

**ETUDE TECHNIQUE**

**BATIMENTS EN VOUTES ET  
COUPOLES EN ADOBE**

**IFEROUANE, NIGER**

**Volumes 1 - 4**

**Février 1991**



**Rapport réalisé par**

**Alexandre Douline, Development Workshop**

**Commandité par**

**l'Alliance mondiale pour la Nature (UICN) -  
Programme Sahel, pour le Projet pour la  
Conservation et la Gestion des Ressources Naturelles  
de l'Air et le Ténéré**

## **Etude Technique**

### **Bâtiments en voûtes et coupoles en adobe - Iférouane, Niger**

#### **Financement:**

L'Alliance Mondiale pour la Nature (UICN)/ Fonds Mondial pour la Nature (WWF), B.P. 10933, Niamey, République du Niger.

#### **Projet:**

Projet pour la Conservation et la Gestion des Ressources Naturelles dans l'Aïr et Ténéré, B.P. 312, Arlit, République du Niger.

#### **Assistance Technique:**

Development Workshop, B.P. 13, 82110, Lauzerte, France.

#### **Rapport:**

Texte, dessins:	Alexandre Douline
Co-ordination:	John Norton, Peter Tunley
Photos:	Alexandre Douline, John Norton
Mise en page:	Claire Gordon, Bernadette Tauran

#### **4 volumes:**

Volume 1:	Synthèse
Volume 2:	Analyse du matériau terre
Volume 3:	Etude des composants
Volume 4:	Etude des structures

## Bibliographie

*Construire en Terre*, CRATerre, 1985.

*Essais de terrain pour la sélection de terre en vue de la fabrication d'adobes*, Hernandez R., Mexique, 1983.

*Arc, Voûtes, Coupoles*, Posma C., Cours CEAA Terre, Grenoble.

*Building with Earth. A Handbook*, Norton J., IT Publications, Londres, 1986.

*Adobe: Build it yourself*, McHenry P.G., The University of Arizona Press, Tuscon, USA, 1973.

*Toitures en Zones Tropicales Arides*, GRET, Paris.

# **VOLUME 1**

## **SYNTHESE**

	<b>page</b>
<b>1) CONTEXTE</b>	<b>1</b>
<b>2) LE PROGRAMME DE CONSTRUCTION SANS BOIS</b>	<b>2</b>
<b>3) LES RESULTATS</b>	<b>5</b>

## 1) CONTEXTE

### 1,1) Le Projet pour la Conservation et la Gestion des Ressources Naturelles de l'Aïr et le Ténéré (PCGRNAT)

#### 1,11) Origine et objectifs

Le Projet "Conservation et gestion des ressources naturelles de l'Aïr et du Ténéré" (PCGRNAT) date de 1970 et a pour origine la prise de conscience de la disparition de certaines espèces animales et végétales dans cette région du Niger.

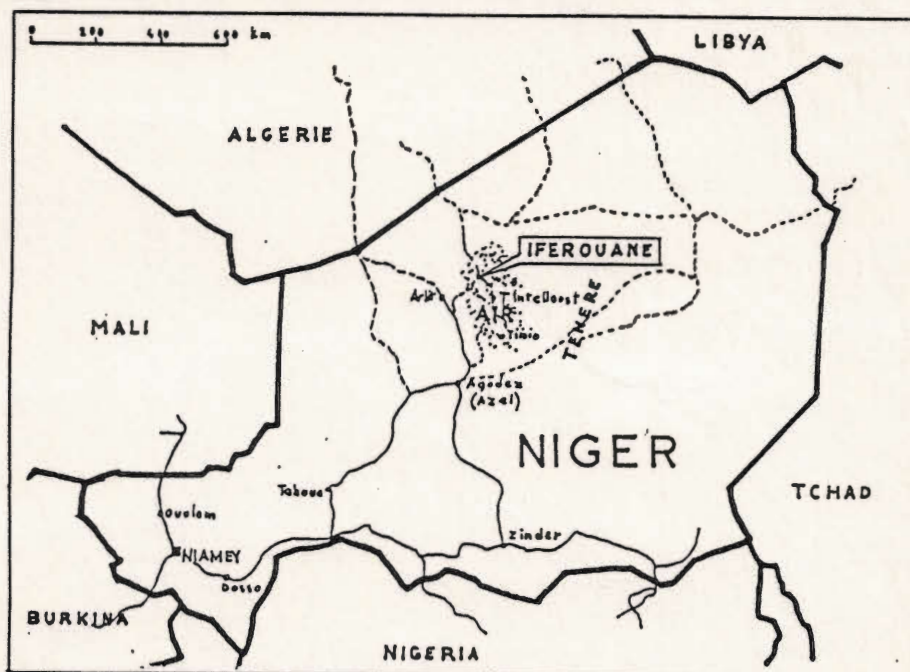
L'Union Internationale de la Conservation de la Nature et de ses ressources et le Fonds mondial pour la nature (UICN/WWF) prennent en charge les missions d'études multi-disciplinaires (1976/1979) et décident de financer le Projet. En 1982 un projet de conservation de la Faune et de la Flore est mis en place.

