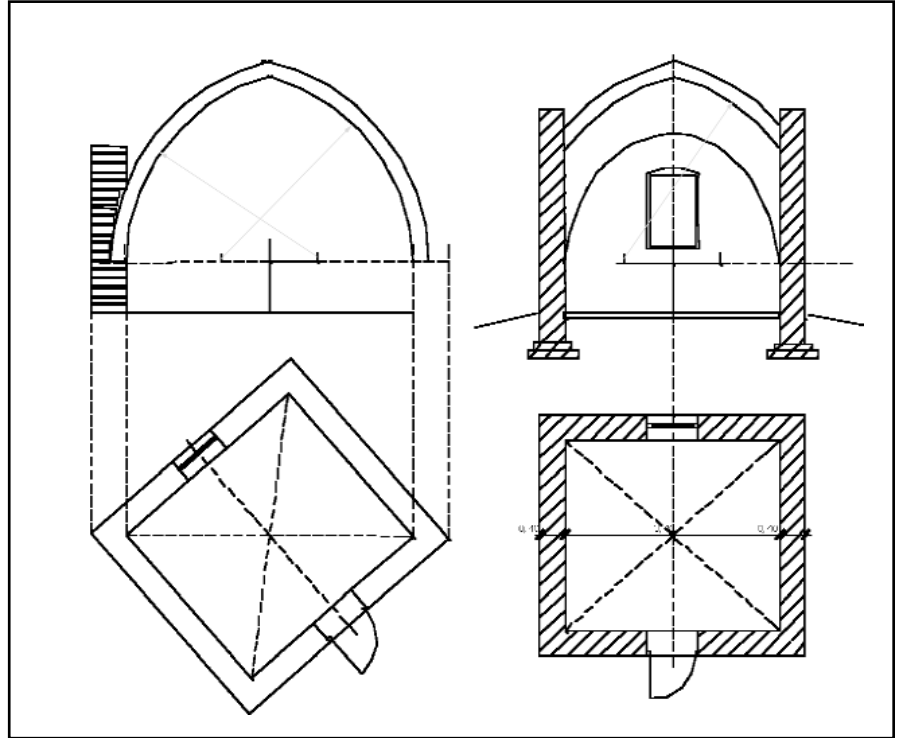
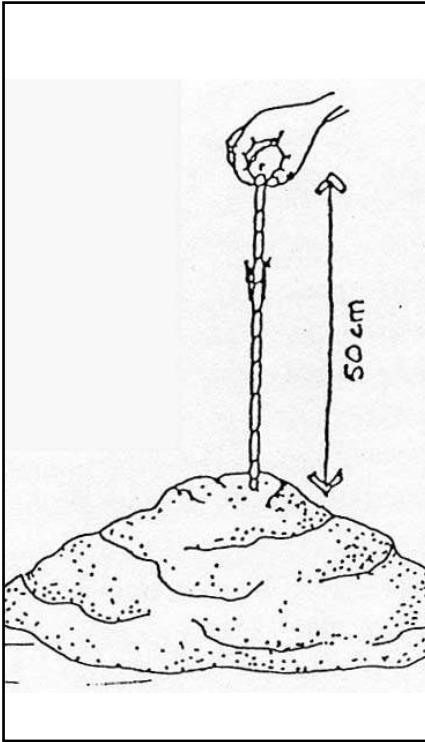
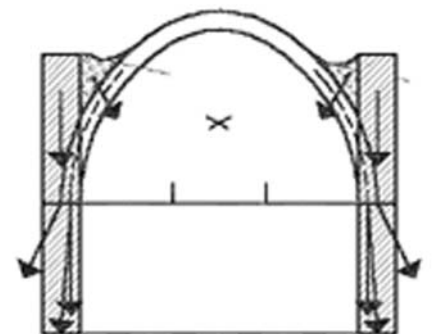
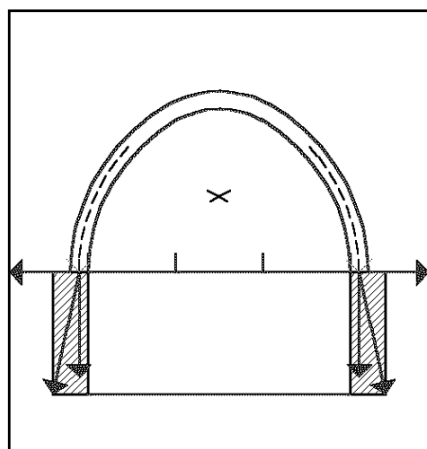
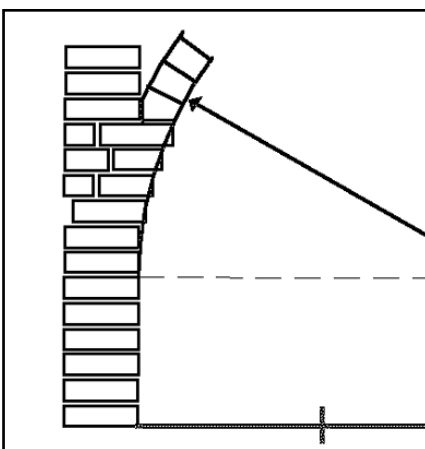


Document de référence de la CSB

Principes de structure & règles de base



Construction Sans Bois



Development Workshop

La construction sans bois: document de référence

Principes de structure & règles de base

Conception et réalisation :

Development Workshop
France

B.P. 13
82110 Lauzerte
France

Tél : +33 (0) 563 95 82 34
Fax : +33 (0) 563 95 82 42
e-mail : dwf@dwf.org
internet : <http://www.dwf.org>



Version 2

Dessins & photos
© Development Workshop
sauf mention spécifique

Décembre 2003



Sommaire

	<i>page</i>		<i>page</i>
1. Introduction			
1.1. Généralités	1	7. Forces dans la structure	17
1.2. Cibles visés par la CSB et ce document		7.1. Généralités	
1.3. Paramètres à respecter		7.2. Les forces statiques et dynamiques	
2. Les briques et blocs de terre crue	3	7.3. Les forces exercées par les toitures voûtées	
2.1. Les matériaux		7.4. Maîtrise des forces	
2.2. Caractéristiques		7.4.1. Absorber les forces d'écartement avec des murs plus épais	
2.3. Résistance à la compression		7.4.2. Augmenter la charge verticale	
2.4. Evaluation de la résistance des briques de terre		7.4.3. Charger sur le rein de la voûte	
2.4.1. Test simple sans matériel		7.4.4. Diminuer la hauteur du point de naissance	
2.4.2. Test de rupture à la flexion		7.4.5. Introduire un élément de contrebutement des forces obliques	
2.4.3. Refus d'une brique		7.4.6. Diminuer le volume des murs épais par l'emploi d'alcôves	
3. Acceptation des blocs et briques en terre crue	7	8. La forme de la voûte	20
3.1. Généralités		8.1. Généralités	
3.2. Le contrôle de qualité		8.2. Tracé de la forme voûtée	
3.3. L'analyse de contrôle		8.3. Consolidation de la structure	
3.3.1. Contrôle du sol		8.3.1. Condition 1 : Pendant la mise en œuvre	
3.3.2. Contrôle de l'eau		8.3.1. Condition 2 : Le bâtiment fini	
3.4. Les tests d'acceptation		8.4. Limites structurelles	
3.4.1. Accords sur les critères d'acceptation		8.5. Emploi des paramètres	
3.4.2. Lieu d'acceptation		9. La forme de la coupole	24
3.5. Définition des critères de qualité et exécution des tests		9.1. Généralités	
3.5.1. Aspect des arêtes		9.2. La coupole ogivale	
3.5.2. Dimensions		9.3. Distribution des forces	
3.5.3. Fissures		9.3.1. Pendentifs	
3.5.4. Résistance mécanique à sec		9.3.2. La coupole sur pendentifs	
3.5.5. Résistance à l'érosion de l'eau		10. Fondations	26
3.6. Comment corriger quand les tests d'acceptation sont négatifs?		10.1. Généralités	
3.6.1. Aspect des arêtes		10.2. Le sol	
3.6.2. Dimensions		10.3. Terres humides	
3.6.3. Fissures		10.4. Retrait de la terre	
3.6.4. Résistance mécanique à sec		10.5. Fondations en briques de terre	
3.6.5. Résistance à l'érosion à l'eau		10.6. Charge et forme des fondations	
4. Relation entre la qualité des blocs et leur utilisation	12	10.7. Appareillage et pose de la maçonnerie	
4.1. Dimensions des briques et des blocs		11. Les ouvertures	28
4.2. Qualité et composition de la brique et son utilisation		11.1. Généralités	
4.3. Choix du sol pour les blocs de toiture et pour les arcs		12. Construire aux étages et en sous-sol	29
4.4. Les blocs de mur		12.1. Généralités	
4.5. Temps minimum de séchage		13. Niveaux	30
5. Le mortier	14	13.1. Généralités	
5.1. Rôle du mortier de pose			
5.2. Caractéristiques d'un mortier de terre			
5.3. Retrait			
5.4. Mortier de terre sur voûtes et coupoles			
6. L'enduit	16		
6.1. Généralités			
6.2. L'accrochage de l'enduit est indispensable		Annexe : Références principales	31

I. Introduction

1.1. Généralités

La construction sans bois (CSB) propose des techniques qui permettent de réaliser un habitat et des infrastructures à faible coût, voire de très bonne qualité, mais toujours à l'aide de matériaux et de ressources locaux. Elle permet d'épargner l'utilisation du bois dans la construction, facteur important pour la sauvegarde de l'environnement, et elle favorise l'utilisation de la main d'œuvre locale et la création de revenus locaux.

La construction sans bois est une méthode de construction qui se base sur deux composants :

- Des briques et des blocs de terre crue - le "banco" - moulés à la main dans des formes rectangulaires, tels qu'ils sont utilisés couramment dans la construction dans les villes et villages du pays.
- Des toitures voûtées en forme de coupôles et de voûtes construites sans coffrage, dont les origines des méthodes de la mise en œuvre se trouvent au moyen orient (par exemple, en Egypte et Iran) où ces techniques existent depuis plusieurs milliers d'années.

Les techniques pour la mise en œuvre de la CSB et les formes des structures employées ont été adaptées au contexte local du Sahel au cours des derniers 20 ans.

1.2. Cibles visés par la CSB et ce document

La CSB est destinée à la construction de bâtiments de petite et moyenne échelle. La formation a visé les maçons des villes secondaires et des villages du pays. Certains de ces maçons sont devenus très compétents, mais la majorité sont surtout expérimentés dans la réalisation de bâtiments relativement modestes de 3 à 5 pièces. Les techniques ont été adaptées aux besoins et aux capacités de ces maçons. A ces fins, elles comprennent des marges de sécurité réalistes et nécessaires pour une mise en œuvre correcte par des maçons travaillant pour la plupart seuls et sans recours à une assistance technique.

Ce document se base sur les consignes de la mise en œuvre telles qu'elles sont présentées dans le *Guide Pratique : Construction Sans Bois*, auquel ce document fait référence. Il est fortement recommandé que les paramètres de la mise en œuvre soient respectés à la fois par les clients demandeurs de bâtiments et par les architectes et techniciens qui souhaitent travailler avec les maçons du pays pour réaliser la construction sans bois.

1.3. Paramètres à respecter

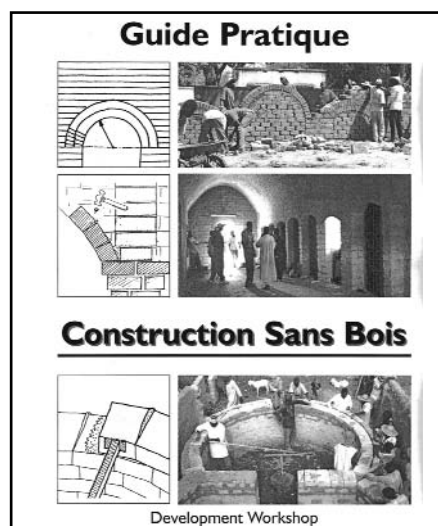
La bonne réalisation de la CSB dépend du respect de quatre aspects de sa mise en œuvre :

• Obtenir une bonne qualité de briques de terre :

- S'assurer que la production des briques est bonne, et que les briques produites sont aux dimensions adaptées à la CSB. Voir *Guide Pratique : Construction Sans Bois* Fiches 2, 3 & 4 ainsi que Section 2 du présent document.

