Toitures en terre

Michel Dayre, Patrice Doat, Josep Esteve, Hubert Guillaud, Hugo Houben, Thierry Joffroy, Pascal Rollet

▶ **To cite this version:**

Michel Dayre, Patrice Doat, Josep Esteve, Hubert Guillaud, Hugo Houben, et al.. Toitures en terre : Tome 1. Arcs, voûtes et coupoles. [Rapport de recherche] CRATerre; Rexcoop. 1986, pp.247. hal-03186840

HAL Id: hal-03186840
https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03186840

Submitted on 31 Mar 2021

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

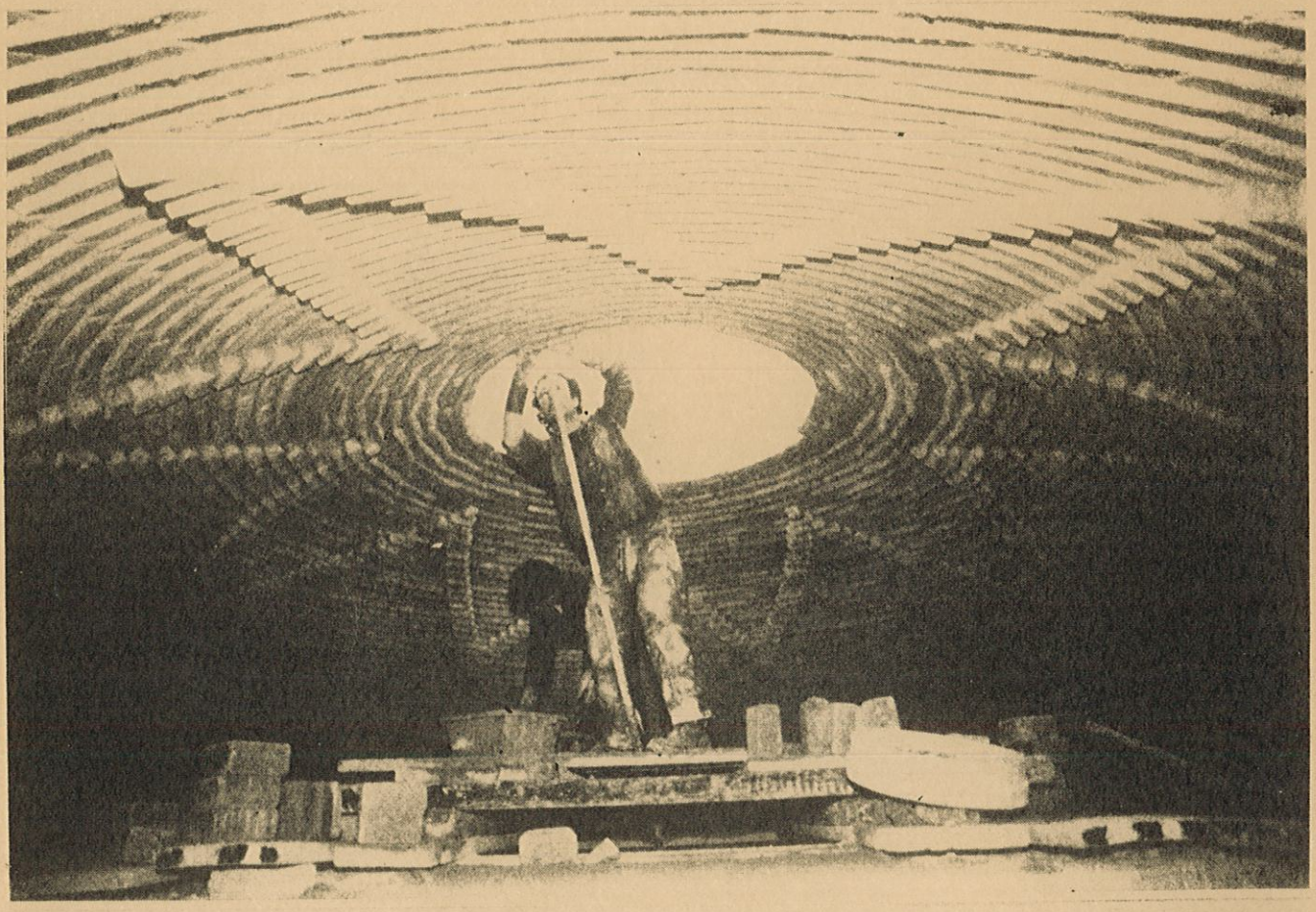
PROGRAMME INTERMINISTÉRIEL

rexcoop

1484

TOITURES EN TERRE

TOME 1 — ARCS, VOUTES ET COUPOLES



CRATerre

septembre 1986

Ministère des Relations Extérieures — Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports
Ministère de la Recherche et de la Technologie

Photo de couverture :

MAISON PLANTIER, Lumio, Corse - Réalisation de Ch. MORETTI, avec Th. JOFFROY et P. BAETEMAN, étudiants CEAA-Terre de l'Ecole d'Architecture de Grenoble, 1984-85.

- Photo Th. JOFFROY -

Photo du dos :

Réalisations de structures en arcs, voûtes et coupoles à l'Ecole d'Architecture de Grenoble, 2ème année - cycle DEFA.

- Photo CRATerre -

ARCS, VOUTES ET COUPOLES DANS L'ARCHITECTURE DE TERRE

SOMMAIRE

PREFACE ..... p 1

CHAPITRE I : NOMENCLATURE ET TRACE

- NOMENCLATURE ET TRACE DES ARCS ..... p 2
- NOMENCLATURE ET TRACE DES VOUTES ET COUPOLES ..... p 10

CHAPITRE II : METHODES DE CALCUL

- JUSTIFICATION ..... p 21
- DIMENSIONNEMENT DES ARCS ..... p 21
- DIMENSIONNEMENT DES VOUTES ..... p 25
- ASPECTS SPECIFIQUES DU BATIMENT EN MAÇONNERIE ..... p 25
- EXPERIMENTATION ..... p 26

CHAPITRE III : TYPOLOGIE ILLUSTREE

- MODE DE CLASSEMENT TYPOLOGIQUE ADOPTE ..... p 27
- RAPPEL GENERAL SUR LES TECHNIQUES UTILISEES ..... p 30
- ARCS MONOLITHIQUES ..... p 31
- ARCS EN MAÇONNERIE ..... p 45
- ARCS COMPOSITES ..... p 92

© CRATerre 86

TOITURES EN TERRE

ARCS, VOUTES ET COUPOLES — TOME 1

MARCHE N° : 84 81034 00 223 75 01 entre l'Etat et l'association FORMEQUIP
PLAN CONSTRUCTION ET HABITAT
MINISTERE DE L'URBANISME, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS

Ce rapport constitue la première partie de ce contrat.
La deuxième partie traite essentiellement des éléments de dimensionnement des toitures courbes en terre, et abordera le problème des toitures planes en terre.

Responsabilité technique pour le compte de l'Etat :

M. Daniel BIAU, chargé de recherches au Plan Construction
et responsable du programme REXCOOP

Responsabilité Scientifique :

CRATerre (Centre de Recherche et d'Application Terre)
Ecole d'Architecture de Grenoble
10, Galerie des Baladins
38000 GRENOBLE

Participations :

DAYRE, M. ; DOAT, P. ; ESTEVE, J. ; GUILLAUD, H. ; HOUBEN, H. ; JOFFROY, Th. ; ROLLET, P.

Consultants :

ABEDINI-RAD, M. ; MOUSTAADER, A.

Secrétariat:

GALER, T.

Dactylographie:

SACCARDI, L.

Maquette:

ANGULO, D., BOYER DE BOUILLANE, Ch.,

Remerciements: Cette recherche n'aurait pu être réalisée sans la contribution du Bureau de la Recherche Architecturale de la Direction de l'Architecture et de l'Urbanisme.

Les jugements et opinions émis dans cette recherche n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs.

CENTRE INTERNATIONAL DE LA CONSTRUCTION EN TERRE
CRATerre
BIBLIOTHÈQUE

1484

ARCS, VOUTES ET COUPOLES DANS L'ARCHITECTURE DE TERRE

SOMMAIRE

- VOUTES ET COUPOLES MONOLITHIQUES ..... p 96
  - . VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES ..... p 98
  - . VOUTES MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE ..... p 105
  - . COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE ..... p 110
- VOUTES ET COUPOLES EN MAÇONNERIE ..... p 118
  - . VOUTES MAÇONNEES, EN BERCEAU COFFRE ..... p 120
  - . VOUTES EN BERCEAU, EN ENCORBELLEMENT ..... p 126
  - . VOUTES EN BERCEAU, PAR TRANCHES ..... p 129
  - . VOUTES EN BERCEAU, EN STRUTS ..... p 148
  - . INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES ..... p 153
  - . VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES ..... p 165
  - . COUPOLES EN ENCORBELLEMENT ..... p 178
  - . COUPOLES EN PENDENTIFS ..... p 185
  - . COUPOLES SUR TROMPES ..... p 204
- FLECHES EN TERRE ..... p 224
- VOUTES ET COUPOLES COMPOSITES ..... p 229
  - . VOUTES EN TERRE ARMEE DE BOIS ..... p 230
  - . COUPOLES EN SACS DE TERRE ..... p 237
  - . ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE ..... p 238

BIBLIOGRAPHIE ..... p 242

© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES DANS L'ARCHITECTURE DE TERRE

PREFACE

Cette étude des arcs, voûtes et coupoles en terre est destinée à dresser un inventaire architectural des systèmes de toitures et de franchissements permettant de mettre en évidence une typologie la plus complète des modèles connus. Ces systèmes apparaissent d'une grande diversité, tant du point de vue des formes architecturales que des techniques et des modes de mise en oeuvre. L'étude s'attache à restituer cette richesse formelle et structurale en s'appuyant notamment sur une importante documentation collectée dans une bibliographie sélective et sur le terrain, au gré de missions d'observation et d'étude dans les pays dotés des plus riches traditions de l'architecture des arcs, voûtes et coupoles en terre crue (Egypte, Iran, Iraq, Afghanistan). L'utilisation d'une iconographie graphique et photographique sélectionnée tout en restant abondante, associée à la précision terminologique et au mode de classement qui sont adoptés, contribuent à assurer la lisibilité indispensable de cette étude qui embrasse un large champ d'investigation et qui questionne l'archéologie, l'histoire, les traditions architecturales vernaculaires et l'architecture contemporaine.

© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES

NOMENCLATURE ET TRACE

1 - MODE DE CLASSEMENT ADOPTE

On présente ici la nomenclature et les modes de tracé d'une typologie des systèmes d'arcs, de voûtes et de coupoles, utilisés dans l'architecture en terre. Le classement adopté est le suivant :

A. Pour les Arcs :

1 - Arcs générés par des segments de droites,
2 - Arcs générés par un ou plusieurs cercles,
3 - Arcs générés par des courbes autres que des cercles,
4 - Arcs complexes.

B. Pour les Voûtes :

1 - Voûtes simples générées par translation d'un arc,
2 - Voûtes composées - intersection de voûtes en berceau,
3 - Coupoles et voûtes simples générées par rotation d'un cintre autour d'un axe vertical,
4 - Voûtes coniques,
5 - Intersection de voûtes simples par des plans verticaux,
6 - Voûtes composées.

© CRATerre 86

2 - PRECISIONS TERMINOLOGIQUES

Dans cette étude, nous nous référons directement aux définitions du vocabulaire de l'Architecture (1). Ainsi, la terminologie des arcs, voûtes, coupoles et dômes, renvoit aux définitions suivantes :

- Arcs (IX, le couvrement, 126-127) : "Organe clavé porté par deux points d'appui et présentant un intrados (face inférieure curviligne, IX - 144), formé d'un seul rouleau de voussoirs. Le tracé de l'arc est donné par l'intrados. L'arc est, par définition, appareillé ; il n'est donc nécessaire de le préciser que pour opposer l'ARC CLAVE à l'ARC MONOLITHIQUE. (...). L'arc appareillé transmet à ses appuis des forces obliques. (...)".

- Voûte (IX, le couvrement, 127) : "Ouvrage maçonné, construit entre des appuis, couvrant un espace et présentant un intrados. La voûte travaille comme l'arc et transmet à ses appuis des forces obliques".
Nota : notre étude étend la terminologie à voûte monolithique pour les techniques de construction en terre autres que la seule maçonnerie de petits éléments appareillés : pisé et bauge.

- Coupole (IX, le couvrement, 138-139) : "Voûte de plan circulaire dont l'intrados est théoriquement une concavité de révolution : il est tracé par la rotation d'un arc générateur sur un axe vertical. (...). On distingue les coupoles suivant l'arc générateur.

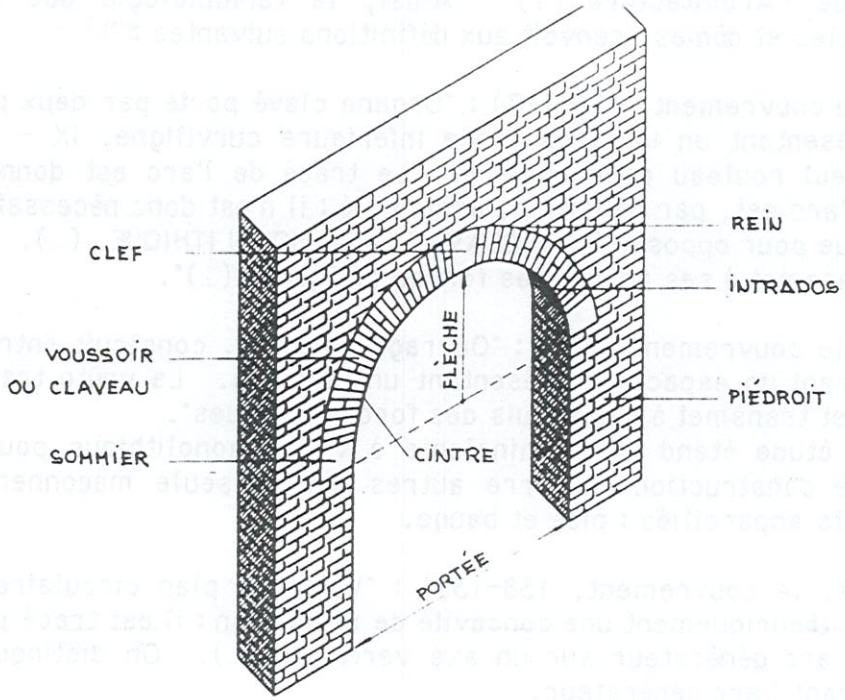
- Dôme (X, la converture, 157-158) : "Toit de plan centré à versant continu ou à pans, galbé en quart de rond. Son plan est habituellement circulaire et son volume une convexité de révolution. On distingue les formes de dôme suivant le tracé de l'arc générateur du volume général qui tend toujours vers la convexité de révolution.

Nota : pour toutes les autres définitions du vocabulaire architectural détaillé des arcs, voûtes, coupoles et dômes, employé dans cette étude, on se reportera au Vocabulaire de l'Architecture cité en référence (1).

Réf. 1 : Vocabulaire de l'Architecture, Ministère des Affaires Culturelles, Imprimerie Nationale, Paris, 1972.