En 1984, l'environnement subit une sévère sécheresse, touchant l'ensemble de la population (environ 4000 habitants). C'est ainsi que le PCGRNAT décide d'intervenir dans les activités humaines consommatrices de matière première afin de mieux comprendre l'environnement global et d'aider à le préserver.

Pour ce faire, le Projet PCGRNAT met en place une Section de Développement Rural (SDR) dont une des activités la plus importante est le bâtiment, grand consommateur de matériau végétal. Cette activité s'appuie sur un programme de Construction Sans Bois.

#### 1,12) Situation géographique

Le projet PCGRNAT est basé dans le massif de l'Aïr, à l'oasis d'Iférouane. La population de 2000 habitants est de culture touareg, semi-nomade, vivant de l'élevage de chèvres et de cultures vivrières (blé, mil, légumes). La langue est le tamachek mais beaucoup de gens parlent aussi le haoussa et le français.



## 2) LE PROGRAMME DE CONSTRUCTION SANS BOIS

Le Projet étant basé à Iférouane, l'activité Construction Sans Bois de la Section Développement Rural a démarré puis rayonné à partir de cette oasis. C'est ainsi qu'il existe aussi des bâtiments à Tintelloust, Azel, Agadez...

### 2,1) Analyse de l'habitat traditionnel d'Iférouane

Il y a vingt ans, excepté quelques rares vieux bâtiments administratifs en adobe, toutes les constructions de la ville étaient en natte sur ossature bois. C'est la femme qui détenait l'activité du bâtiment: confection des nattes, conception de l'espace, construction.

En 1974, un projet d'hydrologie amène à Iférouane (entr'autres) des revenus et les techniques minimales pour construire les maisons en banco, couvertes d'une toiture plate avec poutres en palmier Doum. Depuis, cette forme de construction devient de plus en plus courante. Elle est aussi construite uniquement par les hommes, ce qui entraîne des conséquences sociales importantes, les femmes étant propriétaires de ce qu'elle contruisent. Mais le projet d'hydrologie n'ayant pas pour but principal la formation de maçons, ceux-ci maçons sont loin de posséder l'expérience et tout le savoir-faire nécessaire. D'où des malfaçons dont voici quelques illustrations.

#### - Les murs

Dans l'ensemble, le maçon bâtit vite: 1000 blocs/jour (un bloc = 38x22x10 cm). Ce haut rendement traduit ceci: étalement du mortier sur toute la longueur du mur; pose de tous les blocs, puis alignement des blocs. Or, avec l'air sec, le mortier est déjà sec avant la dernière phase d'alignement. Par conséquent, le mur perd sa qualité monolithique.

#### - L'enduit

La longue tradition (ex: Agadez) pour la préparation d'un enduit se perd. Tout le monde souhaiterait un enduit durable, mais peu de gens sont prêts à faire le travail nécessaire ou peuvent obtenir les matériaux nécessaires. Vue la faible pluviométrie d'Iférouane, peu d'attention est accordé au problème.

#### - La terre

Elle est rarement choisie pour ses qualités: elle est extraite près de la maison pour éviter le transport. Partout dans la ville des trous d'extraction s'agrandissent, parfois dangereux, souvent très sales car ils deviennent des dépôts d'ordures et des W-C publics.