• Choisir un site convenable :

- Construire dans de zones où il existe déjà des exemples de la construction en terre - en l'absence de bâtiments existants en terre, veiller à vérifier la qualité de la terre et sa résistance aux intempéries. Poser la question : " pourquoi n'a-t-on pas construit des bâtiments en terre par ici ? ". Il peut y avoir une bonne raison.



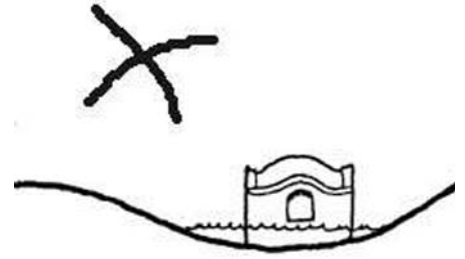
1. Observez les bâtiments en terre dans la localité. Sont-ils en bon état?
 2. Demandez qui se trouve la bonne terre pour bâtir.
 3. Prenez plusieurs échantillons, procédez aux tests suivants en cochant le tableau.

Nom de la localité: _____ No d'échantillon: _____ Date: _____

Terre #	Vous avez trois réponses possibles par test: cochez A, B, ou C.		
	A	B	C
Prélèvement Observation - regarder l'échantillon	très fin et poussiéreux	bon mélange allant de gros à fin	fin et granuleux
Tourner à sec	pas très rugueux s'il n'est lachement	rugueux, facile à écailler	difficile à écailler
Toucher humide - frotter la terre humide avec le doigt	se désagrège rapidement, colle	s'effrite rapidement, ne colle pas beaucoup	se désagrège lentement, très collant
Rinçage des mains avec terre humide	difficile à rincer	facile à rincer	se rince, difficile à rincer
Adjoindre le tout pour étaler une colonne			
Cochez (+) la colonne avec le score le plus élevé			
Arrêter, ne convient pas	Continuer ...	Continuer ...	
Test du cigare	moins de 5 cm	entre 5 et 15 cm	plus de 15 cm ou plus
	Trop sableux	bon mélange	très mélangé trop argileux
	bloc fragile	bon bloc	bloc possible sans des tests de compression sur des échantillons
Potentiel	non	oui bon	non
Résultats finaux			

Vérifier vos résultats faites une brique avec la meilleure terre, et testez-la en montant dessus.

-
- Éviter des sites à risque d'inondation.
 - Éviter si possible des sites avec des signes d'un sol gonflant, et le cas échéant prendre des mesures de sécurité.
 - Éviter des zones climatiques susceptibles de recevoir de longues périodes de pluies sur plusieurs jours.
 - Respecter les consignes d'orientation qui permettent de réduire les effets d'érosion causés par la pluie.



• **Ne pas dépasser la capacité des maçons :**

- Prendre soin de comprendre le processus de la mise en œuvre de la CSB, pour éviter une conception architecturale qui pose des difficultés techniques et matérielles lors de sa mise en œuvre. Voir *Guide Pratique : Construction Sans Bois*.
- S'assurer que le (ou les) maçon(s) formé(s) en CSB engagé(s) pour la réalisation de votre projet a (ont) bien compris l'ensemble des éléments et des idées proposés par les plans, et qu'il(s) est (sont) d'accord sur les paramètres structuraux : la portée et la hauteur du point de naissance des toits proposés ; les dimensions des ouvertures et des murs.

• **Concevoir la forme et les dimensions de vos bâtiments en CSB en fonction des paramètres structuraux :**

- voir les pages suivantes.

2.1. Les matériaux

La CSB se réalise avec des briques en terre crue. La terre, et donc les briques en terre crue, ont des caractéristiques structurales assez spécifiques, même si la composition de la terre varie d'un endroit à un autre.

Les variations dans la composition de la terre influencent la qualité de la brique, voire même la possibilité de faire des briques avec la terre disponible.

Il est donc nécessaire de faire :

- i) Une analyse simple de la terre dans les localités différentes ;
- ii) De faire des essais d'acceptabilité sur les briques produites par des briquetiers. Voir section 3.

Supposant qu'on travaille avec de la terre jugée acceptable pour la fabrication des briques destinées à la CSB, on peut identifier les caractéristiques principales suivantes.

2.2. Caractéristiques

- Les briques en terre ont surtout une bonne résistance à la compression.
- Les briques de terre ont une très faible résistance à la traction.
 - *Conséquence 1 : il faut s'assurer que la structure et les forces transmises dans la structure travaillent en compression, et que les lignes de force restent à l'intérieur de la largeur des toitures et des murs d'appui. Voir section 7.*
- Les briques de terre ont en général une très faible résistance à la compression en état humide.
- Les briques en terre ont une résistance assez limitée à l'effet érosif de la pluie.
 - *Conséquence 2 : Il faut protéger la structure contre la pénétration d'eau et la saturation des briques en terre. Voir sections 6 & 10.*



Oui



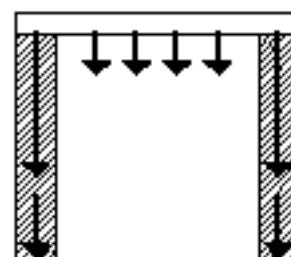
Non

2.3. Résistance à la compression

On peut atteindre une résistance à la compression (R_c) qui se situe entre 20 et 35 kg/cm².

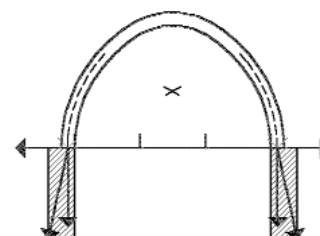
- **Il est réaliste de demander que les briquetiers fabriquent des blocs de terre dont la résistance se situe entre 25 et 30kg/cm².**

Dans le cas de bâtiments traditionnels en terre (toiture-terrasse soutenue par des murs d'un étage), la descente des charges se fait verticalement dans le centre du mur. Dans la maçonnerie, la contrainte maximale de compression (T_c) ne dépasse pas 1 kg/cm².



Par contre, pour les bâtiments avec coupoles, et surtout avec voûtes, la poussée de la toiture "déplace" la descente des charges vers le côté extérieur du mur, augmentant la T_c dans la maçonnerie.

Par sécurité, on limite cette T_c à 2,5 kg/cm². Cette charge supérieure est ajoutée aux coefficients de réduction indiqués ci-dessous.



La résistance à la compression doit être multipliée par des coefficients :

- de sécurité,
- de réduction et
- de saturation.

Ainsi :

Résistance de base demandée par la descente des charges = 1 kg /cm²

Coefficient de sécurité = x 3

Concerne :

- Perte de qualité à la production
- Perte de qualité dans la mise en œuvre
- Accroissement anormal des charges

Coefficient de réduction = x 4

Concerne :

- La nature de matériau
- La résistance du mortier
- Les forces exercées par la structure voûtée

Coefficient de saturation = x 2

Concerne :

- Le rapport entre la résistance humide et la résistance à sec

Total résistance à la compression (Rc) voulue = 1 x 3 x 4 x 2 = 24kg/cm²

Une valeur autour de 25kg/cm² de résistance à la compression apporte une marge de sécurité importante, et surtout si la fabrication des briques et la mise en œuvre sont bien contrôlées.

Cette résistance n'est pas forcément très élevée, mais elle est largement adéquate pour la construction des bâtiments à un, voire deux étages, sous réserve que l'épaisseur des murs soit adéquate (voir tableau en section 8.4.). Des exemples partout dans le monde en sont témoins !

Note :

La résistance à la compression dépend de la composition de la brique, c'est à dire des proportions des différents éléments fins (argiles, silts) et moins fins (sables, graviers, etc.) et de la qualité de ces composants. Une bonne brique est normalement composée au moins d'un mélange d'argile et de sable, mais d'autres composants peuvent être présents, comme le silt, qui en diminuerait la résistance. Des essais simples permettent de déterminer rapidement la composition de la terre, et sa qualité en ce qui concerne la construction (voir fiches 2 & 3 du *Guide Pratique : Construction Sans Bois*).

2.4. Evaluation de la résistance des briques de terre

Il n'est pas réaliste de proposer des tests de compression sur des briques, car ceci nécessite l'emploi d'un matériel assez sophistiqué, et donc que rarement disponible.

Par contre, dans la majorité des cas, un test de la résistance à la rupture en flexion d'une brique servira comme contrôle adéquat.

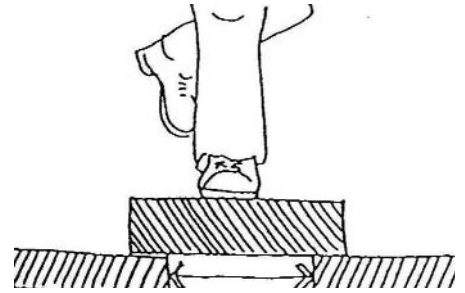
Il y a un rapport entre le Rc et le Module de rupture (Mr) égal à 1 :10.

Donc une valeur Mr de 3kg/cm² est égale à une valeur Rc de 30kg/cm².

On peut effectuer le test de rupture à la flexion à deux niveaux :

2.4.1. Test simple sans matériel (poids moyen 65 kg)

On pose une brique sèche sur deux autres briques, écartées de 20 cm, et on monte sur la brique centrale superposée sur les autres. La brique doit résister. Il faut compter au moins une semaine de séchage des briques avant de procéder à ce test. Si plus d'un quart des briques sélectionnées ne résistent pas, il faut vérifier le processus de production et le choix de la terre et recommencer la production. Plusieurs paramètres peuvent être modifiés - voir section 3.



2.4.2. Test de rupture à la flexion

Matériel requis :

- Deux planches en bois de 120 x 35 x 4 cm et quatre cornières de 30 x 3,5 x 3,5 cm. Les planches et les cornières sont disposées comme indiquées dans le dessin.

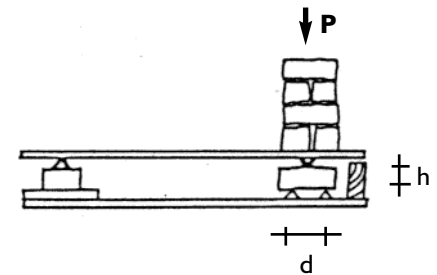
S'assurer que chaque production journalière est stockée distinctement et soigneusement.

Prélever trois blocs d'un lot de production, au hasard, dans chaque production journalière (après deux semaines de séchage minimum), et leur faire subir le test de rupture. Ces trois blocs devront répondre aux trois critères d'acceptation énumérés plus loin, à savoir pas d'arête creuse, bonnes dimensions et pas plus d'une fissure au milieu.

$$3 \cdot P \cdot d$$

$$M_r = \frac{\quad}{2 \cdot l_a \cdot h^2} > 3 \text{ kg/cm}^2$$

$$[l_a = \text{largeur}]$$



Dessin : A. Douline

Exemple d'un essai de rupture de flexion

Blocs de l_0	40x	l_a	20x	h	12 cm
No. blocs	12				
Poids bloc (à peser)	15 Kg				
Poids total P (No blocs x poids)	222	Kg			
Distance entre cornières (d)	25	Cm			
Largeur bloc (l_a)	18	Cm			
Hauteur bloc (h)	12	Cm			
h^2	144	cm ²			
$M_r =$	2.6	kg/cm²			

Si 1 bloc sur 3 est à $< 2.5 \text{ kg/cm}^2$: recommencer sur 3 autres blocs.

Si 1 bloc sur 3 est toujours à $< 2.5 \text{ kg/cm}^2$: refuser le lot de briques.