© CRATerre 86

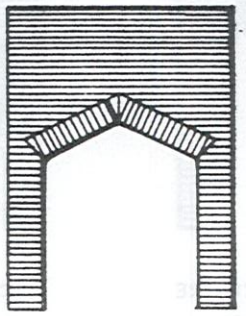
ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE



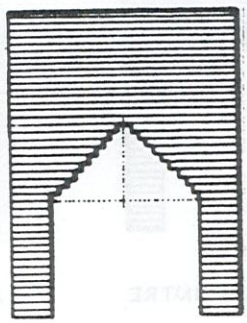
ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE

1 - ARCS GENERES PAR DES SEGMENTS DE DROITES :

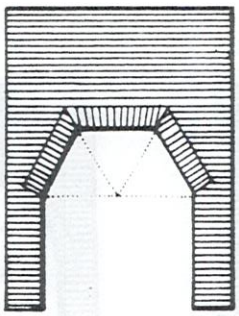
ARC EN PLATE-BANDE



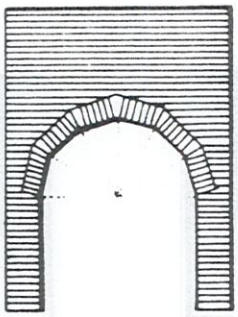
ARC EN MITRE



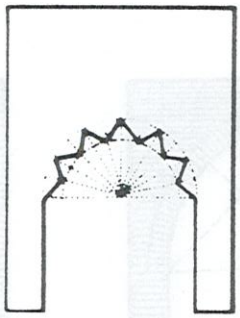
ARC EN ESCALIER



ARC EN MITRE TRONQUÉ



ARC POLYGONAL

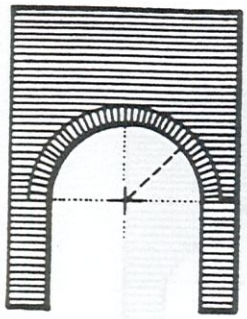


ARC ZIG-ZAG

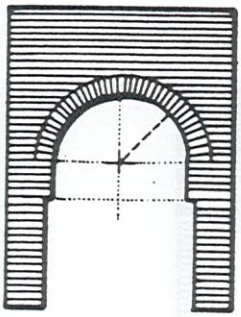
© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE

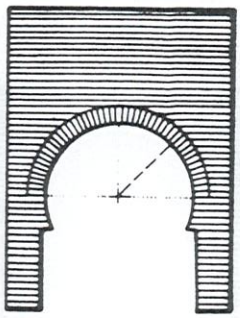
2 – ARCS GENERES PAR UN OU PLUSIEURS CERCLES :



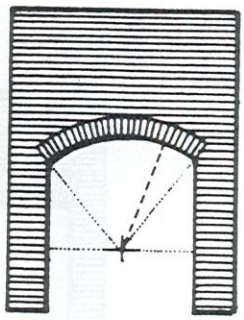
ARC PLEIN-CINTRE



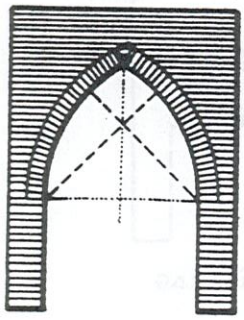
ARC PLEIN-CINTRE SURHAUSSÉ



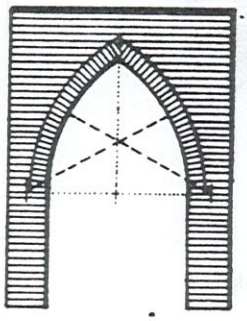
ARC PLEIN-CINTRE OUTREPASSÉ



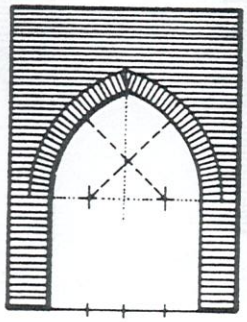
ARC SURBAISSÉ



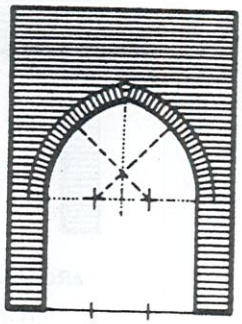
ARC OGIVAL ÉQUILATÉRAL



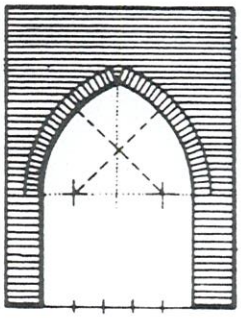
ARC OGIVAL EN LANCETTE



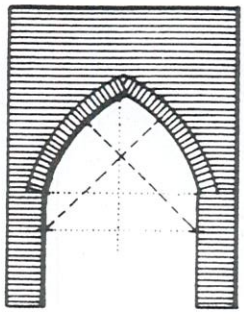
ARC OGIVAL QUART POINT



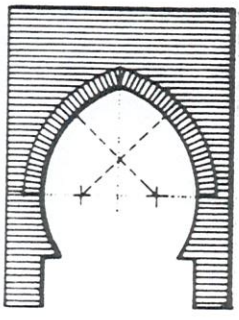
ARC OGIVAL TIERS POINT



ARC OGIVAL QUINT POINT



ARC OGIVAL SURBAISSÉ

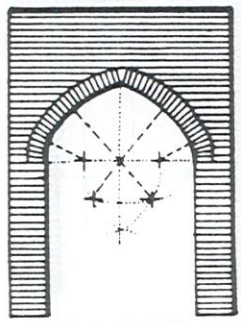


ARC OGIVAL OUTREPASSÉ

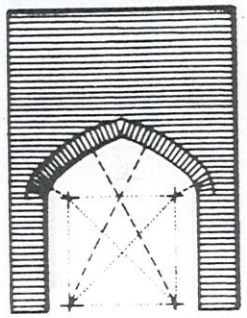
© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE

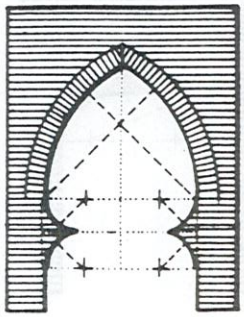
- ARCS GENERES PAR UN OU PLUSIEURS CERCLES :



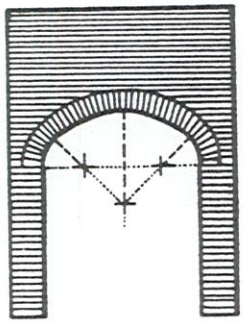
ARC TUDOR ESPAGNOL
4 CENTRES



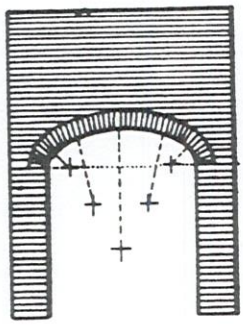
ARC TUDOR ESPAGNOL
AIGU : 4 CENTRES



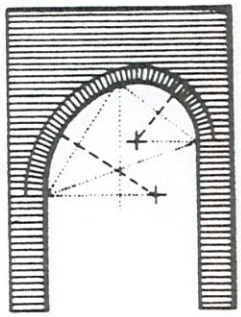
ARC OGIVAL OUTREPASSE
AVEC CHANGEMENT DE
COURBURE : 4 CENTRES



ARC EN ANSE DE
PANIER - 3 CENTRES



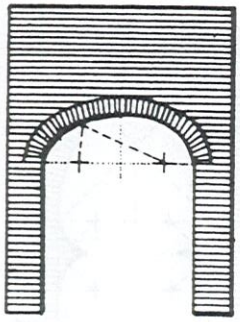
ARC EN ANSE DE
PANIER - 5 CENTRES



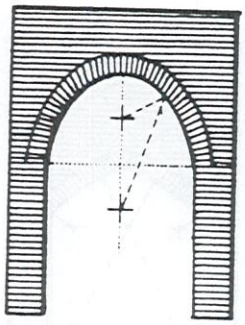
ARC RAMPANT
2 CENTRES

© CRATerre 86

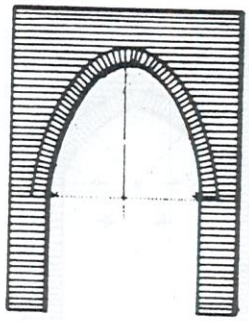
3 – ARCS GENERES PAR DES COURBES AUTRES QUE DES CERCLES :



ARC EN ELLIPSE
BASSE – 2 FOYERS



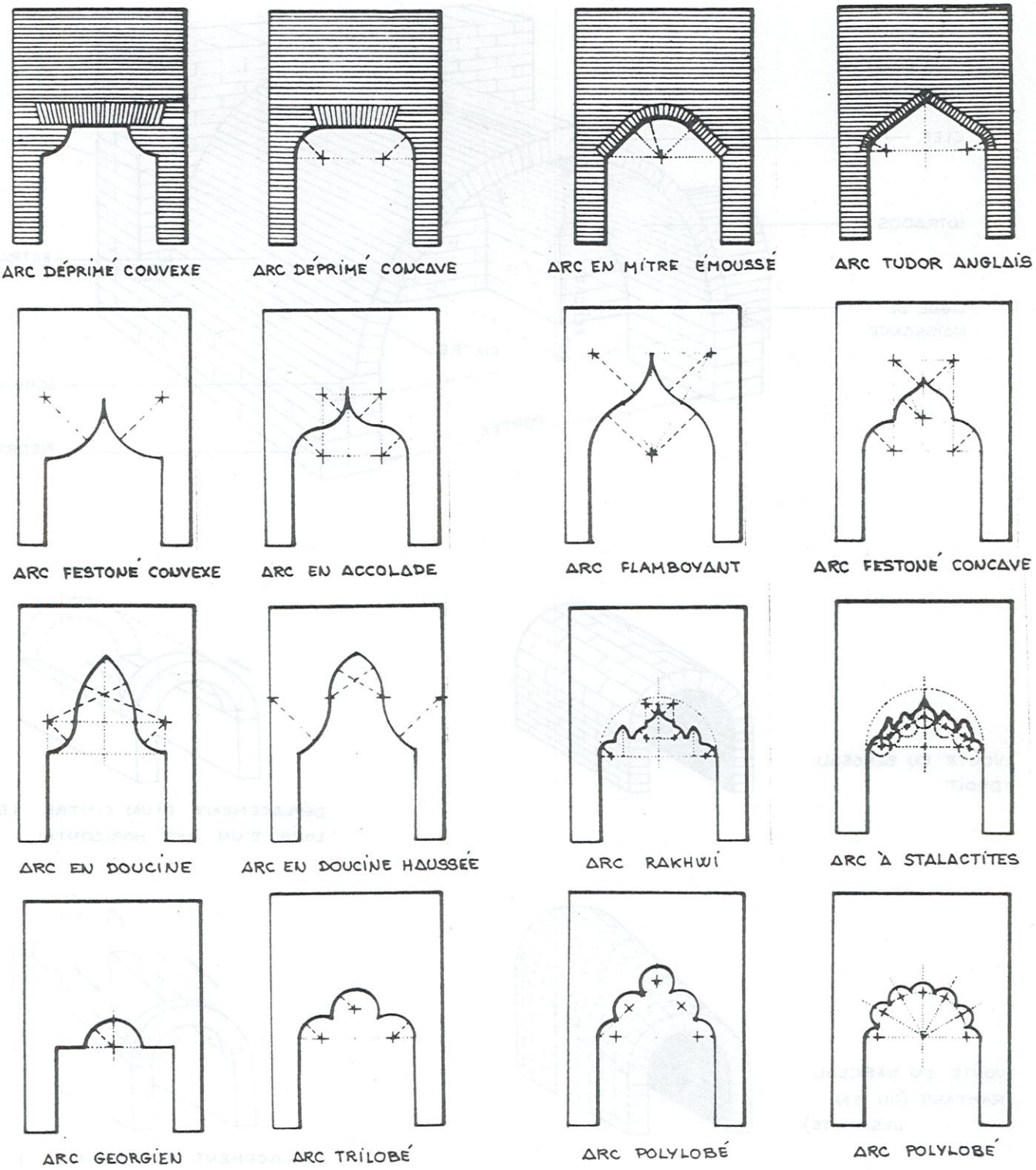
ARC EN ELLIPSE
HAUTE – 2 FOYERS



ARC PARABOLIQUE

© CRATerre 86

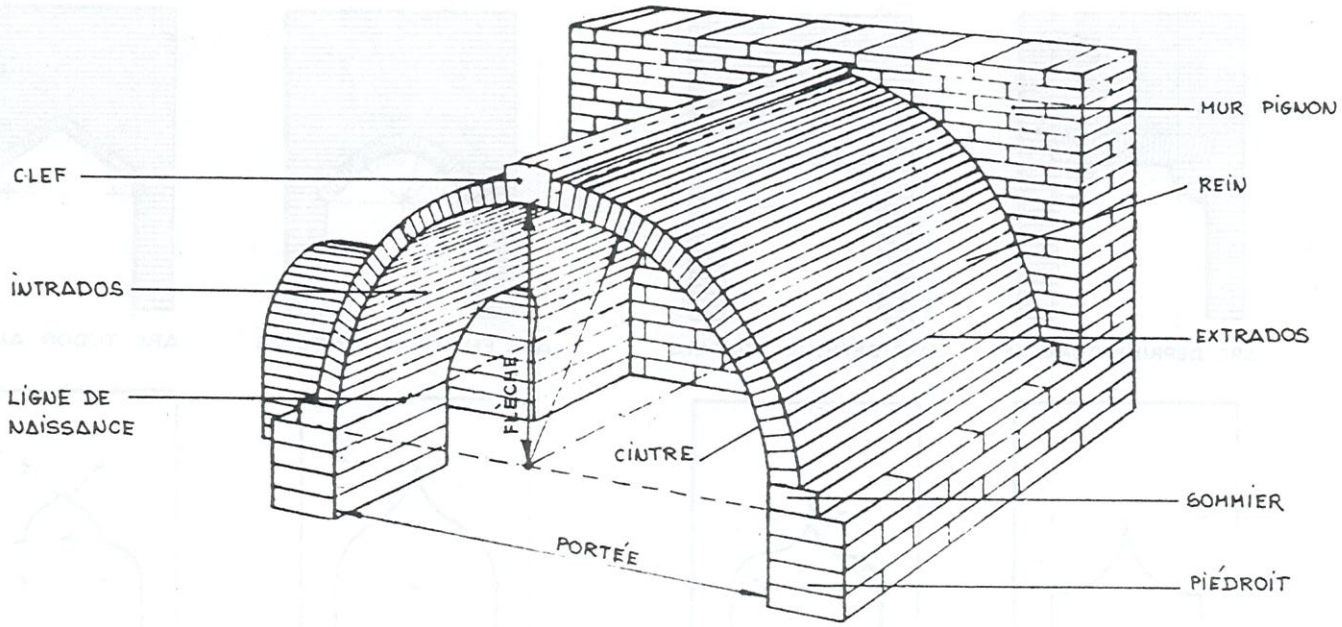
4 – ARCS COMPLEXES :



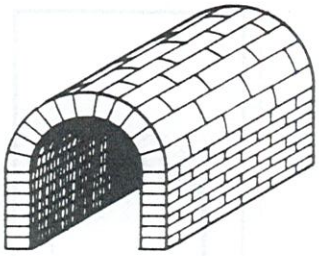
© CRATerre 86

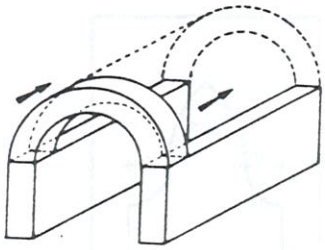
ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE

1 – VOUTES SIMPLES GENEREES PAR TRANSLATION D'UN ARC :



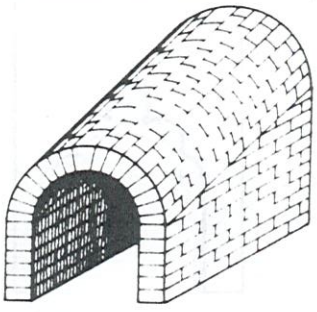
VOÛTE EN BERCEAU DROIT

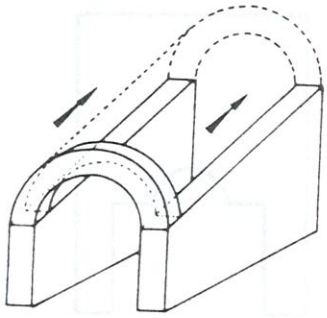




DÉPLACEMENT D'UN CINTRE LE LONG D'UN AXE HORIZONTAL

VOÛTE EN BERCEAU RAMPANT (OU EN DESCENTE)

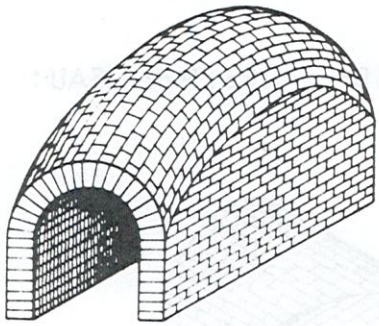




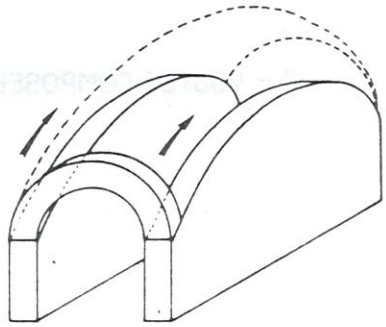
DÉPLACEMENT D'UN CINTRE LE LONG D'UN AXE INCLINÉ

© CRATerre 86

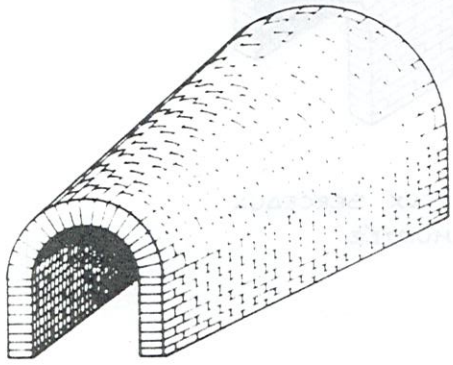
ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE



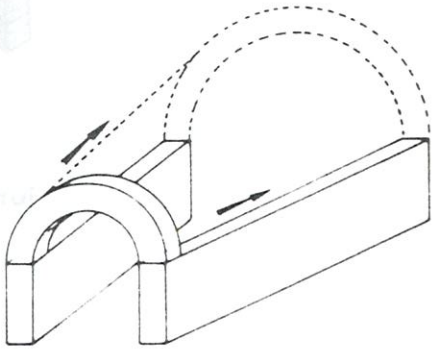
BERCEAU QUASI-TORIQUE



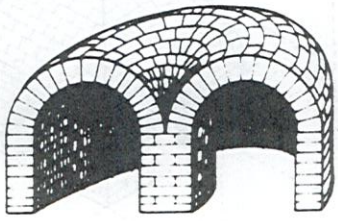
DÉPLACEMENT D'UN CINTRE SUIVANT UNE LIGNE COURBE



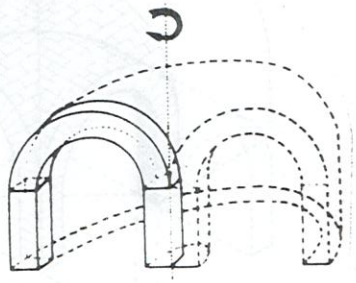
VOÛTE EN CANONNIÈRE



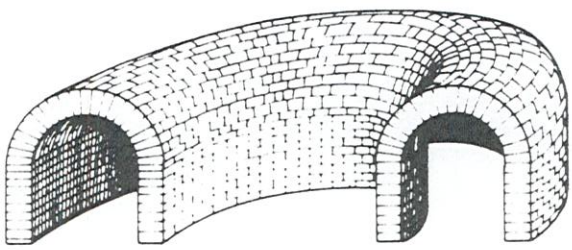
DÉPLACEMENT D'UN CINTRE, AVEC AUGMENTATION PROGRESSIVE DE LA PORTÉE ET DE LA FLÈCHE



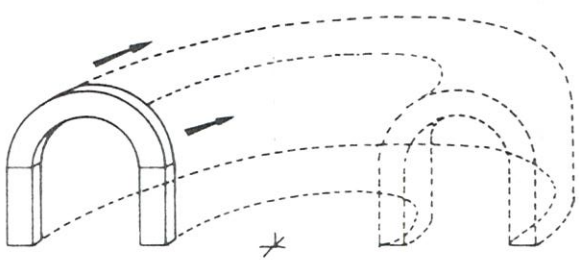
VOÛTE ANNULAIRE À PILIER CENTRAL



REVOLUTION D'UN CINTRE AUTOUR D'UNE LIGNE DROITE EXTÉRIEURE

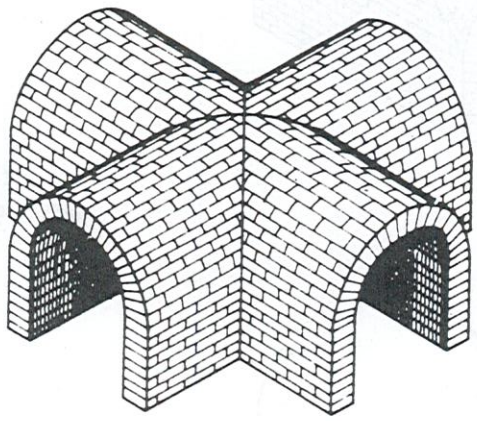


VOÛTE ANNULAIRE

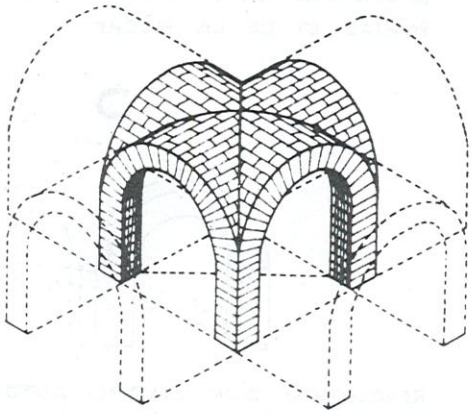


© CRATerre 86

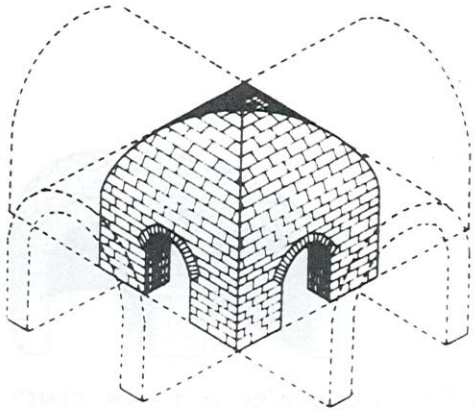
2 - VOUTES COMPOSEES - INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU :



INTERSECTION DE DEUX BERCEAUX
DE MÊME MONTÉE



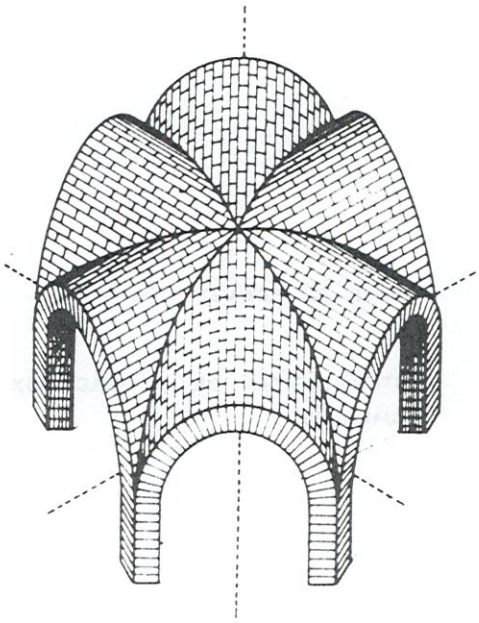
VOÛTE D'ARÊTE



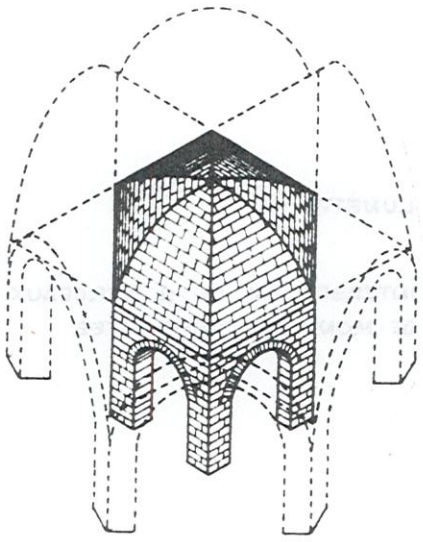
VOÛTE EN ARC DE CLOÎTRE

© CRATerre 86

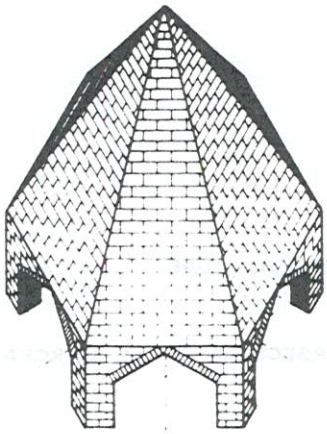
- VOUTES COMPOSEES - INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU :



INTERSECTION DE 3 BERCEAUX
EN VOÛTE D'ARÊTE



INTERSECTION DE 3 BERCEAUX
EN ARC DE CLOÎTRE

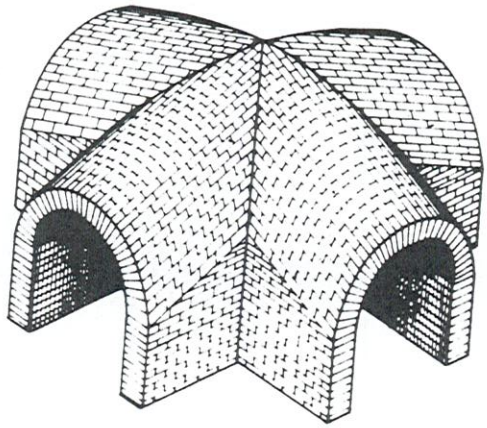


VOÛTE PIRAMIDALE HEXAGONALE

INTERSECTION DE 3 BERCEAUX
EN MITRE

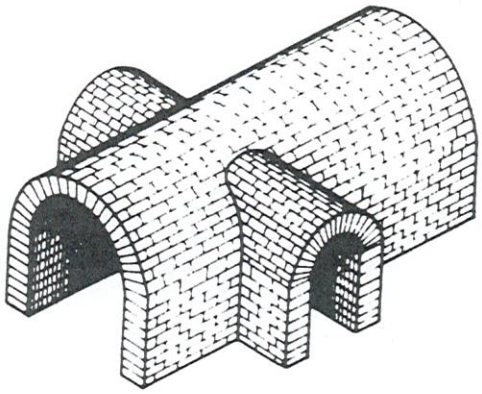
© CRATerre 86

- VOUTES COMPOSEES - INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU :



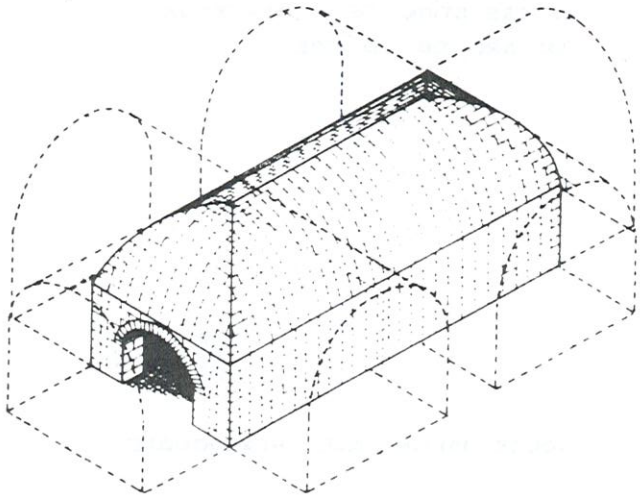
VOÛTE EN BONNET D'ÉVÊQUE

INTERSECTION DE 4 BERCEAUX RAMPANTS



LUNETTE

INTERSECTION DE 2 BERCEAUX DE MONTÉES DIFFÉRENTES

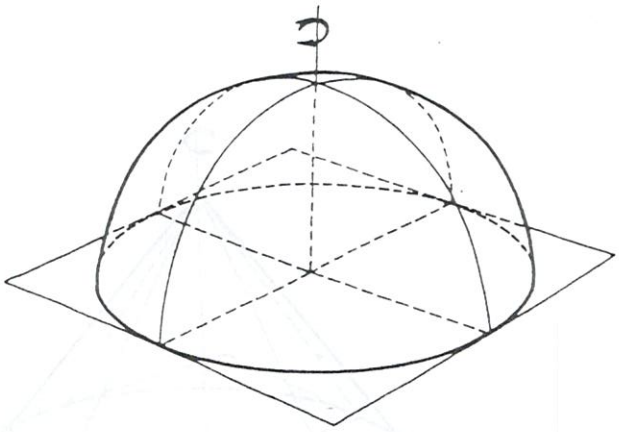


VOÛTE EN AUGE

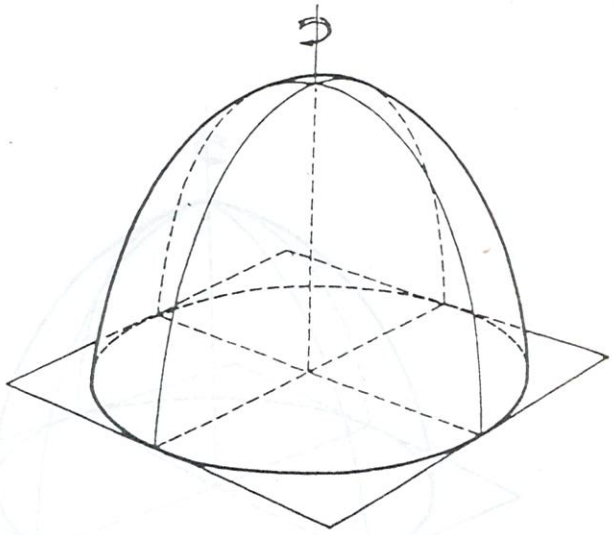
INTERSECTION DE 3 BERCEAUX

© CRATerre 86

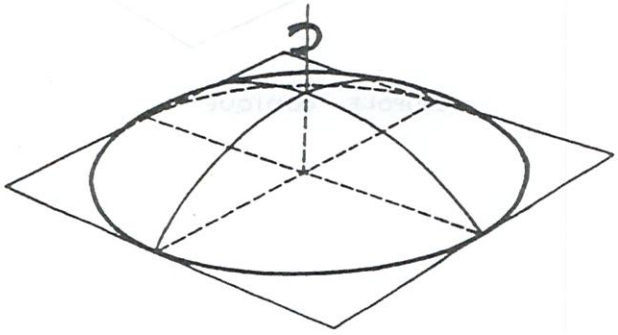
3 – COUPOLES OU VOUTES SIMPLES GENEREES PAR ROTATION D'UN CINTRE AUTOUR D'UN AXE VERTICAL :