### 2,3) Réalisations

Le projet PCGRNAT a développé une gamme de bâtiments (conception et construction) allant de la villa ou bureau complexe...



... à la simple case ronde ...



Après plusieurs années, les travaux sont concentrés sur les combinaisons de plusieurs pièces circulaires, plutôt que sur les structures à plan rectangulaire. En effet, les structures à plan circulaire simplifient la construction en augmentant la solidité et l'économie.

Il est à noter que lors de la construction de bâtiments conçus par le projet PCGRNAT, une vingtaine de maçons a été formée à ces nouvelles techniques sans bois.

Le projet attend que ces maçons, de retour chez eux, perfectionnent leur savoir-faire sur des structures très simples, avant d'être sollicités pour construire des bâtiments complexes.

En effet, dès 1989, on observe un nombre croissant de petits bâtiments spontanés, construits par ces maçons sans assistance technique ni financière.

### 3) LES RESULTATS

Les résultats sont classés en trois parties:

- l'analyse du matériau terre;
- les composants: le bloc, le mortier, l'enduit;
- l'étude des structures.

#### 3,1) Analyse du matériau terre

Pour construire en adobe, il faut une terre mélangée: ni trop sableuse ni trop argileuse. Or, pour la population, si la notion "trop sableuse" est évidente (bloc friable, peu résistant), la notion "trop argileuse" n'est pas bien perçue.

En effet, les maçons locaux préfèrent la terre "qui colle" (il est vrai que le bloc est plus dur) tant que le bloc ne se fissure pas. Mais comme les blocs des toitures en voûtes et coupoles sont petits, ils ne peuvent pas beaucoup se fissurer même si le taux d'argile est suffisant pour provoquer le problème du gonflement-retrait-fissuration. Or ce phénomène ne fait que s'aggraver à chaque cycle d'humidification/séchage (pluie/soleil). C'est un des risques majeurs des constructions en terre.

Il apparaît indispensable de proposer à la population une gamme d'essais pour déterminer si le sol convient à la construction en adobe. Ces essais doivent être réalisables sur le terrain et être accessibles à tous (donc, mode opératoire simple et matériel rudimentaire).

Pour cela, cinq essais très simples sont retenus:

- |                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| quatre essais sensoriels: | la vue,              |
|                           | le toucher - sec,    |
|                           | le toucher - humide, |
|                           | le lavage des mains; |
| un essai manuel:          | le test du cigare.   |

Matériel nécessaire: 1 pelle, 1 pioche, 1 l.d'eau, 1 tige de fer de 10 et de 50 cm de longueur.

Un tableau d'aide à la décision permet aux briquetiers de déterminer rapidement si une terre convient à la production d'adobe (voir page suivante).

Pour une utilisation plus spécifique du sol (application en enduit, par exemple), il faut plus de précisions sur ses propriétés spécifiques. C'est pourquoi trois essais complémentaires qui seront exécutés dans un local par un personnel formé ont également été sélectionnés.

Ce sont trois essais de mesure: mesure de la teneur en eau de moulage (TEM),  
mesure du retrait,  
mesure de la perméabilité.

Matériel nécessaire: 1 réchaud, 1 balance à 0,1g près, 1 marteau, 1 poêle, 1 spatule, 2 moules de retrait, 1 moule 10x10x2, 1 large plat, 1 bidon de 4 l.d'eau.

La TEM est la consistance humide nécessaire pour mouler des blocs. Elle est très bien connue des briquetiers et sert de référence comme limite de liquidité pour tous les essais de mesure et pour le test du cigare.

Sans recourir aux essais de sédimentation ou de granulométrie, l'interdépendance des huit essais suffit à trouver quel type de structure a le sol et à quelle classe granulométrique il appartient: sableux, silteux, argileux ou mélangé.

Le matériel est rudimentaire et facile à transporter.










En pratique, quand le briquetier arrive sur le site, en général, il défonce le sol en tous sens et mélange tout. Ce sont les propriétés du mélange qui l'intéressent. Sans faire tous les essais, il détermine si le sol peut engendrer une structure continue, simplement par le test du cigare, puisqu'il est obligé, pour préparer son échantillon, de procéder aux trois premiers essais sensoriels et de finir en se lavant les mains.