2.4.3. Refus d'une brique

S'il faut refuser un lot de briques, vérifier les paramètres de production et recommencer la production des briques. Les paramètres de production des briques comprennent :

- La qualité de la terre utilisée (voir fiche de contrôle de la qualité de la terre).
- La quantité d'eau utilisée lors du moulage (voir test de teneur en eau avec la barre de fer diamètre 10mm/longueur 50cm).
- La qualité de malaxage des briques (nombre de jours de trempage, uniformité de malaxage).
- Le cas échéant, uniformité de la distribution des matières organiques ajoutées au mélange avant le moulage.

Pour des briques de toit, la distance entre les cornières d'appui doit être 15 cm ;
pour des briques de 38cm de longueur, la distance entre les cornières d'appui doit
être 23 cm.

Note :

Toutefois, les paramètres de résistance sont aussi tributaires de l'expérience sur le terrain. Il est largement admis que le comportement des briques en terre est supérieur aux résultats obtenus dans des essais de laboratoire, et que la durée de vie des structures en terre est aussi souvent nettement plus longue par rapport aux indications obtenues dans les essais de laboratoire. C'est pourquoi, dans la majorité des chantiers de taille modeste, le simple test de monter sur une brique est adéquat pour vérifier la qualité des briques pour la construction sans bois.



Photo: D. McCormick

3.1. Généralités

La qualité des briques fabriquées par des méthodes traditionnelles peut varier énormément.

Etant donné que la qualité de la CSB dépend en grand mesure de la qualité des briques employées, il faut impérativement un contrôle de qualité.

3.2. Le contrôle de qualité

Pour la construction de bâtiments en voûtes et coupoles, aucun risque ne doit être pris. La qualité des blocs doit être assurée.

Les principaux critères de qualité d'un bloc d'adobe sont:

- l'aspect des arêtes,
- les dimensions,
- les fissures,
- la résistance mécanique,
- l'érosion à l'eau.

(Les deux premiers critères dépendent de la manière de mouler les blocs, de la quantité d'eau et de la qualité de la terre).

La sélection d'un sol par l'analyse permet au moins de prétendre à des blocs de la qualité demandée. La fiche 3 du *Guide Pratique : Construction Sans Bois* présente une méthode simple pour évaluer la qualité de la terre.

Par contre, une terre de bonne qualité n'est pas suffisante pour garantir la production d'un bloc de bonne qualité.

Il faut surveiller la qualité tout au long de la production et après séchage complet des blocs. Il est indispensable de vérifier que les caractéristiques du sol ne changent pas au fur et à mesure que la carrière s'étend. Cela peut arriver, à titre d'exemple, quand on commence la production des briques à côté d'une mare, et que la production se déplace avec le retrait de la mare.

Par mesure de sécurité, adopter des protocoles d'analyse de contrôle et des tests d'acceptation.

3.3. L'analyse de contrôle

Cette analyse consiste à vérifier la qualité des matériaux utilisés dans la production des blocs d'adobe.

3.3.1. Contrôle du sol

Objectif

Choisir le site de production des briques en fonction de la qualité de la terre.

Méthode

Pratiquer le test du cigare sur la terre malaxée.

Test du cigare :

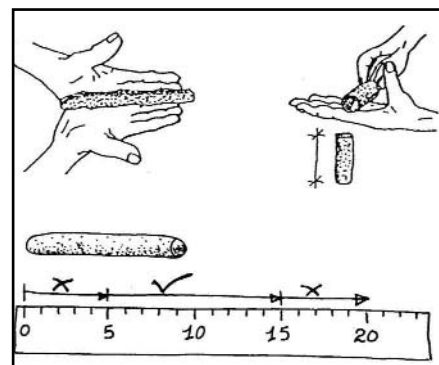
Rouler une boule de terre pour en faire un long cylindre de la largeur du pouce.
Poser ce "cigare" en travers d'une main et le pousser.
Estimer la longueur du morceau qui tombe.
Une longueur entre 5 et 15 cm indique normalement que la terre est de bonne qualité.

1. Observez les bâtiments en terre dans la localité. Sont-ils en bon état?
2. Demandez où se trouve la bonne terre pour bâtir.
3. Prenez plusieurs échantillons, procédez aux tests suivants en cochant les tableaux.

Nom de village/Locales : _____ No d'échantillon : _____ Date : _____

Terre #	Vous avez trois réponses possibles par test: cochez A, B, ou C.		
	A	B	C
Prélevement Observation – regarder l'échantillon	très fin et poussiéreux	bon mélange allant de gros à fin	fin et grumeleux
Toucher à sec Cochez (-/)	pas très rugueux s'affine facilement	rugueux, facile à écraser	difficile à écraser
Toucher humide – froter la terre humide avec le doigt Cochez (-/)	se désagrège rapidement, colle	s'affine rapidement, ne colle pas beaucoup	se désagrège lentement, très collant
Rinçage des mains avec une humidité Cochez (-/)	difficile à rincer	facile à rincer	severmeux, difficile à rincer
Adjoindre le test pour chaque colonne Cochez (-/) le colonne avec le score le plus élevé			
	Arrêter, ne convient pas.	Continuer ...	Continuer ...
Test du cigare Cochez (-/)	moins de 5 cm	plus de 5 cm	de 5 à 15 cm ou plus
	Trop sableux	bon mélange	terre mêlée avec risque de fissures
	bloc fragile	bon bloc	bloc possible teste de compression sur deux briques
Potentiel	non	ou bon	non
Resultats finaux			

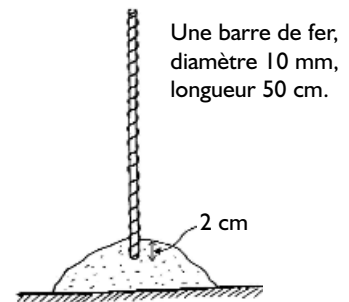
Vérifier vos résultats
tester des briques avec la meilleure terre, et tester-les un moment de plus.



Pour un opérateur expérimenté, cet essai suffit à lui seul pour vérifier la texture (au toucher), la bonne quantité d'eau (par test de pénétration de la barre de fer, 2 cm) et la cohésion (par la bonne longueur de rupture pendant le test du cigare). Remplir la fiche d'analyse des terres (fiche 3, *Guide Pratique : Construction Sans Bois*).

Fréquence

Chaque fois que l'on prépare un nouveau tas. A noter que la terre utilisée pour la production des briques doit être trempée plusieurs jours à l'avance de son utilisation pour éliminer des mottes de terre sèches dans le mélange. Bien malaxer le mélange au moins un jour avant son utilisation. Lors du malaxage, éliminer toutes mottes de terre restant dans le mélange.



Matériel

Une tige de fer à béton (diamètre 10 mm, long. 50 cm) pour vérifier la teneur en eau du mélange.

Quand le résultat du contrôle est négatif

Si, en cours d'extraction, l'analyse de contrôle révèle que le sol du site de production n'est plus aussi bon qu'au départ (texture et cohésion inadaptées pour des blocs d'adobe), il y a deux solutions: changer de site ou en améliorer le sol.

Si l'on décide de continuer d'utiliser le même site (parce qu'il est facile d'accès, proche d'une réserve d'eau ...), on peut améliorer la texture du sol existant en le mélangeant avec d'autres sols amenés d'ailleurs. Ainsi, on ajoutera:

- un sol argileux, si la cohésion est trop faible;
- un sol sableux, si la cohésion est trop forte;
- un sol grossier (gros sable), si la texture est trop fine.

L'analyse de contrôle devrait être enseignée aux briquetiers. Il est indispensable de les rendre responsables de la qualité des briques produites.

3.3.2. Contrôle de l'eau

Qualité d'eau

L'eau doit être propre, et surtout pas salée.

Si elle est boueuse, les modifications du sol malaxé apparaissent à l'essai du cigare.

Quantité d'eau

La quantité d'eau peut être contrôlée avec le test de la barre de fer.

Pour une qualité de la terre déterminée et acceptée pour la production des briques, on peut aussi procéder au test de la boule :

Prendre une boule de terre acceptée et humide. Tenir la boule de terre humide dans la main, le bras parallèle au sol et donc au niveau de l'épaule. Laisser tomber la boule au sol.

- Si elle reste entière la terre est trop sèche.
- Si elle s'éclate en plusieurs petites morceaux, elle est trop humide.
- Si elle se casse en quelques gros morceaux, la teneur en eau est acceptable.



Une teneur en eau trop élevée peut entraîner la fissuration de la brique au séchage et un retrait trop important de la brique, notamment dans les cas des terres fortes en argile.

Veiller à ce que la teneur en eau lors du moulage est correcte.

3.4. Les tests d'acceptation

3.4.1. Accords sur les critères d'acceptation

Au moment de passer la commande des briques auprès d'un briquetier, il est important d'établir non seulement les prix, mais aussi les critères d'acceptation, de manière contractuelle, claire et précise. Le briquetier doit savoir à l'avance que des briques, voire des lots de briques, peuvent être refusés si la qualité n'est pas acceptable.

A ces fins il faut se mettre d'accord avec le briquetier pour définir les limites de qualité à partir desquelles on n'accepte plus le bloc ou la brique.

Pour éviter tout litige, au début des travaux et lors de la commande des briques, on peut pratiquer des tests d'acceptation qui aideront le briquetier à vérifier si ses blocs correspondent bien aux critères de qualité définis d'un commun accord entre lui et le responsable du chantier.

3.4.2. Lieu d'acceptation

Il est important de préciser où aura lieu l'acceptation des briques:

- soit sur le site de production,
- soit sur le chantier du bâtiment.

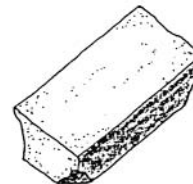
Par économie de transport, il vaut mieux faire ces tests sur le site de production. Cependant, il faut aussi veiller à ce que le transport des briques et leur décharge sur le terrain du chantier n'entraîne pas une perte supplémentaire de briques par la casse.

3.5. Définition des critères de qualité et exécution des tests

3.5.1. Aspect des arêtes

Aucun vide ne sera accepté au niveau des arêtes, plus particulièrement aux 4 angles.

A vérifier dès le démoulage.

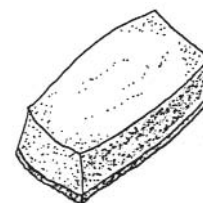


Dessin :A. Douline

3.5.2. Dimensions

Ce sont celles d'un bloc nettoyé aux arêtes vives. Quel que soit le retrait du sol, les longueurs - largeurs - hauteurs dans un ensemble de briques fournies doivent rester constantes. On ne doit ni mélanger ni accepter des briques aux dimensions différentes.

On tolère une marge de 5%, plus particulièrement pour la largeur, qui augmente au milieu du bloc si la terre de moulage est trop humide (affaissement et gonflement latéral).



Dessin :A. Douline

Tout bloc ou brique non nettoyé de son sol support doit être refusé.

Tout bloc ou brique dont la largeur est supérieure à la largeur moyenne de plus de 5% est refusé.

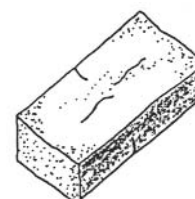
Mesurer après nettoyage (avec la pratique, on reconnaît à l'œil les blocs déformés).

3.5.3. Fissures

On ne tolère qu'une fissure au milieu de la grande face, et inférieure à 5 cm.

Toute autre fissure entraîne le rejet du bloc.

A vérifier en fin de séchage.



Dessin :A. Douline

3.5.4. Résistance mécanique à sec

Evaluer un échantillon de briques par le test simple de monter sur une brique posée sur deux autres briques écartées (voir ci-dessus en 2.4.1. et 2.4.2).

3.5.5. Résistance à l'érosion de l'eau

Objectif:

Retrouver les blocs silteux, impropres à la construction (car peu résistants à l'eau), mais qui pourtant répondent aux quatre autres critères. Ce test n'est nécessaire que dans des zones où l'on suspecte la présence de terres silteuses, qui seront moins résistantes à l'action érosive de l'eau.