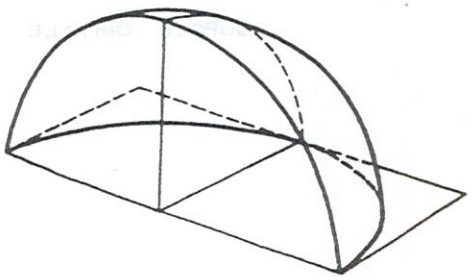
COUPOLE HÉMISPHÉRIQUE



COUPOLE ELLIPSOÏDALE



CALOTTE SPHÉRIQUE

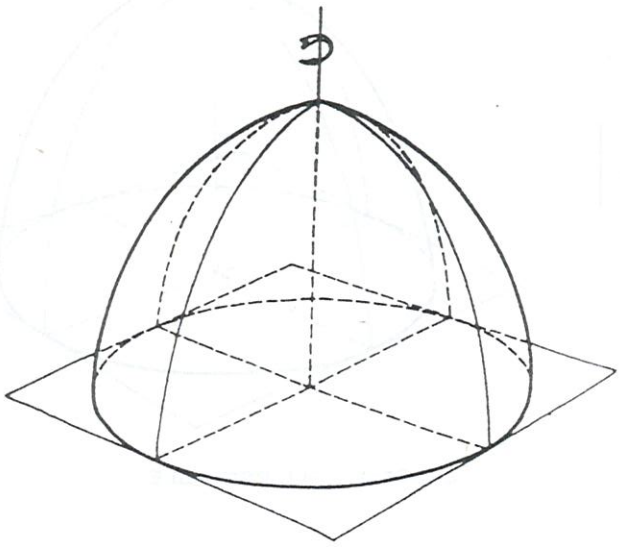


VOÛTE EN CUL-DE-FOUR

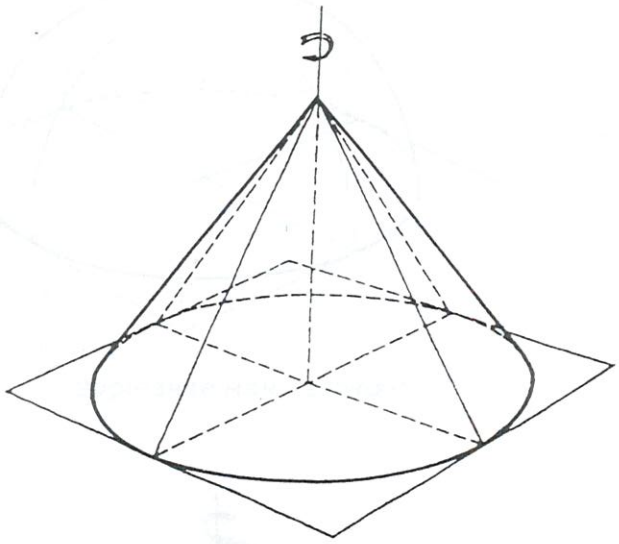
© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES : NOMENCLATURE ET TRACE

- COUPOLES OU VOUTES SIMPLES GENEREES PAR ROTATION D'UN CINTRE AUTOUR D'UN AXE VERTICAL :



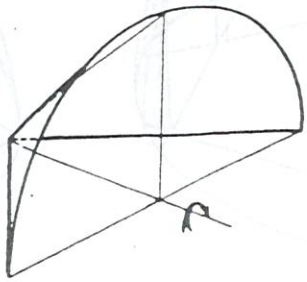
COUPOLE OGIVALE



COUPOLE CONIQUE

© CRATerre 86

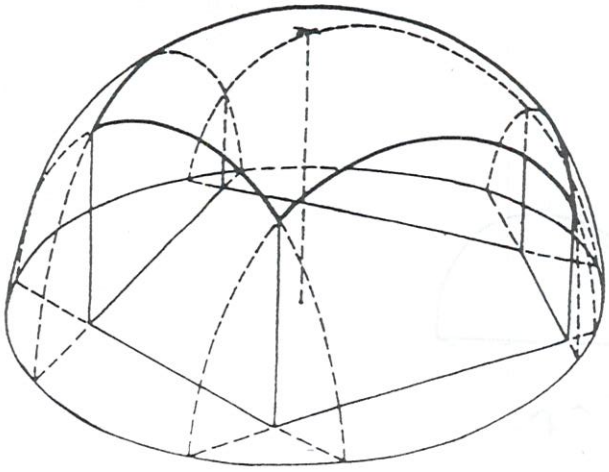
4 – VOUTES CONIQUES :



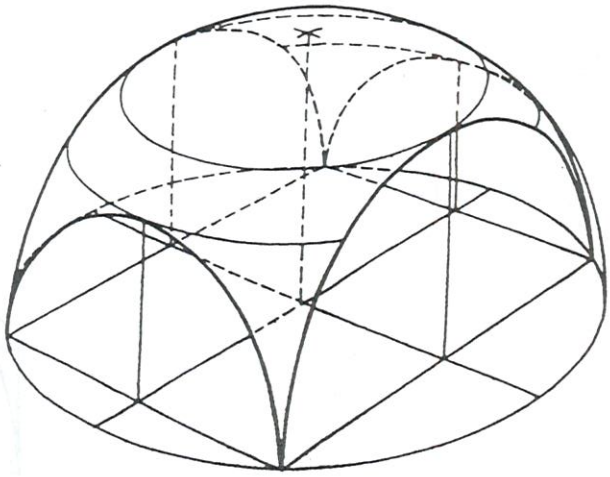
VOÛTE EN TROMPE D'ANGLE

© CRATerre 86

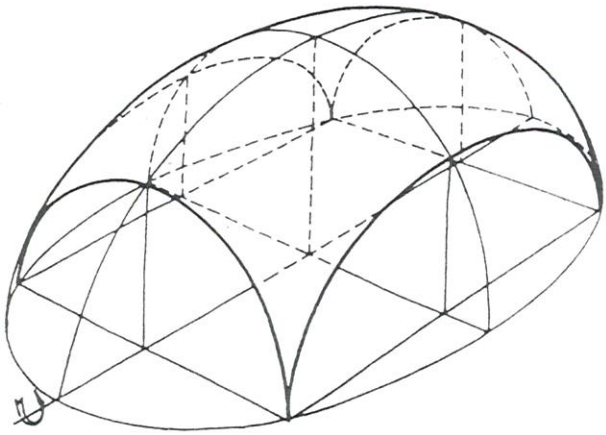
5 – INTERSECTION DE VOUTES SIMPLES PAR DES PLANS VERTICAUX :



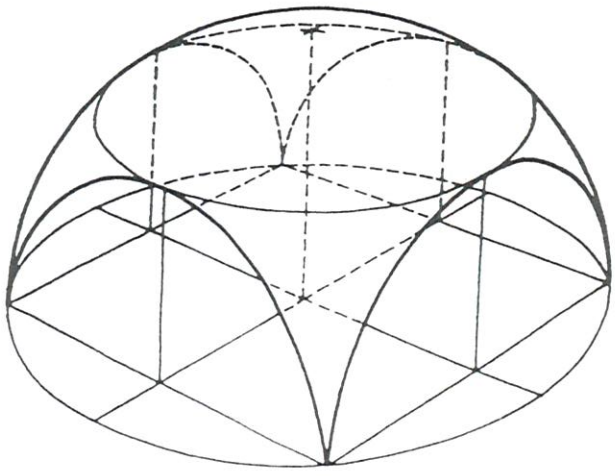
VOÛTE SPHÉRIQUE SUR PLAN POLYGONAL QUELCONQUE



VOÛTE SPHÉRIQUE SUR PLAN BARLONG



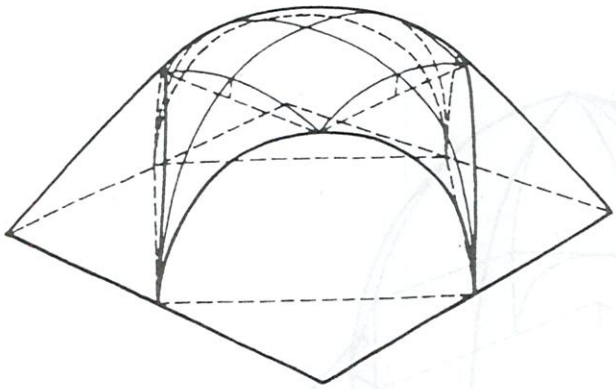
VOÛTE DOMICALE BARLONGUE (ELLIPSOÏDE)



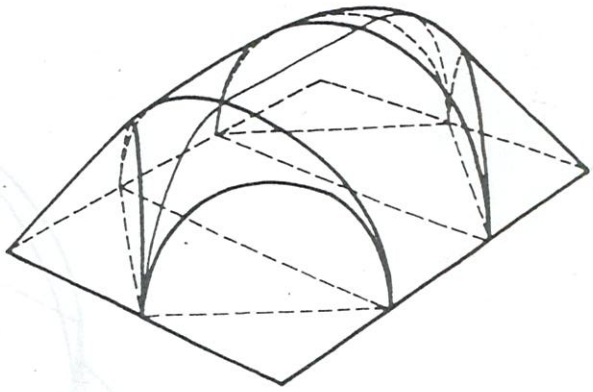
VOÛTE SPHÉRIQUE À PENDENTIFS

© CRATerre 86

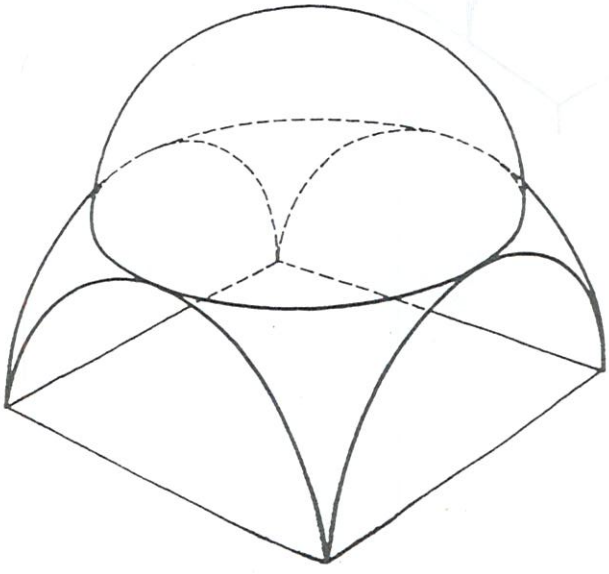
6 – VOUTES COMPOSEES :



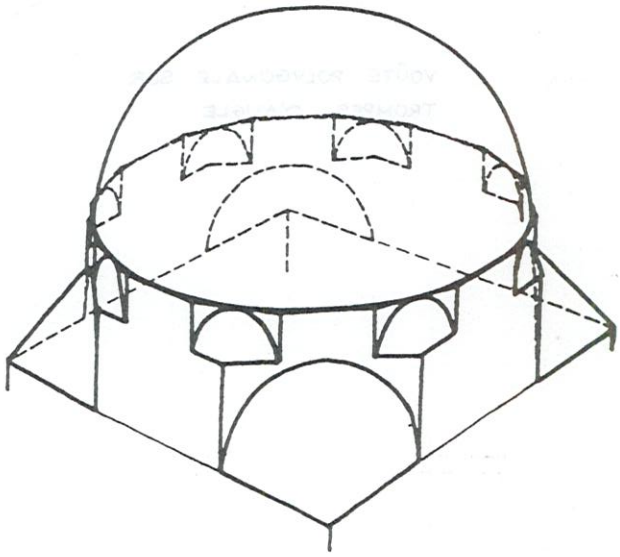
VOÛTE EN TROMPES D'ANGLE



VOÛTE EN NAVETTE



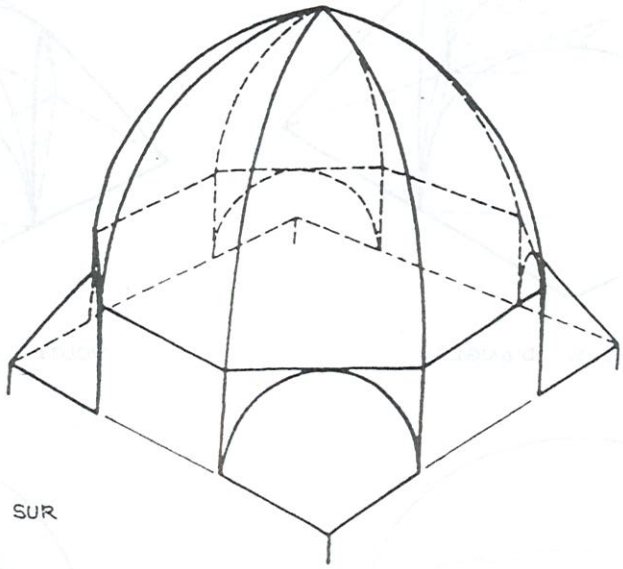
COUPOLE HÉMISPHÉRIQUE
SUR PENDENTIFS



COUPOLE HÉMISPHÉRIQUE
SUR TROMPES D'ANGLE

© CRATerre 86

- VOUTES COMPOSEES :



VOÛTE POLYGONALE SUR TROMPES D'ANGLE

© CRATerre 86

1 - JUSTIFICATION

La terre, quel qu'en soit le mode d'utilisation, se caractérise par une faible résistance mécanique, notamment en cisaillement, par une déformabilité importante et par une viscosité notable (fluage).

Dans ces conditions la résolution des problèmes de franchissement se révèle très délicate. Les arcs, voûtes et coupoles, privilégiant la résistance à la compression apparaissent comme des solutions plus adaptées. Les franchissements de type poutre droite ou dalle, mettant en jeu la résistance à la traction (flexion) et au cisaillement (effort tranchant), sont à l'évidence moins indiqués.

2 - DIMENSIONNEMENT DES ARCS

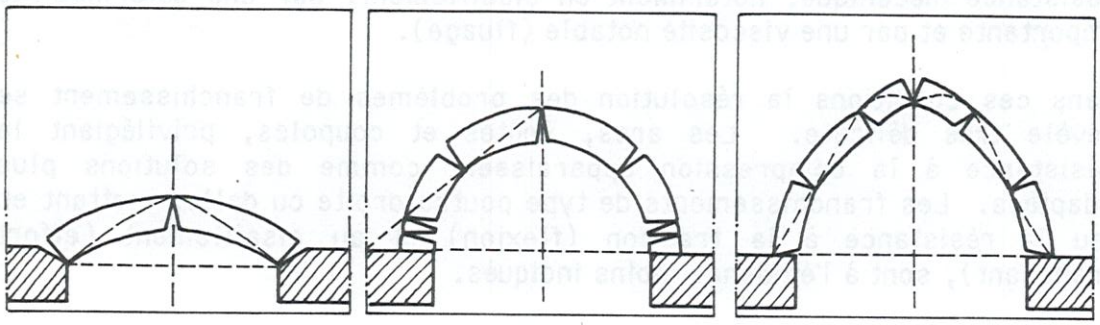
Le dimensionnement des arcs est un domaine qui, depuis fort longtemps, a été très étudié et ce par, entre autres, les plus grands physiciens (COULOMB, NAVIER, ...).