Si le briquetier arrive avec son matériel et est accompagné de la personne formée pour les huit essais, alors très rapidement, il connaît le pourcentage de la TEM qui doit confirmer la décision du briquetier.

Pour en arriver à ce résultat, il a fallu:

- connaître le matériau terre;
- analyser différents sols pour faire plusieurs essais;
- examiner les résultats afin de définir la gamme d'essais simples nécessaires et suffisants pour déterminer si un sol convient à la construction en adobe.

IDENTIFICATION DU SOL POUR L'ADOBE

SOL N°	lieu:	3 réponses (A, B ou C) par essai. En choisir une; cochez-la (X).			
	date:	A	B	C	
1	VUE 	très fin poussièreux	il y a TOUT de gros à très fin	fin et en bloc	
2	TOUCHER SEC 	peu rugueux facile à réduire en poudre	rugueux facile à écraser	morceaux difficiles à casser	
3	TOUCHER HUMIDE 	fond rapidement colle	se désagrège rapidement colle très peu	fond lentement colle beaucoup	
4	LAVAGE DES MAINS 	peu difficile à rincer	très facile à rincer	savonneux difficile à rincer	
Total des X par colonne					
Colonne la plus cochée					
		Arrêter	Continuer ...		
squelette trop fin, l'essai au Cigare n'est pas valable  bloc de résistance moyenne mais trop fragile à l'eau		5	ESSAI DU CIGARE 		
		< 5cm	> 5cm	< 15cm	> 15cm
		sol trop sableux	sol bien mélangé	sol mélangé risque de silt	sol trop argileux
		bloc friable	bloc très bon	bloc possible	bloc fissuré
		NON	NON	OUI	A VOIR
					

### 3,2) Composants

#### 3,21) Bloc

L'analyse des sols nous permet de sélectionner les terres ni trop sableuses, ni trop argileuses qui engendrent une structure continue et dense utile à la fabrication des blocs d'adobe.

Dans la réalité à Iférouane, le choix de terre est limité et le transport est cher. Ils l'extraient à côté de leur maison. De ce fait, le seul critère de qualité d'un bloc est de pouvoir supporter la manutention.

Pour des bâtiments en voûtes et coupôles où les phénomènes de poussée latérale imposent aux murs des contraintes supérieures à celles d'une construction classique (4 murs + toit plat), les critères de qualité doivent être clairement définis et contrôlés régulièrement.

##### a) Les cinq critères de qualité

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

Les limites de qualité à partir desquelles le constructeur refuse le bloc doivent être acceptées par le briquetier avant la production.

##### b) Les contrôles de qualité

- L'analyse de contrôle:




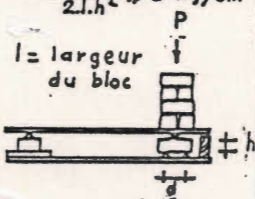

Elle permet au briquetier de contrôler journalièrement les caractéristiques du sol au fur et à mesure que la carrière s'étend (essai du Cigare).

- Les tests d'acceptation:

Ce sont des tests visuels ou mécaniques permettant de contrôler si les critères de qualité sont respectés.

Dans le tableau qui suit, les recommandations sont spécifiques à la région du nord Niger. Dans le sud, l'utilisation de la paille pour stabiliser l'argile apporte quelques modifications.