Un site de production est choisi pour son bon mélange de sol. Mais, parfois le sol est recouvert d'une poussière silteuse. Si les briquetiers n'enlèvent pas cette couche superficielle et qu'alors ils la mélangent avec le bon sol du dessous, tous les blocs de ce mélange risquent d'être plus silteux: elles présenteront un bel aspect lisse, et une résistance mécanique à sec inférieure mais satisfaisante. A l'analyse de contrôle, un briquetier expérimenté devrait être mis en garde par la texture plus fine, bien que l'essai du cigare soit positif (>5 cm grâce à la cohésion des silts).

Si, en fin de séchage, le briquetier n'accepte pas de rejeter ces blocs visiblement différents, le client utilise le "test d'érosion à l'eau" comme il l'a prévu dans le contrat avec le briquetier.

Méthode: (à réaliser en fin de séchage)

Prendre, au hasard, un bloc du stockage journalier dont la terre semble silteuse. Prendre aussi un bloc considéré par les deux partenaires (chef de chantier et le briquetier) comme satisfaisant.

Leur faire subir, côte à côte, le test d'arrosage:

- Peser les deux blocs (P1).
- Les poser sur deux tubes en fer au-dessus du réservoir d'eau du site de production.
- Verser successivement 10 arrosoirs de 12 litres d'eau, d'une hauteur de 1,10 m.
- Après séchage complet, peser délicatement le reste des blocs (P2) et noter le type d'érosion, notamment les fissures.
- Calculer le pourcentage de perte de matériaux (Pr):

$$Pa = (P1 - P2) / P1 \times 100$$

En principe, la différence est visible à l'œil nu, donc la pesée n'est pas systématique.

En aucun cas un critère d'érosion n'est fixé par un pourcentage de perte car ce pourcentage peut être trop différent d'une localité à une autre. Cependant ce test par comparaison directe reste très persuasif.

Si l'on constate que les briques ont une trop faible résistance à l'eau, il faut :

- re-vérifier la qualité de la terre et si nécessaire changer la source de la terre utilisée.
- Insister que le briquetier enlève la couche de surface sur le site d'extraction et tester de nouveau la qualité de la terre en profondeur. La couche

supérieure de la terre ne doit pas être utilisée pour la fabrication des briques, car elle peut aussi comprendre de la matière organique.

3.6. Comment corriger quand les tests d'acceptation sont négatifs ?

3.6.1. Aspect des arêtes

Il faut améliorer le tassement de la terre dans les coins du moule pendant la phase de remplissage du moule.

3.6.2. Dimensions

Le gonflement latéral par affaissement lors du démoulage est dû à un surplus d'eau dans la terre de moulage.

- Il faut donc mieux contrôler la quantité d'eau.
- Plus la terre est argileuse, plus il faut de l'eau.
- Plus le moule est petit, plus il faut mouiller la terre pour faciliter le démoulage.

L'augmentation de la hauteur est due à une mauvaise préparation de l'aire de séchage: le sol support colle au bloc humide et peut être très pénible à enlever suivant sa composition.

Il faut niveler et sabler superficiellement le sol, juste avant le démoulage.

Pour les cycles suivants, niveler et enlever les morceaux de terre séchée.

3.6.3. Fissures

Un bloc fissuré traduit un taux d'argile trop élevé, visible par l'essai du cigare (15 cm).

Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle.

3.6.4. Résistance mécanique à sec: $M_r = <2,5 \text{ kg/cm}^2$

Il y a quatre raisons majeures pour ce résultat:

- (i) La texture est bonne, mais la structure ne l'est pas (l'argile reste en petits blocs concentrés, elle n'est pas diffusée dans la matière).
 - Il faut augmenter le temps et l'énergie de malaxage.
- (ii) La structure n'est pas assez dense: la face cassée des blocs révèle des cavités d'air.
 - Il faut bien triturer et tasser la terre dans le moule, pour évacuer le maximum d'air.
- (iii) La texture est trop sableuse.
 - Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle. Changer de carrière, ou mélanger la terre avec un sol argileux.
- (iv) La texture est trop silteuse (le "squelette" est trop fin).
 - Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle. Mieux vaut changer de carrière.

3.6.5. Résistance à l'érosion à l'eau

Quand on utilise ce test, le bloc est déjà considéré comme valable car il a obtenu des résultats positifs au niveau des autres tests. Mais on peut toutefois souhaiter

vérifier son comportement face à l'eau.

Si certains blocs s'usent plus vite à l'eau que d'autres, c'est qu'ils ont été faits avec un sol plus silteux.

- Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle:
 - soit la surface de la carrière n'a pas été nettoyée de sa couche superficielle,
 - soit la carrière devient silteuse et il vaut mieux la quitter, si possible.

4.1. Dimensions des briques et des blocs

Les briques de mur sont grandes, et de manière générale ont une longueur entre 38 et 40 centimètres au Sahel. D'autres dimensions sont permises, mais la largeur totale d'un mur doit être suffisante pour accepter les forces exercées par la toiture. Il est possible d'obtenir cette largeur avec une combinaison de briques plus petites, mais cette solution demande au maçon un effort plus important pour obtenir un appareillage adéquat des briques dans chaque rangée, et est donc déconseillée.

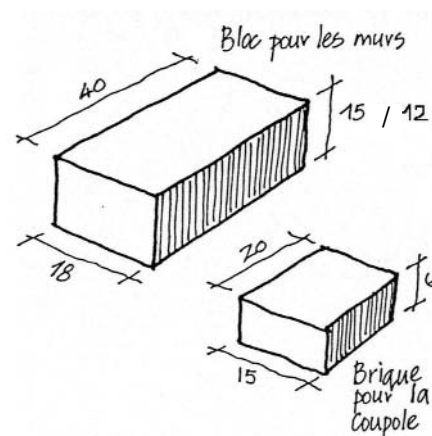
La hauteur du grand bloc peut varier d'un site à un autre mais ne doit jamais varier dans un seul bâtiment. La hauteur du bloc peut être entre 11 et 15 cm. A moins de 11 cm, le bloc ne résistera pas au test de rupture en flexion ; au-delà de 15 cm le bloc sera trop lourd et rendra la mise en œuvre difficile. Des pratiques locales sont à respecter.

La largeur de la brique est établie en fonction de la longueur de la brique. Ensuite, en fonction de la longueur de la brique, on adoptera les dimensions des joints entre les briques et le système d'appareillage. Deux systèmes sont préconisés, chacun avec une taille de brique spécifique ; voir fiches 4 & 5 du *Guide Pratique : La Construction Sans Bois*.

Les briques de toit mesurent 20 x 15 x 6 cm. La taille de ces briques est tributaire de leur utilisation, c'est à dire en fonction de leur poids :

- Le poids de la brique doit être faible pour éviter qu'elle glisse pendant la mise en œuvre du toit ;
- Ses dimensions doivent être adéquates pour contenir les forces exercées par la structure de la voûte ou la coupole.

Des modifications aux dimensions des briques de toit entraîneront une modification dans les pratiques de la mise en œuvre des toits, ce qui n'est pas conseillé. Les dimensions de la brique du toit sont un facteur déterminant de la portée maximale conseillée pour les toitures.



4.2. Qualité et composition de la brique et son utilisation

La composition des briques peut varier. L'ajout de matières organiques (paille, son de riz ou de mil, etc.) peut servir à alléger le poids de la brique et peut être intéressant dans la fabrication des briques de toit car la matière organique représente des vides dans la composition de la brique.

L'ajout de la paille dans une brique peut diminuer l'apparence de fissures dans la brique lors du séchage. Un bon contrôle du teneur en eau peu aussi palier à cet effet.

L'ajout de matières organiques augmente le risque d'attaque par des termites: selon les régions et l'incidence de ce risque cette pratique est donc plus ou moins déconseillée.

Les briques de structure (murs et toits) doivent surtout avoir une bonne résistance à la compression, et le choix de la terre et le processus de fabrication

des briques doivent être surveillées pour vérifier la qualité de ces briques. Les briques de 'protection aux intempéries', et notamment celles de la deuxième couche sur le toit, peuvent avoir des qualités moins résistantes en compression et plus résistantes à l'érosion de l'eau. Il s'ensuit que des terres différentes peuvent être employées pour des briques destinées à des usages différents.

4.3. Choix du sol pour les blocs de toiture et pour les arcs

Une brique de toiture doit être résistante, avec un taux du module de rupture (M_r) un peu plus élevé par rapport aux briques de mur. Une brique de toit avec un M_r de 3 est normalement suffisante, et de préférence on recherchera une valeur de M_r supérieure.

L'utilisation de terres très argileuses provoque des risques de fissuration et une consommation d'eau souvent trop importante. Ainsi, bien que la brique produite puisse être bonne, l'emploi de terres très argileuses est rarement une bonne solution vu le rapport qualité/prix/consommation des matériaux et le risque des pertes à cause de la fissuration.

Les terres avec un bon mélange de sable et d'argile peuvent donner des bons résultats et peuvent aussi économiser la consommation d'eau pendant la fabrication des briques.

4.4. Les blocs de mur

Dans les bâtiments à voûtes et coupes, la base des murs et les fondations doivent reprendre la poussée de la toiture. Il est donc important de réserver les meilleurs blocs pour la partie basse des murs et des fondations, et de rechercher des blocs avec un taux de M_r de 3kg/cm^2 ou plus.

Pour les briques de mur, un taux M_r de 2 à $2,5\text{ kg/cm}^2$ est admis, la valeur inférieure étant réservée pour des murs non porteurs.

Les blocs dont le M_r est inférieur à 2kg/cm^2 ne doivent être utilisés que pour des petits murs de clôture.

Lorsque l'on remplace la toiture-terrasse d'un bâtiment existant par une toiture en coupole ou en voûte, il convient de vérifier avec une extrême précaution la qualité des briques dans les murs et les fondations existants, et des échantillons de terre de ces briques doivent être testés chaque fois.

4.5. Temps minimum de séchage

Par temps normal il faut compter au moins 4 jours de séchage pour les grands blocs des murs.

Il faut compter au moins 3 jours de séchage pour les petits blocs de toit ($20 \times 15 \times 6\text{ cm}$).

5.1. Rôle du mortier de pose

Le mortier sert à coller les blocs entre eux pour bâtir les murs et les toits. Mais une fois sec, il doit aussi rendre la maçonnerie en quelque sorte "monolithique".

Quand une force extérieure s'abat sur un mur, celui-ci peut mieux réagir si le mortier retransmet bien les contraintes à l'ensemble des blocs.

La résistance du mur dépend en grande partie de la qualité du mortier. Un mauvais bourrage des joints verticaux diminue de 20% à 50% la résistance à la compression d'un mur et supprime toute résistance au cisaillement.

5.2. Caractéristiques d'un mortier de terre

Les règles fondamentales de la maçonnerie s'appliquent aussi pour le matériau terre - voir *Guide Pratique : La Construction Sans Bois*.

Résistance

Le mortier de terre doit être de la même résistance que les blocs.

Si le mortier est plus résistant:

- Les blocs se creusent entre les joints. L'eau stagne sur les bords des joints horizontaux, augmentant l'usure des blocs.

Si le mortier est moins résistant:

- Les joints se creusent, laissant la face extérieure des blocs se détériorer. Le mur perd vite en épaisseur.

Si le mortier est de la même résistance:

- L'action destructrice de l'eau n'est concentrée en aucune zone. La surface du mur s'use uniformément.

5.3. Retrait

Il faut limiter le retrait du mortier.

La largeur des joints est normalement entre 1 et 2 cm entre les briques de mur. La largeur des joints doit être déterminée en fonction des dimensions des briques de mur, pour permettre d'obtenir un appareillage de briques correcte.

La consistance ne doit pas être trop liquide (une mauvaise pratique malheureusement assez répandue pour faciliter le bourrage des joints verticaux).

La texture doit être légèrement plus sableuse que celle des blocs. Si l'on augmente le taux d'argile pour améliorer l'adhésion, tous les joints seront fissurés après séchage.