En effet la réalisation des voies de communication a nécessité la construction de nombreux ouvrages d'art, ponts et viaducs. Dans une époque plus récente, la construction des barrages-voûtes a justifié le développement de méthodes modernes, rigoureuses et efficaces de dimensionnement.

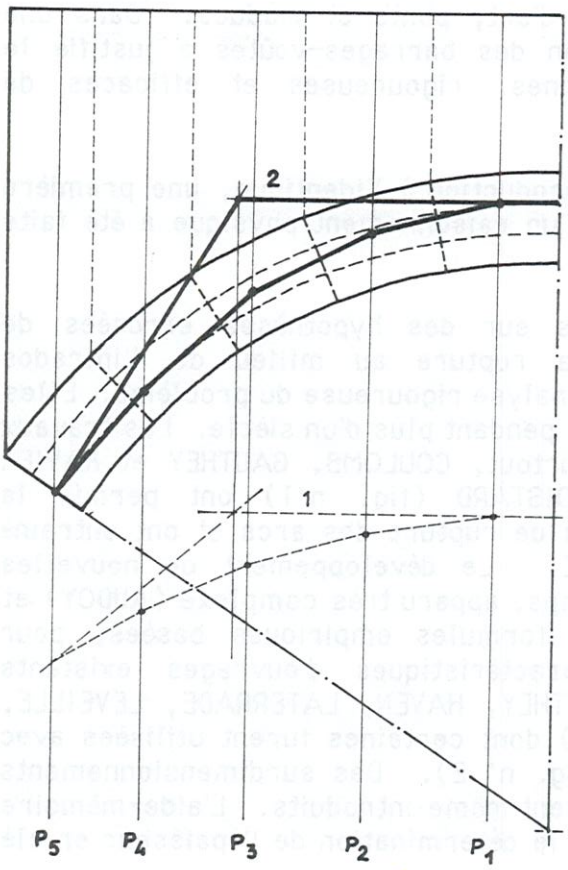
Après une très longue période de reproduction à l'identique, une première tentative de formulation appuyée sur un raisonnement physique a été faite au 18 ème siècle (LA HIRE 1715, ...).

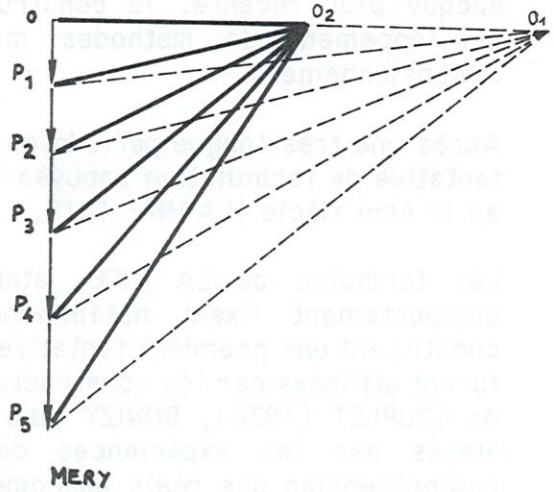
Les formules de LA HIRE, établies sur des hypothèses erronées de comportement fixant notamment la rupture au milieu de l'intrados constituent une première tentative d'analyse rigoureuse du problème. Elles furent utilisées par les constructeurs pendant plus d'un siècle. Les travaux de COUPLET (1830), DONIZY puis, surtout, COULOMB, GAUTHEY et NAVIER étayés par les expériences de BOISTARD (fig. n°1) ont permis la compréhension des réels phénomènes de rupture des arcs et ont entrainé l'abandon des formules de LA HIRE. Le développement de nouvelles formules, est, dans les premiers temps, apparu très complexe (AUDOY) et l'on vit l'utilisation de nombreuses formules empiriques basées, pour l'essentiel, sur l'analyse des caractéristiques d'ouvrages existants (DESNOYER, DESJARDIN, DUPUIT, GAUTHEY, HAVEN, LATERRADE, LEVEILLE, LESGUILLIER, PERRONET, SCHWARZ, ...) dont certaines furent utilisées avec bonheur jusqu'à l'époque actuelle (fig. n° 2). Des surdimensionnements prenant en compte les surcharges furent même introduits. L'aide-mémoire DUNOD "BATIMENT" de 1969 cite, pour la détermination de l'épaisseur en clé la formule suivante :

© CRATerre 86



Boistard.





MERY

ARCS, VOUTES ET COUPOLES DANS L'ARCHITECTURE DE TERRE — METHODES DE CALCUL

EPAISSEUR DE LA CLEF DE VOUTE — PLEIN CINTRE

NOM	FORMULES	PRECISIONS PARTICULIERES
PERRONNET	$e = 0.325 + 0.035\ L$	
LESGUILLIER	$e = 0.10 + 0.02\sqrt{L}$	
DUPUIT	$e = 0.2\sqrt{L}$	
DEJARDIN	$e = 0.3 + 0.05.L$	
GAUTHEY	$e = 0.33 + 0.21.L$	$L < 16$ m
	$e = 0.042\ L$	$16 < L < 32$
	$e = 0.67 + 0.021\ L$	$L > 32$
		ARCS DE CERCLES
HAVEN	$e = 0.25 + L\ (0.025 + 0.034\ \frac{L}{f})$	
LEVEILLE	$e = 0.33 + 0.033.\ L$	
DUPUIT	$e = 0.15\sqrt{L}$	
SCWARZ	$e = c + \frac{1}{21000}\ \frac{QL}{Tc.f}$	$f < \frac{1}{3} L$
	$e = c + \frac{1}{7\ 000}\ \frac{QL}{Tc.f}$	$f > \frac{1}{3} L$
		ELLIPSES
DUPUIT	$e = 0.2\sqrt{L}$	
DESNOYER	$e = 0.15 + 0.15\sqrt{L}$	

© CRATerre 86

EPAISSEUR DES CULEES	
	PLEIN CINTRE
LESGUILLIER	$E = \sqrt{L}\ (0.60 + 0.04\ h)$
LEVEILLE	$E = 0.30 + 0324 . \frac{L}{2} \sqrt{\frac{(h + \frac{L}{4})\ 1.73\ \frac{L}{2}}{(e + \frac{L}{4})\ H}}$
	ARCS DE CERCLES
LESGUILLIER	$E = \sqrt{L}\ (0.60 + 0.10\ (\frac{L}{f} - 2) + 0.04\ h)$
LEVEILLE	$E = 0.33 + 0.424\ \frac{L}{2} \sqrt{\frac{L.h}{H\ (f + e)}}$
	ELLIPTIQUES
LESGUILLIER	$E = \sqrt{L}\ (0.60 + 0.05\ (\frac{L}{f} - 2) + 0.04\ h)$
LEVEILLE	$E = 0.33 + 0.424\ \frac{L}{2} \sqrt{\frac{L.h}{H\ (f + c)}}$

IN. Cours de Construction
CEAA EAG. IUT GC GRENOBLE 1981.

© CRATerre 86

$$e = (O, N\,n)\,(1 + 1/10)$$

Où "l" est la portée, "N" la classe d'arc en fonction de la surcharge (de 1 à 4) et "n" l'inverse du surbaissement.

L'introduction de la notion de courbe de pression permit, avec l'aide de la statique graphique, l'avènement de méthodes numériques puis graphiques de dimensionnement et de vérification. (CARVALHO, DUPUIT, DURAND-CLAYE, MERY, SCHWEDLER, VILLARCEAU, ...) (fig. n°3).

Les méthodes modernes de la résistance des matériaux, facilitées par le développement des méthodes numériques offrent la possibilité de prendre en compte les déformations de la structure (BRESSE 1848, ...). Elles sont connues des concepteurs actuels et exposées très largement et de manière approfondie dans les traités de résistance des matériaux et de construction, il n'y a pas lieu d'y revenir ici.

3 - DIMENSIONNEMENT DES VOUTES

Pour le dimensionnement des voûtes, les notions appliquées pour les arcs demeurent très sensiblement valables dans la mesure où l'on peut assimiler une voûte à une juxtaposition d'arcs. On peut faire appel, pour de très gros ouvrages, aux développements modernes concernant notamment les plaques et coques.

4 - ASPECTS SPECIFIQUES DU BATIMENT EN MAÇONNERIE

La maçonnerie de pierres, blocs et briques relève de l'étude des structures composées par la juxtaposition de petits éléments. Dans ces conditions, aucune résistance en traction ne peut valablement être prise en compte. Les portées et charges demeurant en outre relativement faibles, il n'y a pas lieu d'entreprendre des calculs complexes. Les formules empiriques citées précédemment peuvent très bien convenir.

© CRATerre 86

Concernant la terre, nous avons signalé ci-dessus qu'il s'agit d'un matériau à faible résistance et forte déformabilité pouvant présenter une part importante de comportement visqueux. Si, dans l'ensemble, il peut et doit être traité comme tout autre matériau de maçonnerie, il conviendra cependant de veiller à limiter les portées et à choisir de préférence des géométries ne créant pas de sollicitations importantes de compression, et, surtout, de cisaillement (arcs surbaissés,...). On devra également apporter un soin tout particulier à la réalisation (mise en œuvre et décintrement) de ces ouvrages en n'utilisant que des matériaux ayant notamment subi une cure soignée évitant les effets du retrait. Il faut noter que, quel que soit le matériau, les arcs, les voûtes et les dômes sont toujours réalisés avec des éléments sélectionnés, plus résistants que le courant (CCTG n°64, chap. II, art. 20). La stabilité des appuis doit en particulier, être tout à fait bonne (fondations, culées et piedroits, ...).

5 - EXPERIMENTATION

Les essais d'arcs en terre pratiqués, en particulier au Département Génie Civil de l'Institut Universitaire de GRENOBLE, offrent à cet égard une illustration très démonstrative de ces derniers points. En effet, en ne considérant que l'analyse qualitative des ruptures obtenues, on constate systématiquement, ce qui n'est pas une nouveauté, le bon accord avec les expériences de BOISTARD et, surtout une ruine de l'ouvrage provoquée par l'écrasement des piedroits et favorisée par les défauts de réalisations (photographie ci-jointe).

M. DAYRE, P. ROLLET, MARS 1986.

© CRATerre 86

CLASSEMENT TYPOLOGIQUE ET PRECISIONS TERMINOLOGIQUES

La typologie illustrée que l'on propose dans cette étude couvre le registre des systèmes d'arcs, voûtes, coupoles et dômes dans l'architecture de terre traditionnelle autant qu'actuelle.

Dans le but de clarifier cette typologie, qui est illustrée par une grande variété d'exemples donnant des interprétations différentes de la conception et de la mise en œuvre, nous proposons ici une classification typologique volontairement simplifiée, réduite à trois familles principales :

1 - Arcs, voûtes et coupoles monolithiques,
2 - Arcs, voûtes et coupoles en maçonnerie,
3 - Arcs, voûtes et coupoles composites.

Par la suite, cette classification simple des systèmes s'enrichit de l'apport des différentes techniques de construction en terre utilisées pour leur construction et des différents modes de mise en œuvre. Cette classification est résumée par le tableau synoptique présenté ci-après.

En outre, pour bien arrêter une terminologie propre à la construction et à l'architecture en terre, nous rappelons les définitions des principales techniques de construction employées dans la construction des arcs, voûtes et coupoles en terre : en terre creusée, le façonnage direct, la bauge, le pisé, l'adobe et les blocs comprimés.

© CRATerre 86

CLASSEMENT TYPOLOGIQUE : TABLEAU SYNOPTIQUE SIMPLIFIE

ARCS	TECHNIQUES TERRE UTILISEES	MODES DE MISE EN ŒUVRE
MONOLITHIQUES	BAUGE TROGLODYTES PISE	FAÇONNES EN PLACE CREUSES DANS LA MASSE DAMES SUR CINTRE
MAÇONNERIE	ADOBE BLOCS COMPRIMES	APPAREILLES SUR CINTRES (ARCS CLAVES) MIS EN ŒUVRE SANS CINTRE (ENCORBELLEMENT)
COMPOSITES	TERRE + BOIS TERRE + ROSEAUX LENGHE	FAÇONNES SUR ARMATURE

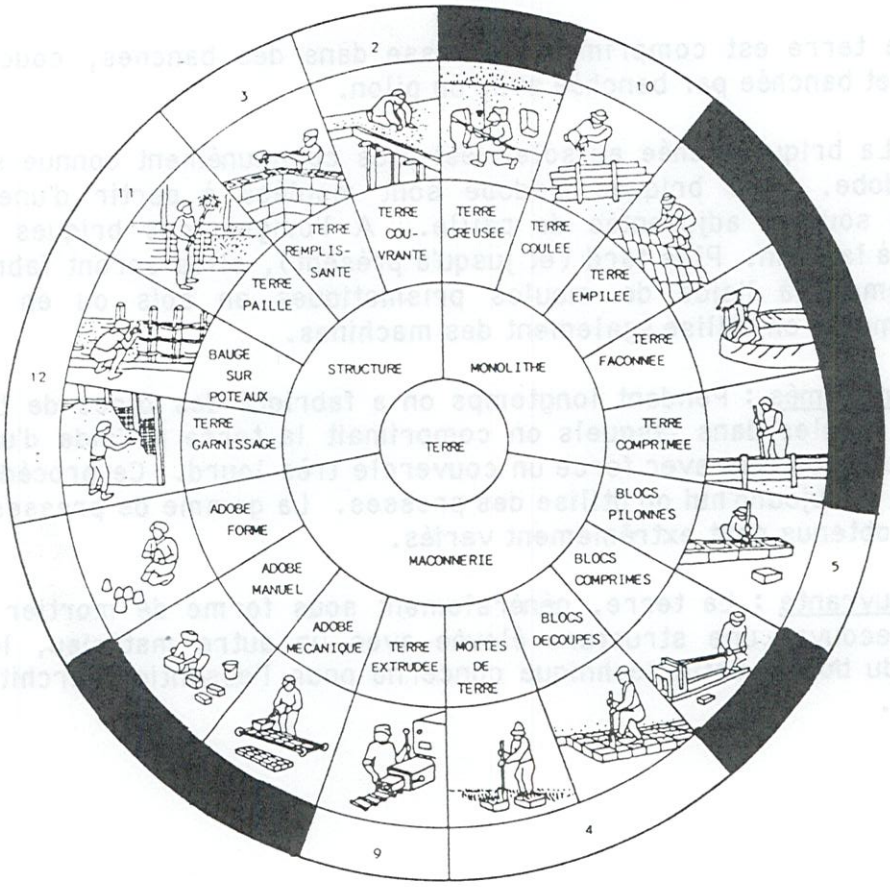
VOUTES ET COUPOLES	TECHNIQUES TERRE UTILISEES	MODES DE MISE EN ŒUVRE
MONOLITHIQUES	BAUGE POTERIE TROGLODYTES PISE	DIRECTEMENT FAÇONNEES CREUSEES DANS LA MASSE DAMEES SUR CINTRE
MAÇONNERIE	ADOBE BLOCS COMPRIMES	MISES EN ŒUVRE SUR CINTRE MISES EN ŒUVRE SANS CINTRE
COMPOSITES	TERRE + BOIS TERRE + ROSEAUX BRIQUES+BOIS(FER) TERRE PAILLE SAC + TERRE	FAÇONNEES SUR ARMATURES ET REMPLISSAGE MOULEES

© CRATerre 86

ARCS, VOUTES ET COUPOLES DANS L'ARCHITECTURE DE TERRE

TYPOLOGIE ILLUSTREE

La construction des arcs, voûtes et coupoles en terre n'exploite pas l'ensemble des techniques de construction en terre. En effet, parmi les 12 principales techniques connues, seulement six d'entre elles sont couramment employées. Celles-ci sont situées dans la rosace de l'ensemble des techniques connues :
terre creusée, terre empilée (bauge), terre façonnée (façonnage direct), terre comprimée (pisé), blocs comprimés et adobe. La terre couvrante constitue une septième technique qui ne concerne que les voûtes et coupoles composites (architecture primitive).