CRITERES DE QUALITE	TESTS D'ACCEPTATION		
	PROCEDURE	FREQUENCE	CORRECTION
Aspect des arêtes Aucun vide accepté au niveau des arêtes	Observation visuelle 	dès le démoulage	Améliorer le tassement de la terre, surtout dans les coins du moule
dimensions * Largeur: + 5% -> bloc refusé * Longueur: - 5% -> bloc refusé * Terre collée dessous -> bloc refusé	Mesures ou observations visuelles 	2 jours après le démoulage	-> Largeur: contrôler l'eau de malaxage -> Longueur: ajouter du sable -> Terre colle: niveler et sabler légèrement l'aire de production
fissures Est toléré: 1 fissure < 5 cm au milieu du bloc. Autre fissure -> bloc refusé	Observations visuelles 	En fin de séchage	Utiliser un sol plus sableux.
Résistance mécanique $M_r = \frac{3 \cdot P \cdot d}{2 \cdot l \cdot h^2} \geq 3 \text{ kg/cm}^2$ l = largeur du bloc 	Prendre au hasard 3 blocs du stock journalier: Si 1 sur 3 < 3kg/cm <sup>2</sup> recommencer sur 3 autres blocs: Si 1 sur 3 < 3kg/cm <sup>2</sup> refuser le stock.	En fin de séchage	-> Augmenter le temps de malaxage. * Sol trop sableux: -> ajouter de la terre argileuse. * Sol trop silteux: -> changer de site.
Erosion à l'eau 10 x 12 L. 	Prendre au hasard 1 bloc du stock qui semble silteux et lui faire subir le test à côté d'un bloc considéré normal par le client. Après séchage, comparer la perte en terre: Si le 1er est nettement + petit, refuser le stock.	En fin de séchage	-> Bien dégager le site de sa couche superficielle en général silteuse. -> Etre vigilant à l'analyse de contrôle. -> Changer de site si le sol est silteux.

Ces contrôles de qualité ont mis en évidence qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser un sol argileux pour fabriquer des petits blocs d'adobe pour les toitures, comme le projet PCGRNAT le préconisait (essai du cigare 25 cm, bloc très résistant).

Un sol mélangé (essai du cigare = 10 cm) permet d'obtenir des blocs résistants ( $M_r = 5 \text{ kg/cm}^2$ ) et surtout beaucoup plus stables à l'eau (pas de phénomène de gonflement-retrait).

Ce choix permet d'économiser les ressources en sol argileux (peu abondant à Iférouane) et un quart de la quantité d'eau nécessaire au malaxage.

Sous le climat très sec d'Iférouane sept jours de séchage suffisent pour obtenir la résistance mécanique exigée ( $M_r = 3 \text{ /cm}^2$ ). Et il faut deux mois pour que le maximum d'eau soit évaporé (T.E. = 0,5 %).

(Résultats recueillis en saison froide pour des blocs 40x18x15; il n'en faut que trois pour les petits blocs 20x15x6 et quatre pour les blocs 40x18x10).

### 3,22) Mortier

Pour ses voûtes et coupoles, le projet utilise un mortier très argileux. Ce mortier très collant est pratique pour les maçons, surtout au niveau de la clef de voûte et du sommet de la coupole.

#### a) Inconvénient de ce mortier

Trop argileux, ce mortier est appliqué très liquide (28% d'eau). D'où la présence d'innombrables fissures de retrait.

A cause de ces fissures, le mortier est moins résistant que les blocs, ce qui entraîne une usure inégale de la toiture et un risque sérieux d'infiltration.

#### b) Recommandations

Comme pour les blocs, il est conseillé d'utiliser un mortier de mélange dont la cohésion peut être indiquée par l'essai du cigare (longueur de rupture = 12 cm).

Ce mortier plus sableux, étant moins collant, les maçons doivent plaquer les blocs à leur place et non plus les taper trop durement. On améliore l'accrochage en utilisant des blocs dont la face a été striée avec les doigts lors du moulage.

### 3,23) Enduit

La recherche d'un enduit pour protéger les voûtes et les coupoles, s'est orientée vers la stabilisation de la terre par l'huile de vidange (liquide actuellement brûlé par le PCGRNAT). Elle a également retenu l'enduit traditionnel d'Agadez à base de fumier.

Cette recherche s'est déroulée en 2 temps: l'analyse au laboratoire puis les tests à l'extérieur.

### 1) Analyse au laboratoire:

A l'aide des essais de perméabilité et de compression simple, on détermine le type de sol et le dosage pour lequel l'imperméabilisation est efficace.

### 2) Test à l'extérieur:

Sur une structure de 6 voûtes nubiennes, on teste par un système d'arrosage, les différents enduits sélectionnés au laboratoire.



### Conclusions:

#### a) L'enduit à base de 40 % de fumier de chèvre:

C'est l'enduit utilisé par le PCGRNAT.

On peut l'améliorer en utilisant un sol moins argileux, de manière à diminuer les fissures. Car actuellement, l'enduit se craquèle par plaques étanches et très dures. L'eau n'use pas les plaques, ne peut donc pas combler les fissures et pénétrer par elles.