5.4. Mortier de terre sur voûtes et coupoles

Il est conseillé d'utiliser un mortier dont la longueur de rupture (voir analyse de terres) indiqué par le test du cigare donne une longueur proche à 12 cm. Un mortier plus argileux produira des fissures dans les joints qui peut contribuer à l'infiltration ultérieure.

Un mortier constitué d'une terre avec un mélange de sable et d'argile est moins collant qu'un mortier fort en argile, et donc les maçons doivent plaquer les blocs en place et non pas les taper trop fort. On améliore l'accrochage en utilisant des blocs dont la face a été striée avec les doigts lors de leur moulage.

6.1. Généralités

Les murs des bâtiments peuvent être recouverts d'enduits en terre, en terre stabilisée à la bitume ou à la chaux, ou en semi-dur (Voir fiche 35 du *Guide Pratique : La Construction Sans Bois*). Divers types d'enduit en terre sont utilisés, et les pratiques locales sont à respecter.

Si un enduit en semi-dur est appliqué autour des ouvertures, cet enduit doit être prolongé en bas de l'ouverture jusqu'au sol pour éviter l'érosion de la surface à cause d'un écoulement rapide de l'eau sur la fenêtre.

Les toitures peuvent être couvertes uniquement d'enduits à base de terre. **Il ne faut jamais utiliser un enduit en ciment**, ce qui provoquerait des fissures et des infiltrations.

Les enduits doivent être appliqués tôt dans la journée, et de préférence quand la façade en question n'est pas exposée au soleil.

6.2. L'accrochage de l'enduit est indispensable

On peut le réaliser en étendant une fine couche de terre, très argileuse et liquide, qui colle bien au support et reste très irrégulière pour accrocher les deux autres couches d'enduit (gobets d'accrochage).

On doit toujours préparer le support:

- balayage du mur (fait ressortir le "squelette" sableux et graveleux qui collera à l'enduit);
- grattage des joints sur une profondeur de 1 à 2cm;
- piquetage du mur (augmente les aspérités);
- incrustation de cailloux tranchants et d'éclats de poteries sur les murs, mais pas sur les toitures car cela pourrait provoquer des infiltrations.

L'enduit vieillira mieux s'il a été arrosé dans l'après-midi du jour d'application.

Une fois appliqué, les fissures sont une des causes majeures de dégradations. Elles proviennent:

- Du taux d'argile élevé dans la terre. Mieux vaut un enduit pas trop argileux pour diminuer la fissuration. Moins résistant aux chocs, il s'use uniformément.
- Des conditions climatiques du jour de pose. Il faut éviter les grosses chaleurs et compenser l'évaporation par l'aspersion d'eau.
- De l'épaisseur de l'enduit. Plus la couche est épaisse, plus la fissure est ouverte en surface. Des grandes plaques d'enduit, lourdes, se trouvent désolidarisées. En tombant, elles arrachent un peu du support.

Il ne faut pas plus de 1,5 cm d'épaisseur. Et il devient impératif de supprimer les graviers.

En plusieurs couches, l'enduit est plus étanche.

7.1. Généralités

La structure d'un bâtiment en CSB doit tenir en compte que la terre, et ainsi les briques de terre, ne sont essentiellement forte qu'en compression. Si les forces dans la structure ne restent pas dans la largeur des murs et des toits, l'élément en question, voire l'ensemble du bâtiment, va s'écrouler.

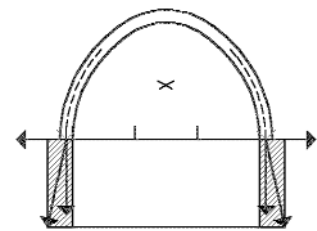
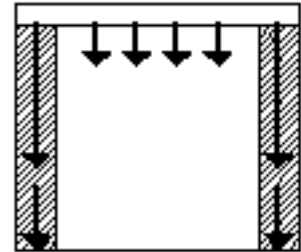
Il est surtout important que les forces exercées par les toits et ensuite les forces qui descendent dans les murs, arrivent au sol et aux fondations sans qu'ils dépassent la largeur des murs d'appui.

Les structures en maçonnerie avec des toitures plates en terrasse exercent surtout une force verticale qui s'appelle une charge, qui descend droit vers le sol. Il peut y avoir une petite force vers l'extérieur si le toit fléchit. Toutefois, pour des bâtiments avec toiture plate la simplicité de la structure et l'orientation des forces vers le sol sont telles que les murs ne sont pas soumis à des contraintes de structure très importantes. Il s'ensuit que la qualité des briques et la qualité de la maçonnerie peuvent être assez médiocre sans que les murs s'effondrent.

L'utilisation de toitures voûtées - de pièces couvertes par des coupoles et/ou des voûtes - et d'arc présente une situation bien différente. (A noter que le terme toitures voûtées comprend les toits en voûte et en coupole, la coupole étant une forme de voûte circulaire.)

La voûte exerce non seulement des forces allant vers le sol, mais aussi des forces importantes allant vers l'extérieur, qui s'appelle des forces obliques, qui résultent d'une charge et d'une poussée latérale. Plus les forces obliques tendent vers la verticale, moins sont les effets d'écartement de la structure.

Si on ne prend pas des mesures pour maîtriser et contrôler ces forces obliques, la poussée de la voûte renversera les murs d'appui et le bâtiment et son toit s'écrouleront. Ce problème est commun à tous les types de bâtiments avec des toitures en voûte, quels que soient les matériaux employés. Cependant, l'utilisation de la terre, avec sa faible résistance à la traction, nécessite une très bonne maîtrise des forces dans la structure, pour assurer que les forces sont conduites vers le sol à l'intérieur de l'épaisseur de la structure.



7.2. Les forces statiques et dynamiques

Une structure est soumise à des forces statiques, et des forces dynamiques, notamment celle du vent, mais aussi, à titre d'exemple, à la charge dynamique des personnes qui marchent sur le toit. Ecartons pour l'instant les murs de clôtures, qui peuvent avoir une stabilité insuffisante pour résister aux forces dynamiques latérales exercées par un vent fort (et pour cette raison, on limite la hauteur des murs n'ayant pas de contreforts ou de points de renforcement périodiques pour donner de la résistance à cette force). Ici, on est concerné par les forces statiques exercées par le poids propre des murs, et par des voûtes, les acrotères et le remblayage sur le toit. On est aussi concerné par les forces dynamiques pendant la période de construction (quand les gens travaillent sur la structure, et quand certains éléments, comme les arcs et les toitures, n'ont pas encore été consolidés par la charge supplémentaire apportée par le remblayage et/ou de la maçonnerie posée sur un arc.

7.3. Les forces exercées par les toitures voûtées

Dans la structure soumise à une force oblique, on désigne:

- la poussée latérale **P**,
- la charge verticale **C**,

- et la ligne de force résultante R .

R doit rester à l'intérieur de l'épaisseur E du mur d'appui.

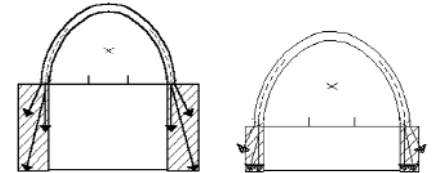
7.4. Maîtrise des forces

Plusieurs actions permettent de maîtriser les forces latérales exercées sur le mur d'appui par la voûte.

On trouve dans la majorité des cas que la maîtrise des forces dans la CSB est acquise par une combinaison de solutions. (Rappel: le mot "voûte" signifie à la fois les voûtes - rectangulaires - et les coupoles - formes de voûtes rondes)

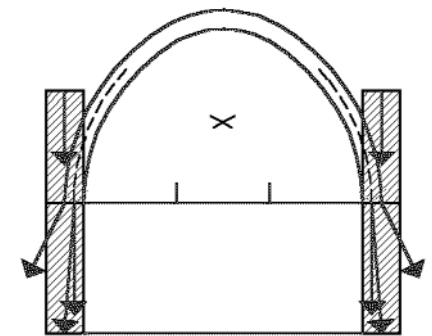
7.4.1. Absorber les forces d'écartement avec des murs plus épais

La méthode la plus simple d'absorber les forces latérales d'écartement est d'épaissir le mur d'appui. Ceci permet de garder les lignes de force R dans l'épaisseur du mur d'appui. Par contre, augmenter l'épaisseur des murs ajoutera au coût du bâtiment (voir aussi "Alcôves" ci-dessous).



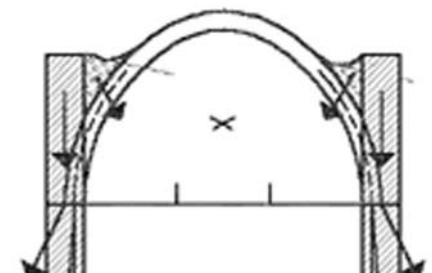
7.4.2. Augmenter la charge verticale

Augmenter la charge par l'ajout de la maçonnerie au-dessus de la ligne de la force oblique exercée par la voûte a pour effet de contenir la force oblique et de tourner la ligne de la force résultante R vers l'intérieur. On constate qu'un rôle important de l'acrotère sur les murs extérieurs de bâtiments CSB est de contenir la force oblique. L'acrotère est donc un élément avec des fonctions diverses et importantes, et non seulement un élément décoratif.



7.4.3. Charger sur le rein de la voûte

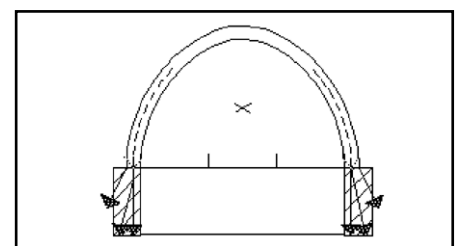
Ceci consiste en créer un poids supplémentaire qui, appuyant sur la partie basse de la voûte engendre une force qui dévie à son tour la force oblique de la voûte et ré-équilibre ainsi l'ensemble des forces. Dans la CSB, l'ajout du remblayage et parfois la construction de toitures secondaires remplissent cette fonction. On constate que le remblai est ainsi non seulement un élément de protection du bâtiment contre la pluie, mais aussi un élément de la structure.



7.4.4. Diminuer la hauteur du point de naissance

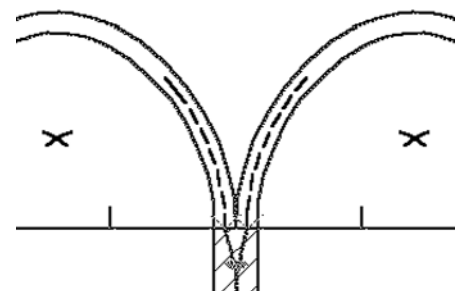
Si la force résultante R tend vers l'extérieur de l'épaisseur d'un mur, au lieu d'augmenter son épaisseur pour contenir R , on peut aussi baisser la Hauteur du Point de Naissance (Hpn).

C'est ainsi que les tableaux de paramètres de la Hpn fourni aux maçons indiquent le rapport entre la portée de la voûte, l'épaisseur du mur d'appui, et la hauteur du point de naissance (Hpn). (Plus la portée est grande, plus la force oblique est importante). Baisser le Hpn est donc une solution efficace et économique pour la maîtrise des forces dans la structure.



7.4.5. Introduire un élément de contrebutement des forces obliques

La construction de deux toits côte à côte permet de contrebuter les forces obliques et de les transformer en forces verticales. Il faut faire attention dans la phase de la mise en œuvre que les deux toits sont construits en même temps et en parallèle. Sinon, l'effet de contrebutement ne sera pas présent, et on court le risque que le toit écartera le mur d'appui et s'écroulera. Sur des murs extérieurs, on peut aussi construire des contreforts, pour augmenter à de petits intervalles l'épaisseur du mur et sa résistance aux forces obliques.