© CRATerre 86

TECHNIQUES DE CONSTRUCTION : RAPPEL DE DEFINITIONS

Terre creusée : Cette technique est tout autant utilisée pour les arcs, les voûtes et les coupoles qui sont directement creusés dans la masse ou l'épaisseur du matériau. La terre creusée concerne pour l'essentiel l'architecture de terre troglodytique.

Façonnage direct : Cette technique ancestrale est toujours utilisée. La terre est façonnée de la même façon que pour la technique de poterie, sans outils.

Bauge : Ce procédé consiste à empiler des boules grossières de terre, les unes sur les autres et de les entasser à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à en faire des murs monolithiques. Usuellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.

Pisé : La terre est comprimée en masse dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée avec un pilon.

Adobe : La brique séchée au soleil est plus communément connue sous le nom d'adobe. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre maléable souvent adjuventée de paille. A l'origine ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et jusqu'à présent), elles seront fabriquées manuellement à l'aide de moules prismatiques en bois ou en métal. Actuellement, on utilise également des machines.

Blocs comprimés : Pendant longtemps on a fabriqué des blocs de terre à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et aujourd'hui on utilise des presses. La gamme de presses et de produits obtenus sont extrêmement variés.

Terre couvrante : La terre, généralement sous forme de mortier ou de bauge, recouvre une structure élevée avec un autre matériau, le plus souvent du bois. Cette technique concerne pour l'essentiel l'architecture primitive.

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES

Trois modes de construction en terre permettent de réaliser des arcs monolithiques :

1 - La terre creusée, qui correspond principalement à l'architecture troglodytique mais qui est aussi employée dans l'architecture en bauge ou en pisé,

2 - La terre damée, qui correspond à l'architecture en pisé,

3 - La terre façonnée, qui correspond à l'architecture en bauge ou en façonnage direct.

Les arcs monolithiques en bauge, en façonnage direct ou en terre creusée sont généralement associés à la réalisation de petites ouvertures. On a pu par contre observer, au Maroc, des arcs monolithiques en pisé dont la portée est supérieure à 3 mètres.

Les formes des arcs monolithiques sont très variées, notamment en ce qui concerne les petites ouvertures (fenêtres, fenestrons, occuli ou niches). Les plus grandes portées adoptent le plus souvent la forme semi-circulaire ou légèrement surbaissée.

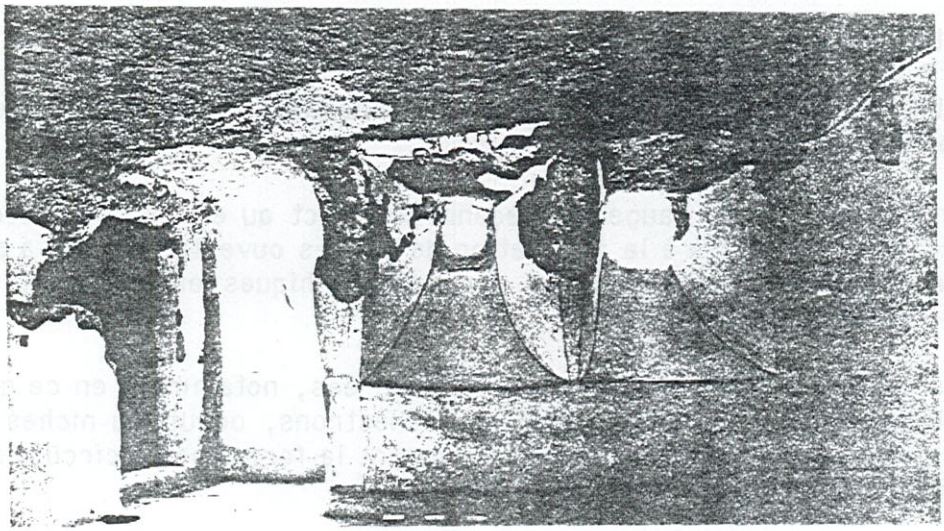
Techniques de construction : pour tous les modes de construction en terre évoqués, les arcs monolithiques peuvent être creusés ou découpés dans la masse du matériau. Pour le pisé et la bauge, les arcs peuvent être construits sur coffrage amovible ou perdu.

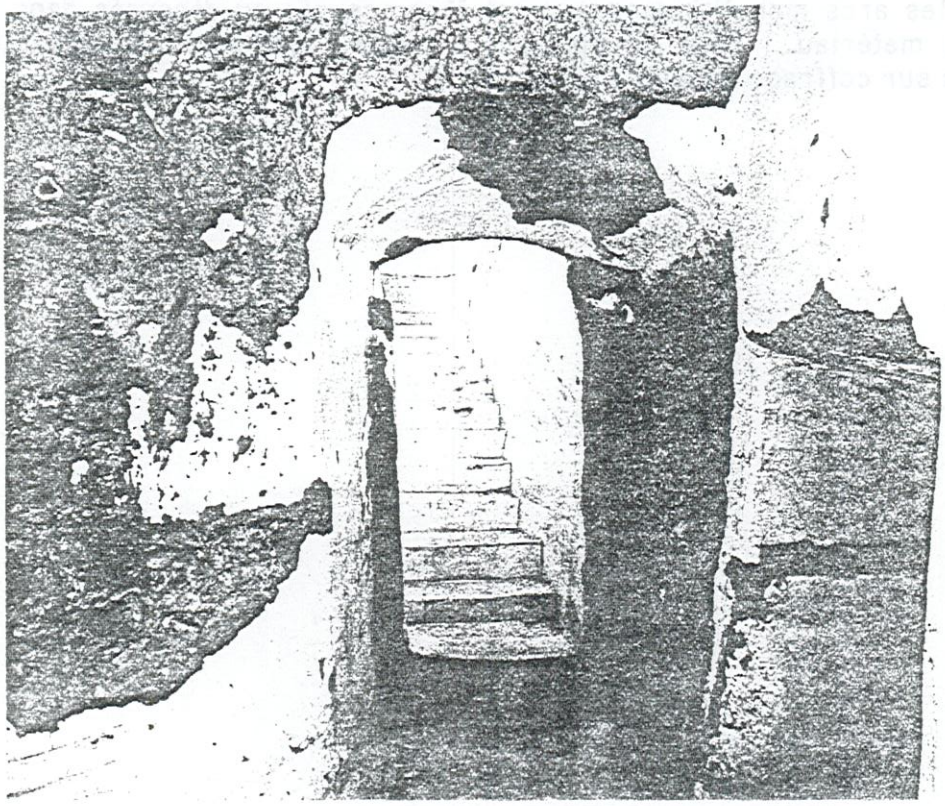
© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE CREUSEE

TYPOLOGIE EGYPTE

Arcs monolithiques surbaissés et occuli creusés.
Architecture troglodytique des ermitages chrétiens du désert d'Esna (6ème et 7ème siècles ap. J C.).





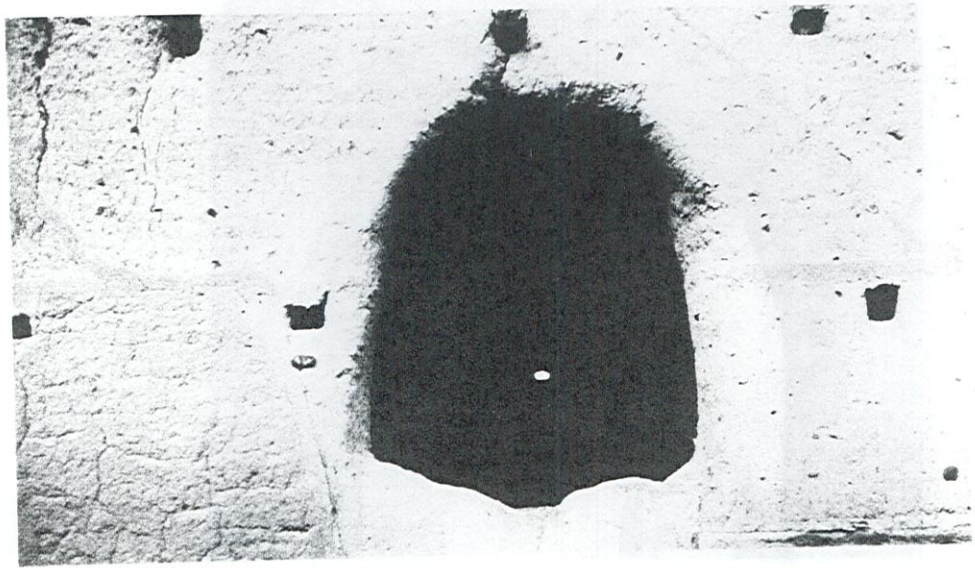
Réf. : SHUNERON, S. ; JACQUET, J. ; Les ermitages chrétiens du désert d'Esna, Institut Français d'archéologie orientale du Caire, Paris, 1972.

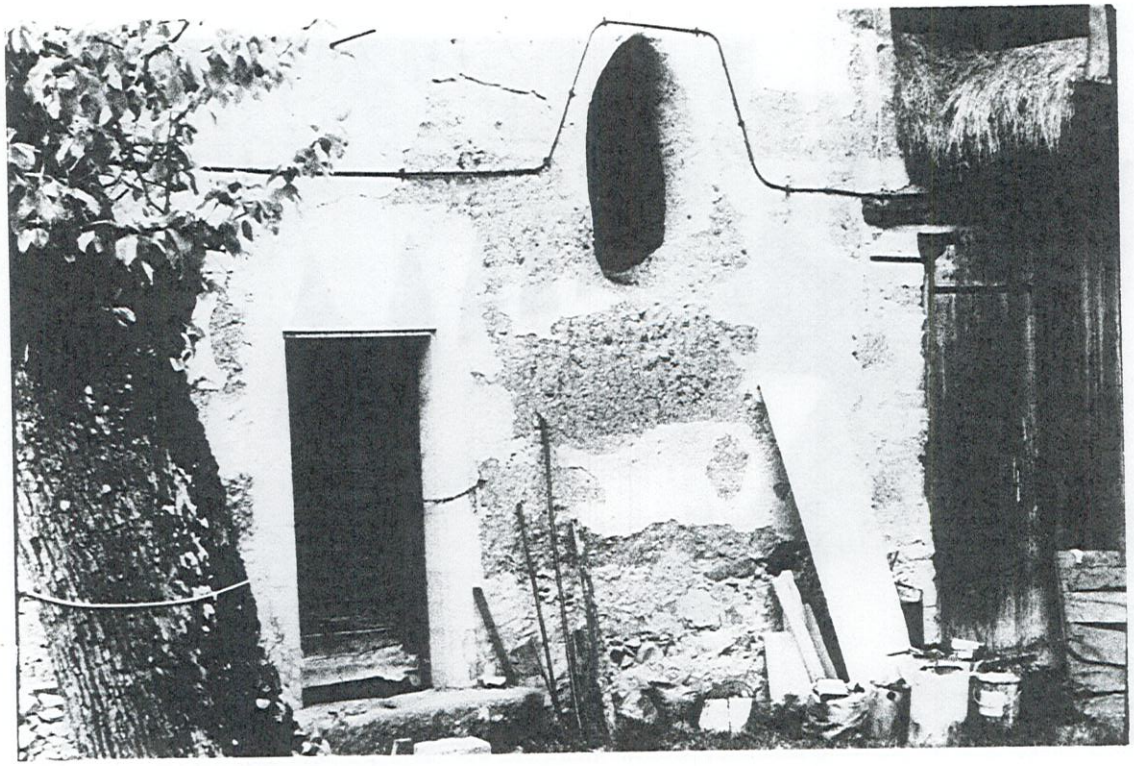
© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE CREUSEE

TYPOLOGIE FRANCE

Arcs monolithiques en pisé, creusés.
Architecture de bâtiments agricoles (granges) en pisé dans la région du Dauphiné. Ces petites ouvertures donnent accès aux fenières et permettent d'engranger le foin.





Réf. : Photographie CRATerre.

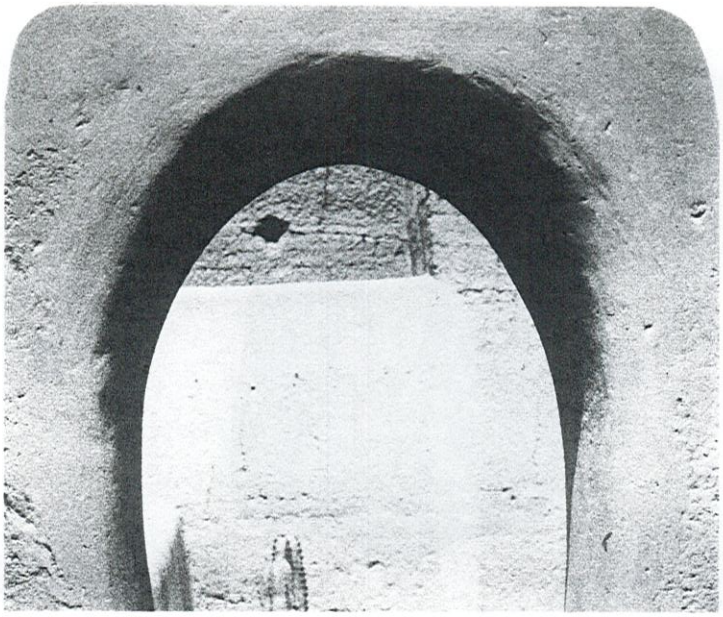
© CRATerre 86

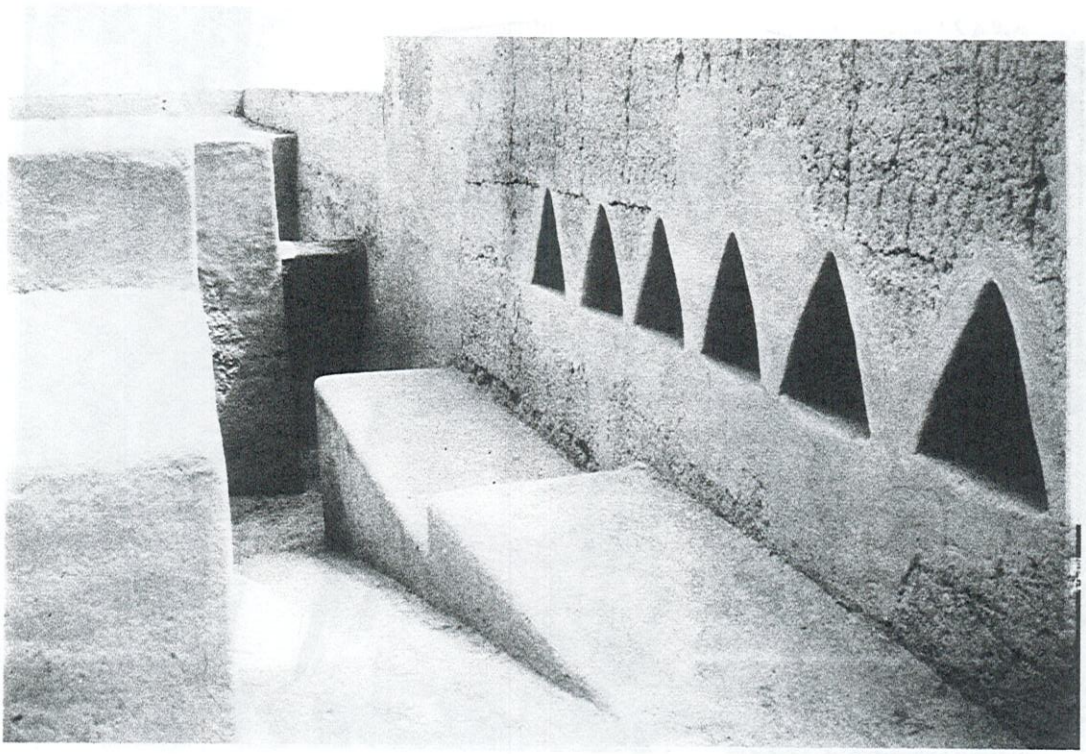
ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE CREUSEE

TYPOLOGIE PEROU

1 - Arc monolithique en pisé, creusé, légèrement surhaussé.