L'appliquer en 2 couches est excellent, mais il faut que la 2ème fasse 1 cm d'épaisseur et soit appliquée après que la 1ère est finie de fissurer.

#### b) L'enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé fin:

C'est l'enduit le plus efficace.

### Préparation:

\* Mouiller et remuer la terre durant 3 semaines afin que toute l'argile soit répartie.

\* Mélanger l'huile par petite quantité. Dans une brouette le dosage est simple et reste propre: (la terre étant mouillée à la T.E.M) - 35 seaux de 10 l. + 3,5 l. d'huile.

**Application:**

- \* En 2 couches fines (0,8mm) sur un support propre, piqueté et mouillé.
- \* La dernière couche est lissée pour fermer les éventuelles fissures de retrait et pour que l'eau s'évacue plus vite.

La dégradation de cet enduit provient de nodules d'argile non huilés qui éclatent sous l'humidité, provoquant un cratère puis un trou dans l'enduit.

Pour minimiser ce problème il convient de bien soigner la préparation du mélange. Cet enduit supporte bien l'application d'une nouvelle couche d'entretien. A condition que l'on nettoie, griffe et mouille l'ancien enduit.

**c) La 2ème couche de blocs:**

Le fait de recouvrir la toiture d'une couche de blocs posés à plat, n'augmente que très légèrement l'étanchéité.

L'avantage de cette couche est beaucoup plus d'ordre thermique.

**3,3) Etude des structures****a) Méthode de calcul:**

Pour dimensionner des bâtiments en voûte et coupole, il faut étudier:

- \* La **POUSSEE** latérale afin de vérifier la stabilité.
- \* La descente de **CHARGE** afin de vérifier que les contraintes de compression dans la maçonnerie et au niveau du sol soient inférieures aux contraintes admissibles des matériaux (bloc adobe et sol support).

La forme courbe des toitures rend le calcul algébrique complexe.

Il est plus simple d'utiliser la méthode graphique, basée sur les triangles des forces dessinés à l'échelle et qui permettent:

- \* De tracer la ligne de force dans l'épaisseur de la toiture (nécessaire pour calculer la contrainte maximale dans les blocs de la toiture).
- \* De déterminer la valeur de la poussée (nécessaire pour connaître la résultante des forces dans le mur).

**b) Etude des voûtes****Simplification du tracé:**

Une méthode de traçage des voûtes avec 3 cordes est proposée au PCGRNAT, afin de remplacer sa méthode basée sur le traçage à main levée, suivant 3 points calculés mathématiquement, (tributaire d'un technicien, et risque d'erreur au traçage).

Suivant le principe du triangle égyptien (3 segments de cercle), on peut tracer l'intrados avec 3 ficelles reliées entre elles.



Il devient possible de tout exprimer en fonction du seul paramètre: la portée (espace intérieur entre les 2 murs).

C'est ainsi que l'on peut, pour les 3 types de voûte, dimensionner les murs et les fondations, en fonction de la portée. Les calculs sont faits pour des murs de 40 cm et 60 cm de large (correspond à la modulation des blocs).

portée		2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
56,3%	flèche	1,13	1,41	1,69	1,97	2,25	2,53	2,82
	hauteur de mur	(40) 1,80 (60) 3,60	1,45 3,25	1,30 3,00	1,10 2,70	1,05 2,40	0,95 2,25	0,85 2,00
66,6%	flèche	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33
	hauteur de mur	(40) 2,15 (60) 3,70	1,75 3,40	1,50 3,10	1,35 2,80	1,20 2,50	1,05 2,30	0,95 2,10
75 %	flèche	1,50	1,88	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75
	hauteur de mur	(40) 2,50 (60) 3,90	2,05 3,55	1,75 3,25	1,50 2,90	1,35 2,70	1,20 2,50	1,05 2,25

*Toutes les valeurs sont en mètre.*

- Tous les murs de 40 cm nécessitent des fondations de 80 cm.
- Tous les murs de 60 cm nécessitent des fondations de 120 cm.

Par économie la population se limite à de petites fondations.