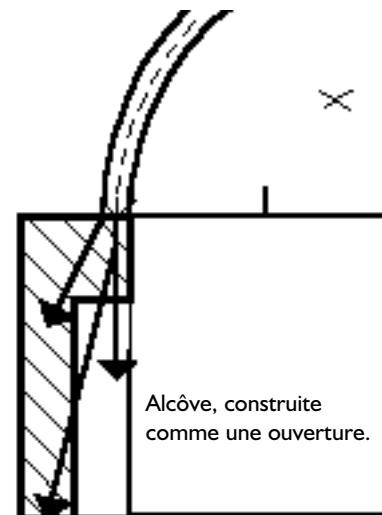


7.4.6. Diminuer le volume des murs épais par l'emploi d'alcôves

Les murs épais (voir ci-dessus), sont parfois nécessaires pour des raisons de fonction de la pièce. On peut diminuer le volume de la maçonnerie par l'introduction d'alcôves dans le mur. Il est possible de considérer le mur d'appui comme une série de colonnes épaisses couvertes d'arcs, sur lesquels reposent la voûte, les acrotères et le remblayage. L'alcôve est donc un élément utile dans la conception de la structure. Elle peut être dimensionnée pour accepter des objets (livres, armoire...), voire même être dimensionnée pour recevoir un matelas dans le cas des murs très épais.

Lors de la conception de la structure d'un bâtiment en CSB, on utilise très rarement qu'un seul moyen pour maîtriser des forces, mais au contraire, on fait appel à plusieurs options pour trouver la solution adéquate pour la sécurité de la structure, pour remplir les besoins fonctionnels du bâtiment et pour satisfaire aux contraintes budgétaires.

Comprendre la maîtrise des forces est fondamental à la réussite de la conception et la construction particulièrement en ce qui concerne la CSB. Cette compréhension sera traduite à son tour par les choix de la forme du toit, l'emplacement des ouvertures, et la recherche des solutions adaptées à la fonction du bâtiment. L'ensemble de ces éléments doit être en harmonie.



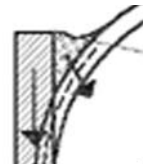
8.1. Généralités

La construction des toitures en briques de terre crue nécessite que la structure travaille en compression et que les forces obliques soient contenues dans l'épaisseur de la structure.

Pour déterminer la forme idéale, on se réfère à la forme d'une chaînette. La forme de la **chaînette** et celle prise par une chaîne qui est suspendu à ses deux bouts. Etant donné que chaque composant de la chaîne est d'un poids identique, la forme de la chaînette est une forme de traction pure. La courbe qui en résulte s'appelle un arc caténaire.

En inversant cette courbe, on obtient une courbe analogue qui est une forme qui travaille en compression pure. Cette forme a été utilisée par des bâtisseurs d'ancienne Egypte pour la construction des voûtes, mais - à titre d'exemple - elle a aussi inspiré les formes adoptées par le célèbre architecte espagnole du 20ème siècle, Antonio Gaudi.

Cependant, la forme pure de l'arc caténaire ne prend pas en compte que la toiture voûtée sera soumise à des charges supplémentaires sur les côtés : la charge exercée par l'acrotère et la charge exercée par le remblayage, tous deux étant des éléments de maîtrise de la structure.



Il faut donc légèrement modifier la courbe de la caténaire, pour compenser ces forces supplémentaires. Il faut imaginer avoir ajouté des poids supplémentaires aux bords de la chaînette, qui serait ainsi un peu déformée.

La CSB utilise donc une forme de caténaire modifiée.

8.2. Tracé de la forme voûtée

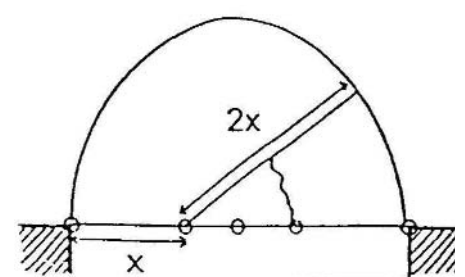
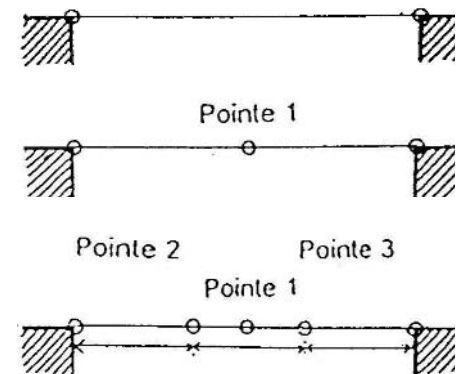
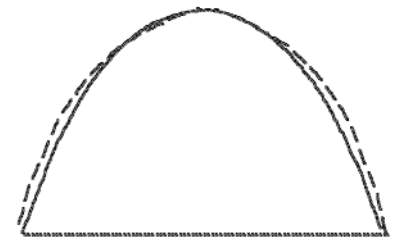
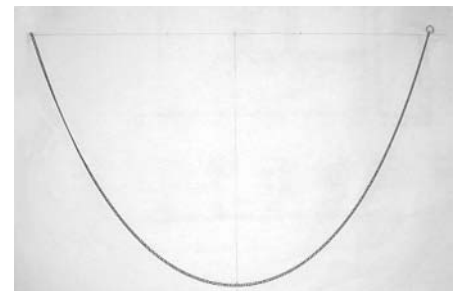
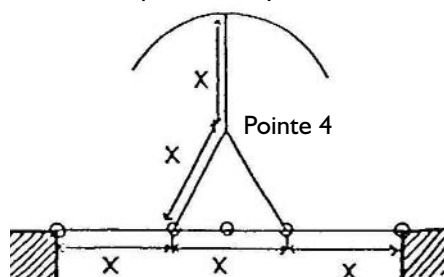
La voûte linéaire est construite sans coffrage. (D'autres profils de voûte existent, mais on a recours à un coffrage pour leur réalisation.)

La forme de la caténaire modifiée pour la voûte peut être tracée sur papier et sur le chantier avec suffisamment de précision par un système simple :

- Il s'agit de diviser la portée de la voûte en trois au niveau de la hauteur du point de naissance. Enfoncer les points 2 et 3.
- A partir des pointes 2 et 3 situées aux tiers de la portée, prendre un tiers de la portée comme rayon d'un cercle, pour tracer un troisième point 4 et pour former un triangle isocèle. Enfoncer la pointe 4.

Tracer la forme de la voûte :

- Des pointes 2 et 3 tracer des arcs avec un rayon de 2 tiers de la portée.
- Pour la partie haute de la voûte, tracer un arc à partir de la pointe 4 avec un rayon d'un tiers de la portée.
- Répéter l'exercice en ajoutant l'équivalent de 20 cm pour l'épaisseur de la brique de toit (à l'échelle correcte), pour tracer la forme extérieure de la voûte (sans remblai ni deuxième couche).



La voûte qui en résulte à un rapport entre la portée de la voûte et sa hauteur maximale (flèche) de 62%.

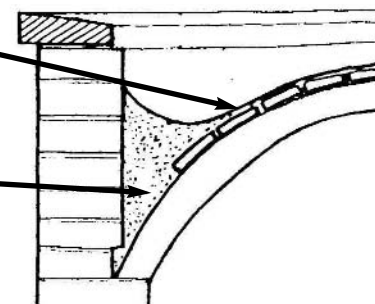
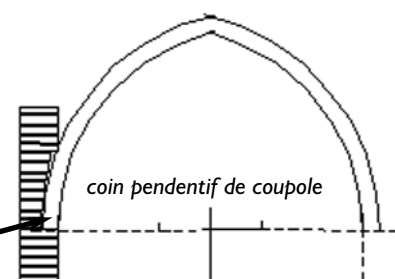
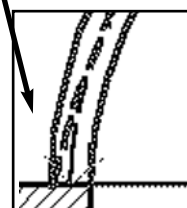
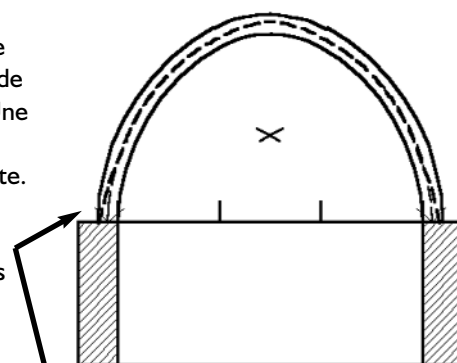
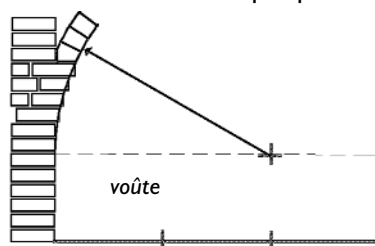
Sur cette courbe de voûte, on surimpose la forme de la caténaire modifiée. Elle suit la forme de la voûte sur presque toute sa courbe. La forme de la voûte doit être telle que la fibre moyenne reste aussi proche que possible de la ligne de force de la voûte, qui est représentée par la courbe de la caténaire modifiée. Une excentricité de $1/6$ de l'épaisseur de la voûte est tolérée de chaque côté de la fibre moyenne : la ligne de force doit rester dans le $1/3$ (tiers) central de la voûte.

Cependant, on constate que la ligne de force a tendance à s'écarter de la fibre moyenne dans la partie basse de la voûte. Il est donc nécessaire de prendre des mesures supplémentaires pour contenir ces forces, sinon, pendant la phase de construction, le toit risque de s'éclater.

Pour éliminer ce risque il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur de la forme voûtée dans sa partie basse, pour permettre à la ligne des forces de rester dans le $1/3$ central de la structure.

L'augmentation de l'épaisseur effectif de la forme voûtée est accomplie par l'emploi de quatre solutions :

1. Lors de la construction de la voûte, la partie basse de la voûte est intégrée au mur d'appui. La zone de fragilité en phase de construction fait partie intégrante de la forme de la voûte à cet endroit.
2. Dans le cas de la construction de la coupole, la partie basse de la coupole, qui est "calé" dans le pendentif (voir définition 9.3.1.), est construite dans le coin du mur qui a été taillé justement pour recevoir les briques de pendentif, et pour les contenir.
3. On ajoute dès le début les briques de la deuxième couche (voir ci-contre) dans la partie basse de la voûte ou de la coupole, pour augmenter l'épaisseur - et on constate que la deuxième couche est à la fois un élément de structure et de protection.
4. On ajoute du remblai entre l'acrotère et la toiture voûtée.



Ces quatre actions permettent de contenir les forces de la voûte.

8.3. Consolidation de la structure

Dans la CSB, on distingue deux conditions différentes à tenir en compte.

8.3.1. Condition 1 : Pendant la mise en œuvre

Les éléments de consolidation ne sont pas tous présents (remblayage total, l'acrotère, la deuxième couche complète, les rangées supplémentaires de briques au-dessus d'un arc). Pendant la mise en œuvre, la structure présentera des risques d'instabilité. A titre d'exemple, un arc sans charge peut se déformer si l'on y impose une charge déséquilibrante. Il n'est solide qu'une fois des rangées de briques posées dessus. C'est pourquoi il ne faut jamais décoffrer un arc avant que les rangées supérieures soient en place.

La voûte est fragile dans sa partie basse si l'on ne respecte pas les mesures indiquées ci-dessus.

De manière générale il faut éviter d'imposer des charges déséquilibrantes sur les

structures avant la consolidation.

8.3.1. Condition 2 : Le bâtiment fini

Une fois fini, tous les éléments de consolidation sont en place (acrotère, remblai, deuxième couche). Les toitures et les arcs sont chargés par divers éléments, l'épaisseur effective de la structure des toits est devenue plus importante et donc les marges de sécurité dans la structure sont nettement plus larges.

En effet, l'enjeu est de charger la structure et de transformer les forces obliques en forces verticales ou charges.

L'architecte et le technicien qui procédera à la conception du bâtiment en CSB doit tenir compte de ces deux conditions différentes, et doit s'assurer que le (les) maçon(s) peut (peuvent) gérer l'avancement du chantier de façon à ce que les risques d'instabilité temporaire soient limités au strict minimum. Ceci demande aussi que lors de la conception du bâtiment on garde en vue une bonne appréciation du processus de la mise en œuvre de la structure.