2 - Petites niches en arcs, en mitre, creusées. Architecture de l'époque Inca, vallée du Rimac.





Réf. : Photographie CRATerre (1 et 2)

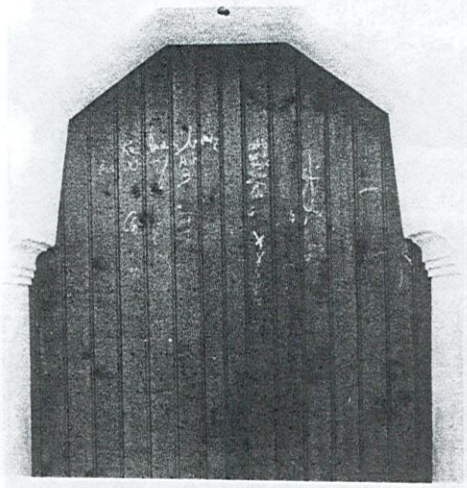
© CRATerre 86

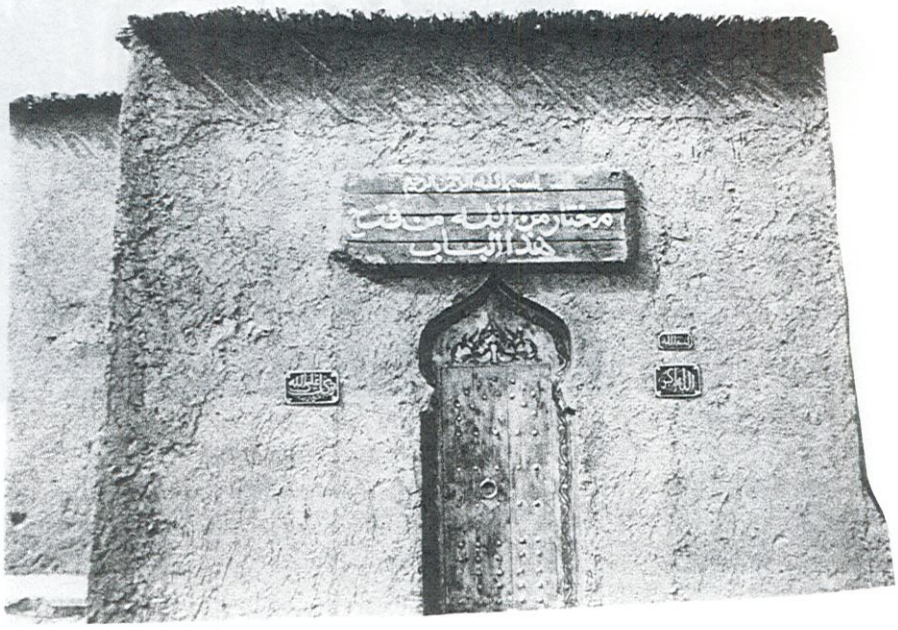
ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE CREUSEE

TYPOLOGIE MAROC

1 - Arc monolithique en pisé, vraisemblablement creusé. La forme est en accolades outrepassées. Habitation à Ouarzazate, Maroc.

2 - Arc monolithique en pisé dont la forme définitive est obtenue avec un enduit au plâtre. Habitation à Marrakech, Maroc.





Réf. : Photographies (1 et 2), DAVID, Th.

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

TYPOLOGIE MAROC

Arcs monolithiques en pisé, réalisés sur cintres. Ruines du palais impérial de Meknes, Maroc.

Réf. : PACCARD, A. ; Le Maroc et l'artisanat, tradition islamique dans l'architecture, Ed. Atelier 74, St Jorioz, 1980.

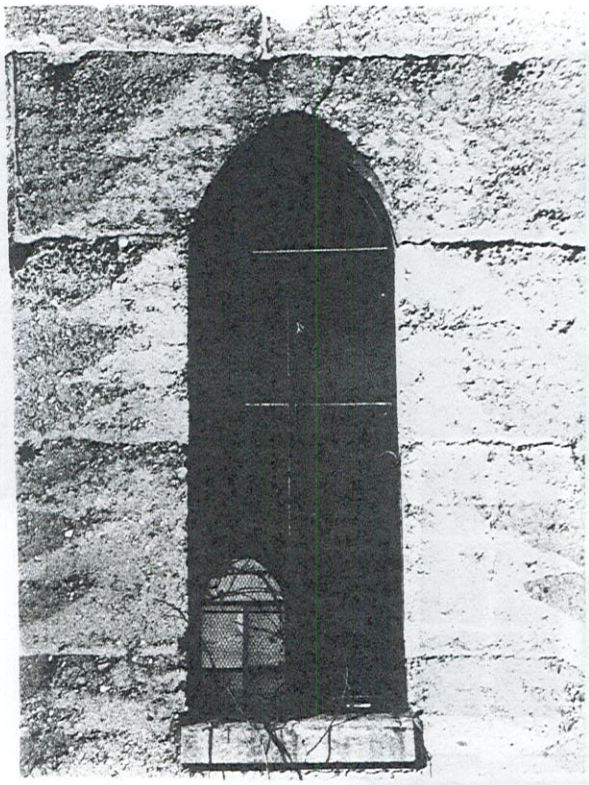
© CRATerre 86

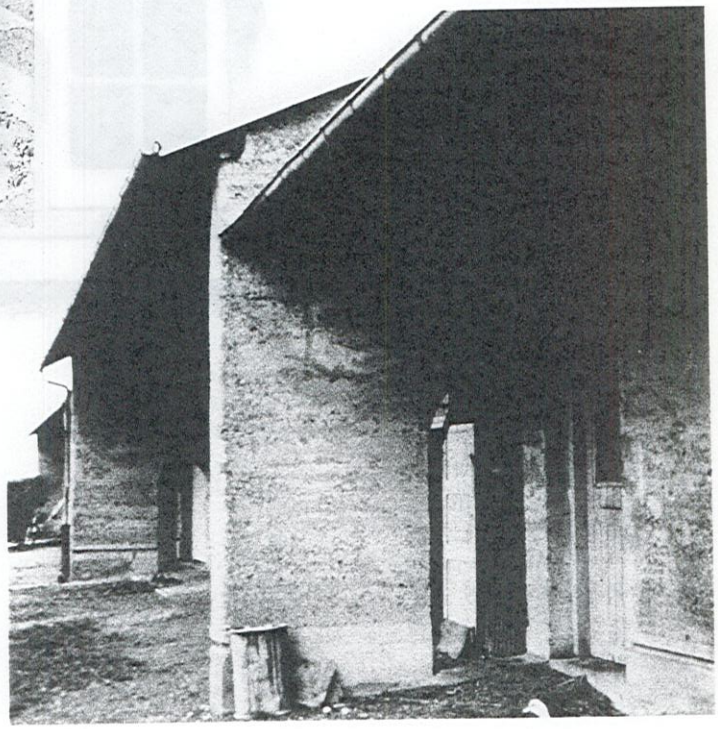
ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

TYPOLOGIE FRANCE

1 - Arc monolithique en pisé, de forme ogivale, réalisé sur coffrage. L'ensemble du tableau de l'ouverture est renforcé par un béton. Chapelle de Bordenou - la Chapite, Isère.

2 - Arc monolithique en pisé stabilisé, plein cintre, réalisé sur coffrage - Ferme Quesnel, près d'Amiens, projet expérimental M.R.U, 1945-46, architectes Paul Dufournet et Jean Bossu.





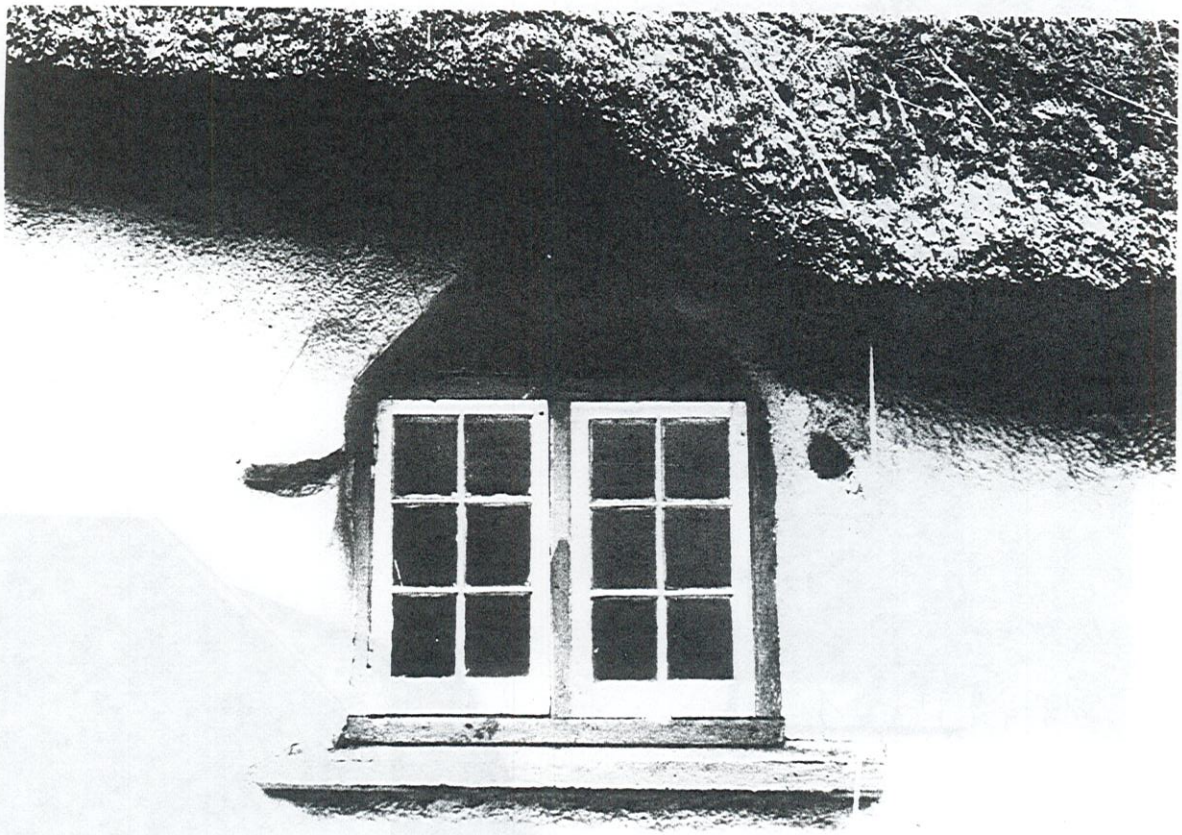
Réf. : Photographies CRATerre (1 et 2).

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE ANGLETERRE

Arc monolithique en "Cob" (bauge). Habitation de la Région du Devon, Angleterre.



Réf. : Photographie CRATerre.

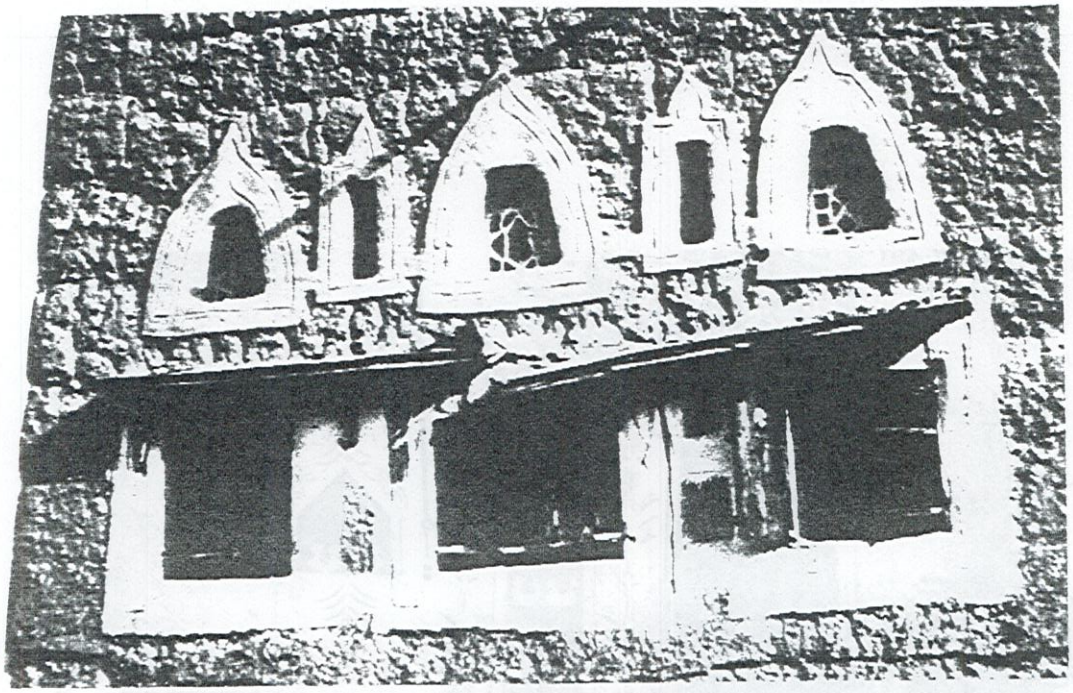
© CRATerre 86

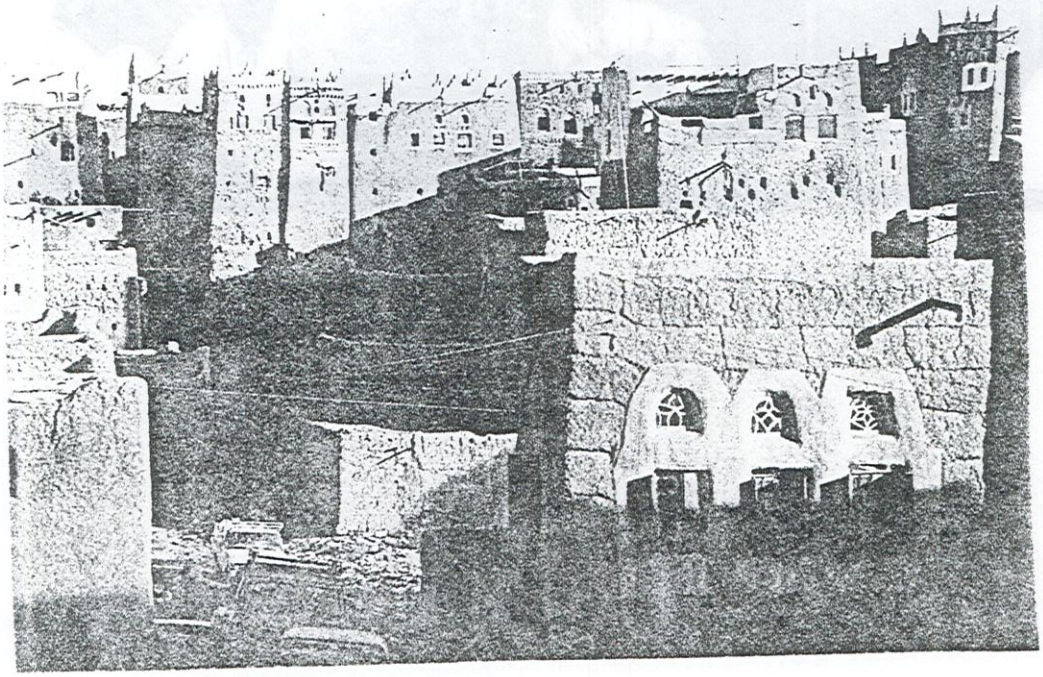
ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE YEMEN

1 - Petits arcs monolithiques en bauge, creusés, en couronnement de fenêtres. Architecture yéménite.