Le tableau ci-dessous donne la hauteur maximale des murs dans le cas où l'on a :

- Fondation de 60 cm sous des murs de 40 cm.
- Fondation de 80 cm sous des murs de 60 cm.

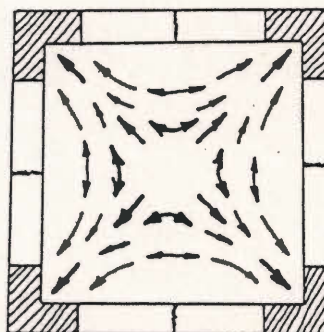
portée		2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
56,3%	flèche	1,13	1,41	1,69	1,97	2,25	2,53	2,82	
	hauteur de mur	(40)	1,25	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,55
		(60)	2,05	1,80	1,65	1,50	1,35	1,25	1,15
66,6%	flèche	1,33	1,67	2,00	2,33	2,67	3,00	3,33	
	hauteur de mur	(40)	1,40	1,15	1,00	0,85	0,75	0,65	0,60
		(60)	2,15	1,95	1,75	1,35	1,40	1,30	1,20
75 %	flèche	1,50	1,88	2,25	2,63	3,00	3,38	3,75	
	hauteur de mur	(40)	1,55	1,30	1,10	0,95	0,80	0,70	0,65
		(60)	2,25	2,00	1,80	1,65	1,50	1,35	1,25

Toutes les valeurs sont en mètre.

### c) Etude des coupoles sur plan carré:

Il s'agit de coupoles ogivales sur pendentifs dont la naissance est inférieure à 80 cm. L'excentricité est de 50 cm.

En considérant la coupole comme étant la croisée de 2 voûtes, passant par les pendentifs, on peut vérifier la stabilité et les contraintes par la méthode graphique. Mais contrairement aux voûtes, il est compliqué de dimensionner les murs et les fondations en fonction du rayon de la coupole et de la hauteur de sa naissance.



POSMA C.

L'étude doit être faite pour chaque cas. Suite à certaines de ces études, il ressort que: jusqu'à 3,50 m de côté intérieur, les murs font 40 cm d'épaisseur à condition que l'on ait:

- \* Une coupole d'excentricité  $E = 50$  cm.
- \* La naissance de la coupole à  $H = 80$  cm.
- \* Des fondations de 80 cm par 45 cm, au minimum.

C'est la plus grande case de ce type, proposée à la population par le PCGRNAT.

d) Etude des coupoles sur plan circulaire:

La coupole est de même type que dans le cas précédent: STABLE.

- \* Hauteur de la naissance, basse:  $H = 80$  cm.
- \* Les parois sont rapidement verticales du fait de l'excentricité  $E = 50$  cm (coupole ogivale).

Avantages par rapport au cas précédent:

- \* Il n'y a pas de concentration en 1 point comme avec le pendentif.
- \* Les charges sont uniformément réparties sur toutes les fondations.
- \* Les contraintes sont plus faibles.

Cette structure est la plus économique pour un même volume habitable:

- \* Faible épaisseur des murs:
  - 40cm à la base.
  - 25cm pour le dôme (2 couches de bloc).
- \* Faibles dimensions des fondations:
  - 60 cm de large par 30 cm de haut.

Chiffres donnés pour un diamètre intérieur maximal de 3,00m, correspondant à la case la plus construite par la population.

Bien que cette structure soit de loin la plus stable, il n'est pas proposé de gamme de cases en fonction du diamètre intérieur, comme pour les voûtes. En effet la méthode graphique utilisée ne permet que de dimensionner les fondations, mais elle ne précise rien sur les efforts dans la calotte. C'est pourquoi pour des diamètres supérieurs il faudra compter sur l'expérience pratique. (Pour le PCGRNAT elle n'est que de 4 ans.)

e) Détails techniques supplémentaires:

En complément de ces résultats chiffrés il est indispensable de soigner les détails constructifs essentiels:

- \* Appareillage (éviter les joints superposés et trop épais).
- \* Remblayage sur toiture (sol sableux compacté à peine humide).
- \* Ecoulement des eaux (soin des gargouilles, éviter les tuyaux, mieux vaut à ciel ouvert).
- \* Protection des fondations (masse d'usure en terre à la base des murs).