8.4. Limites structurelles

Les tableaux des paramètres de la Hauteur point de naissance (la fiche 16 du *Guide Pratique : Construction sans Bois*), indiquent le rapport entre la portée des pièces, la hauteur du point de naissance et l'épaisseur de mur d'appui. Elle s'arrête à 4,5 mètres pour la voûte, et ceci par mesure de sécurité.

Nous avons vu que la ligne de force dans la toiture voûtée doit rester dans **le tiers central** de la voûte. La CSB utilise des briques de toit qui mesure 20 x 15 x 6 cm, ce qui donne une brique qui est petite, et qui ne pèse pas trop.

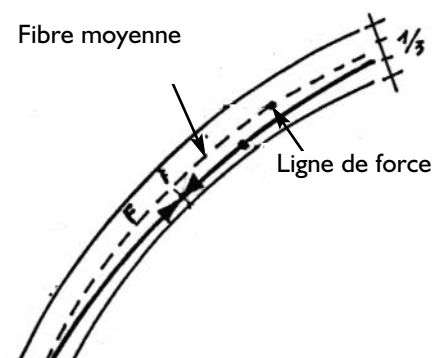
Une brique de dimensions plus grandes pèsera davantage et sera plus difficile à maintenir en place lors de la construction de la voûte ou de la coupole. Pour une brique plus grande, il faut nécessairement l'alléger par l'ajout de matière organique, comme la paille. Ces matières organiques augmentent le risque d'attaque par des termites.

Sur des petites voûtes (jusqu'à 2,5 mètres de portée), on peut poser la brique avec son côté le plus long aligné avec la voûte - la voûte aura une épaisseur de 15 cm en phase de construction, mais la faible portée permet de garder la ligne des forces dans le tiers central. Pour des voûtes avec une portée entre 2,5 et 4,5 mètres, les briques du toit doivent être posées dans le sens inverse, pour donner une épaisseur de voûte/coupole de 20 cm, ce qui permet ainsi d'augmenter la marge de sécurité et de garder la ligne des forces dans le tiers central.

Au-delà de 4,5 mètres de portée, l'épaisseur de la voûte reste toujours à 20 cm pendant la phase de construction, mais la marge de sécurité est réduite, car il est plus difficile de garder la ligne des forces dans le tiers central. Les maçons doivent avoir une très bonne maîtrise de la mise en œuvre et doivent respecter soigneusement l'alignement et la courbe de la structure indiquées par les guides ficelles et par le guide mobile.

On doit distinguer entre des maçons très expérimentés, qui sont capables de construire les toitures avec beaucoup de précision, et des maçons moins expérimentés, qui doivent par prudence se limiter à une portée inférieure.

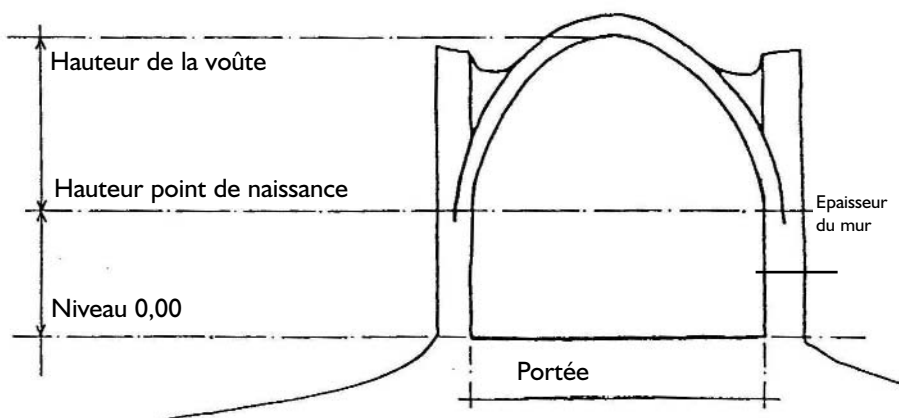
Il faut aussi éviter des longueurs de mur importantes sans qu'un contrefort ou un mur intérimaire apportent une stabilité supplémentaire au mur. Plus la Hpn est haute, plus il faut ajouter des points de renforcement supplémentaires.



8.5. Emploi des paramètres

Ces chiffres sont indicatifs et ne peuvent pas être appliqués systématiquement. Les dimensions ne doivent en aucun cas être dépassées, et par mesure de sécurité on doit toujours diminuer au minimum la Hpn.

La variation dans la qualité des terres est telle qu'une Hpn inférieure peut éventuellement ne pas être suffisante et il en est de



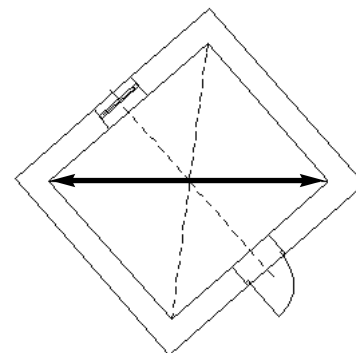
Portée des voûtes	Portée en mètres	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,0	5,50	6,00
Epaisseur du mur d'appui										
0,30	Hpn max >	1,50	1,23	1,05	0,90	0,85	0,76	Non	Non	Non
0,35	Hpn max >	1,75	1,44	1,23	1,05	0,99	0,88	Non	Non	Non
0,40	Hpn max >	2,00	1,64	1,40	1,20	1,13	1,01	Non	Non	Non
0,60	Hpn max >	3,00	2,46	2,10	1,80	1,70	1,52	Non	Non	Non
0,80	Hpn max >	4,00	3,28	2,80	2,40	2,26	2,02	Non	Non	Non

Portée des coupoles	Portée (diagonale) en mètres	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,0	5,50	6,00
Epaisseur du mur d'appui										
0,30	Hpn max >	1,50	1,23	1,05	0,90	0,85	0,76	0,67	0,45	0,35
0,35	Hpn max >	1,75	1,44	1,23	1,05	0,99	0,88	0,78	0,53	0,40
0,40	Hpn max >	2,00	1,64	1,40	1,20	1,13	1,01	0,90	0,60	0,46
0,60	Hpn max >	3,00	2,46	2,10	1,80	1,70	1,52	1,34	0,90	0,69
0,80	Hpn max >	4,00	3,28	2,80	2,40	2,26	2,02	1,79	1,20	0,92

la responsabilité du maître d'œuvre du projet et des maçons de vérifier la qualité de la terre et la qualité des briques. Si l'utilisation de la pièce le permet, diminuer toujours la Hpn.

Les coupoles, grâce à la double courbature de la structure, ont une marge de sécurité supérieure par rapport à la voûte : chaque rangée horizontale de briques dans la coupole constitue un anneau de compression, et on est donc moins dépendant du transfert des forces dans le sens de la courbe de la coupole vue en coupe. On peut donc se permettre de construire des coupoles avec une portée plus importante par rapport à une voûte. Voir aussi "La forme de la coupole" (section 9 ci-dessous).

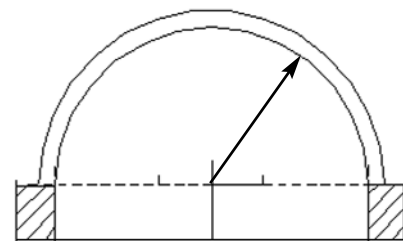
Pour la portée de la coupole, en ce qui concerne la portée d'une coupole sur une base rectangulaire il faut prendre la dimension de la diagonale de la pièce.



9.1. Généralités

La coupole simple est hémisphérique. Elle est tracée à partir d'un seul point central, à l'aide d'un fil de fer ou d'une ficelle attaché à un poteau central positionné au niveau correspondant à la Hpn. Les briques dans une coupole hémisphérique sont alignées sur un point central.

Les techniques de la mise en œuvre de la CSB peuvent être employées pour la construction de coupoles hémisphériques. Par contre, par sa forme, la coupole hémisphérique présente des inconvénients : la structure n'est que partiellement en compression dans son profil vertical, et à partir de l'angle de $51^{\circ}49'$ les forces agissent comme des forces de poussées vers l'extérieur qui font que la partie basse de la structure devient en traction. Il faut contenir ces forces par le renforcement de la partie basse de la coupole, par exemple, par un renforcement de la structure (la rendre plus épaisse...).



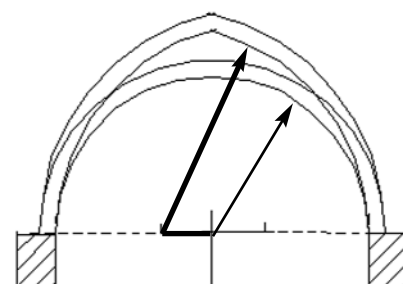
Coupole hémisphérique

9.2. La coupole ogivale

Pour la CSB, on a cherché à réduire les forces de poussée vers l'extérieur. Pour ce faire, et grâce à l'introduction du guide mobile, on peut déplacer l'origine du rayon sur laquelle la courbe verticale de la coupole se base, et à laquelle les briques sont alignées. L'origine du rayon est donc en déplacement par rapport au centre de la coupole, et représente un point en rotation autour du point central de la coupole. Le déplacement est normalement établi à une valeur de $1/3$ de rayon de la coupole. On appelle cette coupole une coupole ogivale.

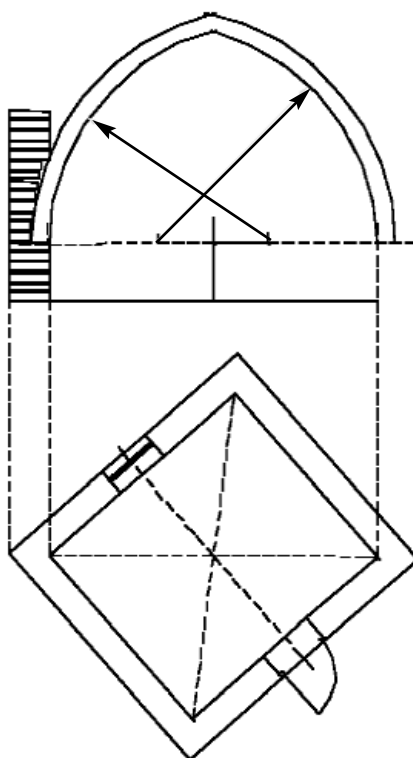
Le résultat : par rapport à la coupole hémisphérique, à partir d'une Hpn identique, la hauteur totale de la coupole est plus élevée, mais la forme de la coupole approche la forme de la voûte et de la caténaire modifiée : une forme qui permet de diminuer les poussées vers l'extérieur.

Les coupoles avec un rayon en déplacement sont donc plus solides. Du fait de sa hauteur plus importante par rapport à la hauteur de la coupole hémisphérique, pour une hauteur totale identique on peut effectivement diminuer la Hpn de la coupole ogivale, ce qui sert aussi à consolider la structure et à réduire les coûts.



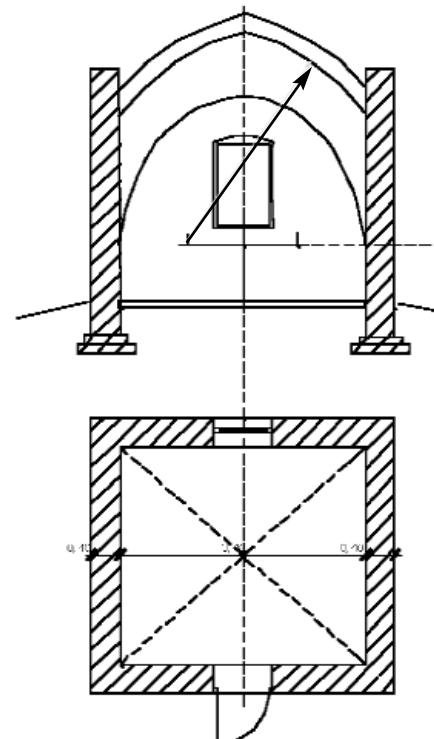
Coupole ogivale comparée à la coupole hémisphérique

Coupe sur le diagonal



Plan

Coupe de la coupole ogivale



Plan

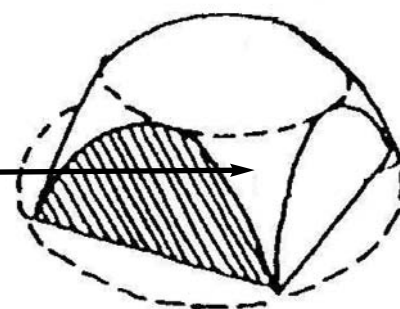
9.3. Distribution des forces

Les coupoles sur base circulaire transmettent leur forces au sol de manière égale tout autour de la structure. Les coupoles sur base rectangulaire transmettent leurs forces vers les quatre coins (ou six, dans le cas d'un hexagone...).

9.3.1. Pendentifs

La base de la coupole étant circulaire, pour la poser sur une base rectangulaire, il convient d'adopter une des deux solutions suivantes :

1. Utiliser des pendentifs dans les coins, permettant au plan circulaire de la coupole de s'articuler directement sur un plan rectangulaire. Les pendentifs sont les triangles qui restent si l'on "tranche" un hémisphère sur ses quatre côtés.
2. On peut construire des trompes - quatre arcs dans les angles du rectangulaire, qui transforment le rectangulaire en octogone. Cette solution ne résout pas bien le problème des poussées extérieures exercées dans la partie basse de la coupole.



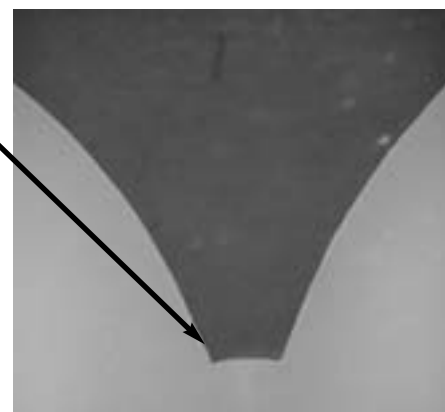
Pour la CSB on conseille l'utilisation des pendentifs.

Des petits arcs peuvent être construits dans la partie basse des pendentifs, mais il ne s'agit pas de vraies trompes.

9.3.2. La coupole sur pendentifs

La coupole sur pendentifs peut être considérée comme étant croisée de deux voûtes. La question de stabilité se ramène à un calcul de voûte avec la même méthode graphique.

Les forces dans la coupole sont transmises vers les quatre coins et c'est par les pendentifs que le poids de la coupole est transmis jusqu'au sol. Ceci souligne l'importance de construire les murs dans les coins avant la construction des pendentifs, et de s'assurer que l'appareillage de la maçonnerie de chaque coin est bien respectée. Comme pour la voûte, plus la Hpn de la coupole est basse, plus la coupole est stable.



Les façades ne contribuent pas beaucoup à la stabilité de la coupole. Par contre, la construction d'une coupole sur des murs percés par des grands arcs souligne que ce sont les pendentifs qui reçoivent chacun environ un quart des forces et du poids de la structure. Il faut prévoir des fondations adéquates capables de reprendre ces charges.

10.1. Généralités

Le rôle des fondations est de transmettre au sol les charges de l'ouvrage, y compris le poids propre du bâtiment et les surcharges éventuelles.

Pour la construction sans bois, on a besoin de construire des fondations allant jusqu'au bon sol. Par le 'bon sol', on entend un sol qui ne peut pas être excavé sans l'utilisation d'une barre à mines ou une pioche.

10.2. Le sol

Le sol doit être compact, et il doit être difficile d'enfoncer un piquet de fer de 0.5 cm plus de 15 cm dans le sol.

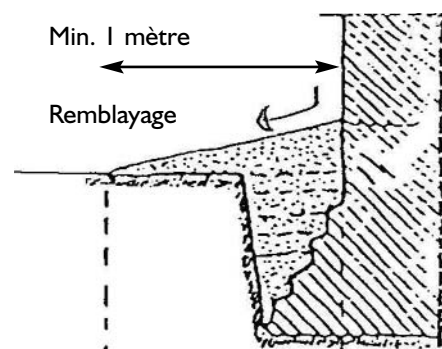
Les fondations pour la CSB peuvent être superficielles, c'est à dire qu'on n'a pas besoin d'aller en grande profondeur. Cependant, dans la majorité des cas il faut descendre au moins 45 cms et/ou au bon sol. Les couches du sol proche à la surface sont à enlever.

Les fondations seront en forme de semelles filantes sous des murs continues, ou des semelles isolées dans le cas de la construction sur des piliers isolés.

10.3. Terres humides

Il faut en tous les cas éviter de construire sur un sol qui peut par saison devenir humide, car la résistance du sol sera fortement réduite avec risque de déstabilisation du bâtiment.

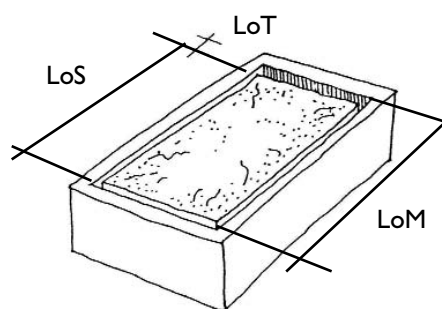
Il faut toujours protéger les fondations de l'humidité. A ces fins il faut apporter des couches de remblayage compacté en profondeur devant la partie extérieure des fondations, et ce remblayage doit monter au moins 30 cm au-dessus du niveau du sol et sur une distance de jusqu'à un mètre des murs.



10.4. Retrait de la terre

Les terres qui contiennent beaucoup d'argile sont à éviter si possible. Il faut surtout éviter des sites où il y a des signes de fissuration importante dans le sol (des sols gonflants) qui indiquent que le sol est instable et susceptible de gonfler en présence d'humidité. En cas de doute il faut augmenter la largeur du remblayage à 2 mètres, et si possible couvrir le remblayage avec une terrasse en béton. Pour évaluer le risque d'un retrait important dans un sol, et donc le risque d'instabilité, on peut mesurer la différence en longueur d'un échantillon de terre entre son état humide (avec la teneur en eau correcte) et son état sec.

- Mesurer la longueur du moule rempli de la terre humide (Longueur moule = LoM)
- Laisser la terre sécher pendant trois jours au soleil.
- Mesurer avec précision la longueur de l'échantillon de terre dans le moule. (Longueur échantillon sec = LoS)
- Soustraire cette longueur (LoS) de la longueur du moule (LoM) pour obtenir la longueur du retrait (LoT).
- Diviser la longueur du retrait par la longueur total du moule, pour obtenir le pourcentage du retrait. ($LoT/LoM = \% \text{ retrait}$)



Si le retrait est de plus de 0,04%, il faut essayer de trouver un autre terrain. Quand le choix d'un autre terrain n'est pas possible, éviter de construire des bâtiments d'une superficie importante. Construisez plutôt plusieurs petits bâtiments de 2 pièces, afin d'éviter l'apparition de fissures causées par un tassement inégal du sol sous des parties différentes du bâtiment.

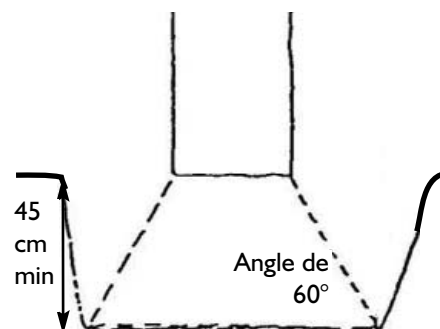
10.5. Fondations en briques de terre

Sous réserve de pouvoir assurer une bonne évacuation des eaux de surface et une bonne protection des fondations, les fondations des bâtiments en CSB peuvent être construites avec des blocs de terre de bonne qualité (avec une bonne résistance à la compression = ou $> 25 \text{ cm/m}^2$). Les fondations en béton ou en pierre sont facultatives.

10.6. Charge et forme des fondations

La charge appliquée sur les fondations ne descend pas droit dans le sol. Il y a un effet de distribution des charges dans le sol, dans une proportion de 1 : 2 à 1 : 3, soit un angle de 60 ou 70°.

Il s'ensuit que les fondations doivent être progressivement plus large par rapport à la largeur du mur. Sur une profondeur minimum de 45cm on peut donc calculer une largeur minimum des fondations. En cas de doute, augmenter la largeur des fondations. Plus le Hpn du toit est haut, plus il faut augmenter la largeur des fondations.



10.7. Appareillage et pose de la maçonnerie

Dans le cas des fondations en blocs de banco, il faut surtout respecter l'appareillage des blocs et éviter la surimposition des joints. Les blocs doivent être posés dans un lit de mortier, mais de façon à ce que chaque bloc repose solidement sur la rangée inférieure de la maçonnerie.

Les fondations en pierres doivent aussi être construites avec soin, chaque pierre solidement calée sur les pierres en dessous. Il ne faut en aucun cas poser des pierres simplement dans une coulée de mortier, sans s'assurer que chaque pierre ait une bonne assise.

II.1. Généralités

Voir fiches 13 et 34 du *Guide Pratique : La Construction Sans Bois*.

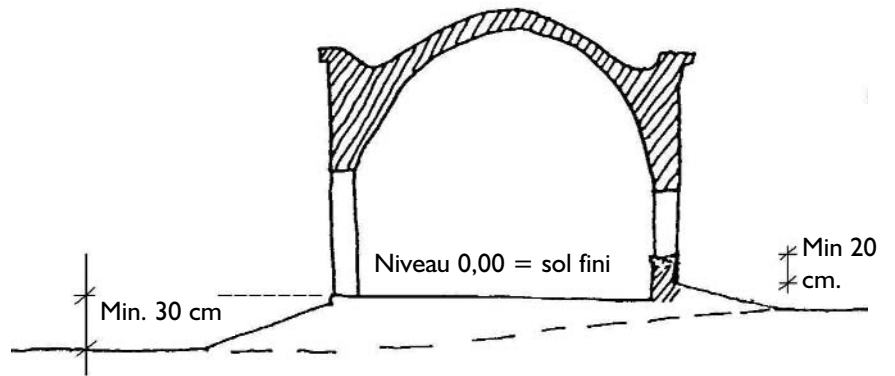
12.1. Généralités

La construction de bâtiments en CSB de plus d'un seul étage est normalement fortement déconseillée. Le cas échéant, il faut toujours faire appel à un expert en matière de la construction sans bois avant d'opter pour un bâtiment avec un étage supplémentaire au rez-de-chaussée.

La construction sans bois peut très bien s'adapter par contre à la construction de pièces souterraines, sous réserve que le site ne comporte aucun risque d'inondation.

13.1. Généralités

Dans la construction sans bois, le niveau de la Hpn est mesuré à partir du niveau 0,00. Le niveau 0,00 est le niveau du sol fini intérieur, y compris l'épaisseur de la dalle ou toute autre type de finition du sol. Le niveau 0,00 doit être 0,30 cm au-dessus du niveau du sol extérieur.



Douline A, *Etude technique : bâtiments en voûtes et coupoles en adobe*. Development Workshop, France, 1989.

Houben H & Guillard H, *Traité de construction en terre*. Editions Paranthèses, Paris, 1989.

Keable J, *Rammed Earth Structures - a code of practice*. IT Publications, London, 1996.

Stroud Foster, J. *Mitchells's Structure and Fabric, Parts 1 & 2*. Longman, London, 1996.

Matana M, *Maçonnerie 1*. CME Editions, Paris 1995.

Norton J, *Building with earth*. IT Publications, London, 2nd Edition 1997.

Spence R & Cook D, *Building materials in developing countries*. John Wiley & Sons, Chichester, 1983.

Minke G, *Lehmbau-Handbuch - Der Baustoff Lehm un seine Anwendung*. Okobuch, 1994.

Henry-Claude M, Stefanon L, Zaballos Y, *Principes et éléments de l'architecture religieuse médiévale*. Editions Fragile, 1997.

Autres sources non-publiées:

Cain A, notes (projets de Development Workshop)

Divers experts, lors de discussion en cours (2002) autour du *Earthen materials task group on standards for earth construction*.