2 - Idem.





Réf. 1 : Photographie CRATerre

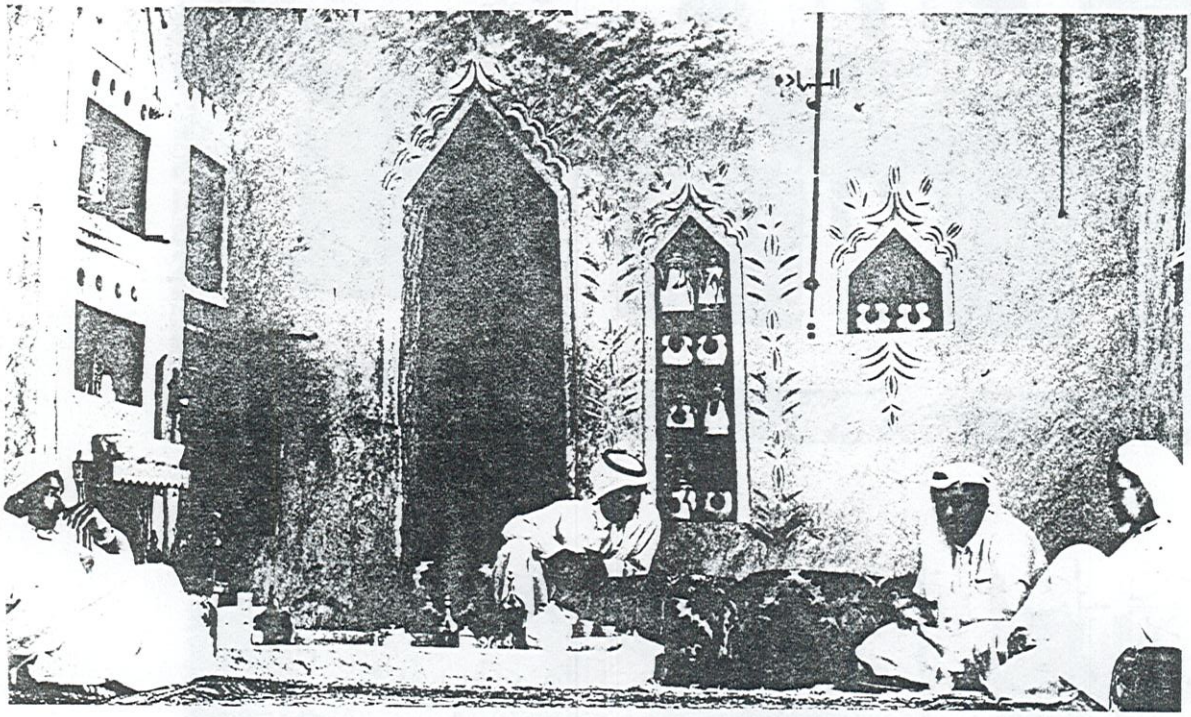
Réf. 2 : SCHNEIDER, J. ; Am Anfang Die Erde, Sanfter Baustofflehm, Ed. Fricke im Rudolf Müller Verlag, Francfort, 1985.

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE ARABIE SAOUDITE

Arcs en mitre, creusés ou façonnés. Intérieur d'une maison en bauge. Arabie Saoudite.



Réf. : DETHIER, J. ; Des architectures de terre, catalogue exposition C.C.I., Paris 1981.

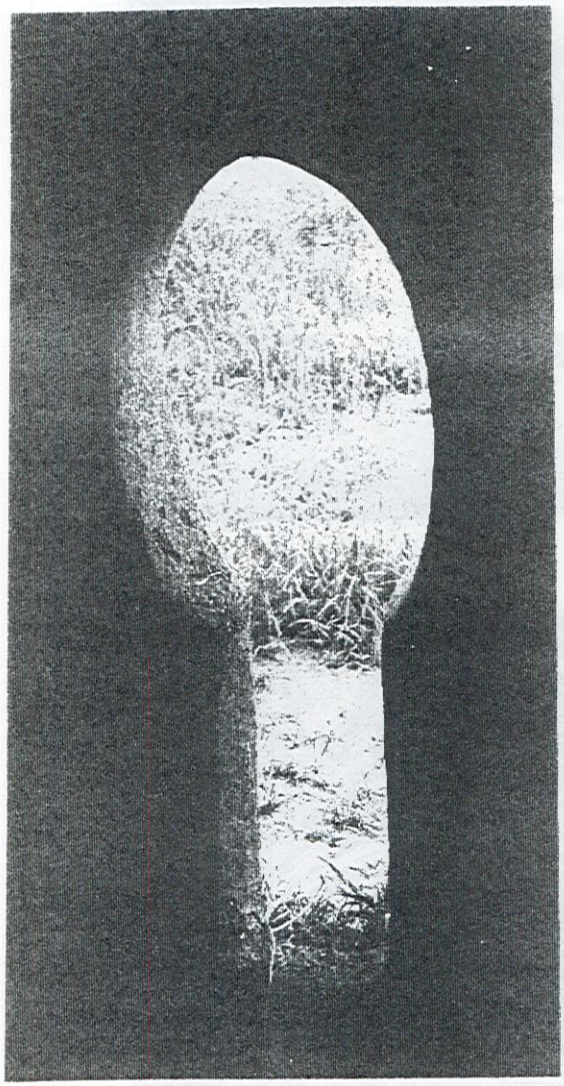
© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE CAMEROUN

1 - Arcs en façonnage direct. Entrées des cases-obus de l'ethnie Mousgoum du Nord - Cameroun.

2 - Idem.



Réf. 1 : Photographie CRATerre
Réf. 2 : Non identifiée, extrait d'une revue.

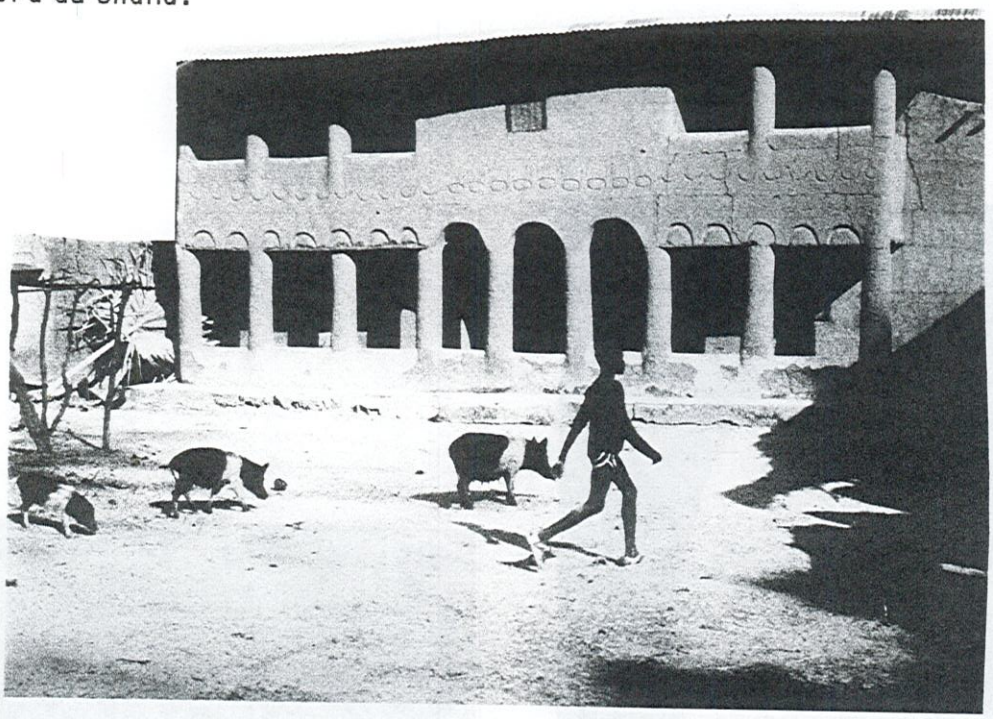
© CRATerre 86

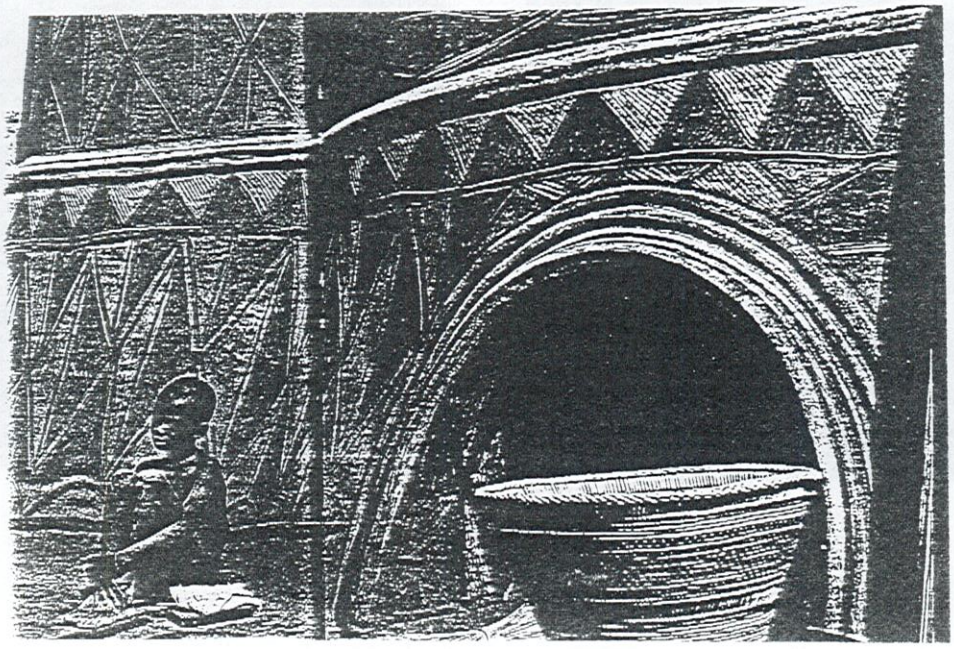
ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE SENEGAL ET GHANA

1 - Arcs monolithiques en bauge, creusés. Architecture des villages de la région de Casamance, Sénégal.

2 - Arc monolithique en façonnage direct. Architecture des fermes Lobi du nord du Ghana.





Réf. 1 : Photographie ORMEACHEA, P.
Réf. 2 : CHESI, G. : les derniers africains, Ed. Arthaud. Paris 1978.

© CRATerre 86

ARCS MONOLITHIQUES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE AUSTRALIE

Château de l'ours, construit par un berger en 1840, à Victoria. C'est le plus vieux bâtiment d'Australie. La technique utilisée est la bauge, les arcs ont dû être établis sur cintre.

Réf. : Photographie : Latrobe Library dans Adobe News n°14.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

Les arcs en maçonnerie de terre sont réalisés à l'aide de petits éléments, généralement des briques d'adobe ou des blocs de terre comprimée. Les briques sont bâties avec un mortier de terre stabilisée ou non, ou avec un mortier hydraulique courant (chaux, bâtard). Les arcs en maçonnerie de terre à petits éléments peuvent être aussi associés à d'autres techniques de construction en terre (pisé, bauge, p e.) pour la réalisation des baies.

On distingue deux techniques de construction :

1 - Les arcs en encorbellement : leur forme est donnée par la progression des éléments en surplomb, en assises horizontales successives.

2 - Les arcs clavés : les éléments sont généralement bâtis sur des cintres amovibles ou sur des coffrages perdus (support en maçonnerie en forme d'arcature ou précadre de menuiserie cintrée). Les arcs clavés sont caractérisés par la pose rayonnante des éléments par rapport à un ou plusieurs centre de génération de la forme de l'arc.

Dans l'architecture traditionnelle en briques d'adobe, les arcs maçonnés, clavés ou en encorbellement, adoptent des formes très variées. Ils sont généralement de petite portée mais on a pu observer des exemples de portées supérieures à 6 mètres. Aujourd'hui, la maçonnerie en blocs de terre comprimée stabilisée permet, grâce à la meilleure qualité des matériaux, d'augmenter la portée des arcs tout en adoptant de plus petites sections.

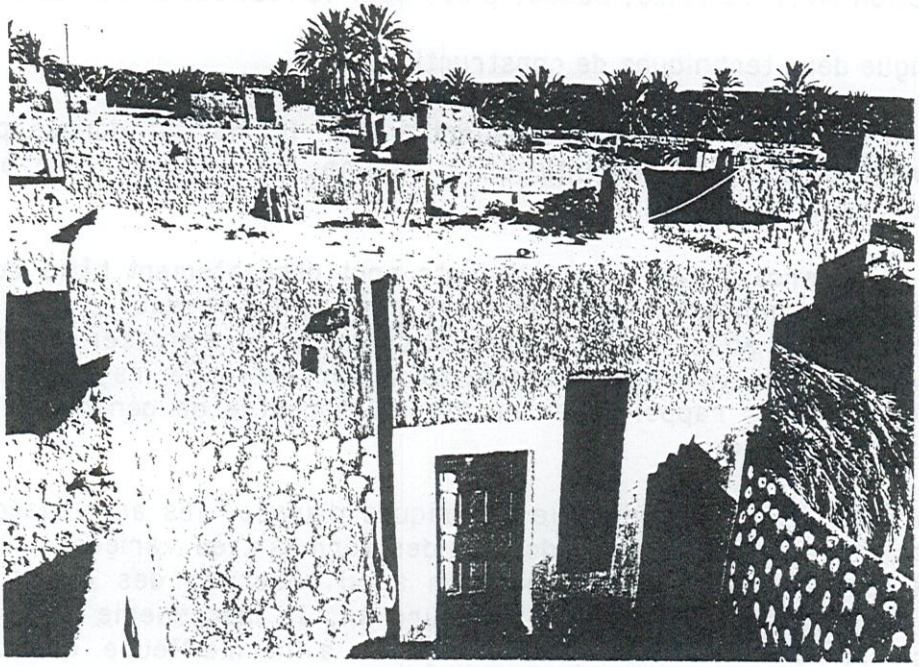
© CRATerre 86

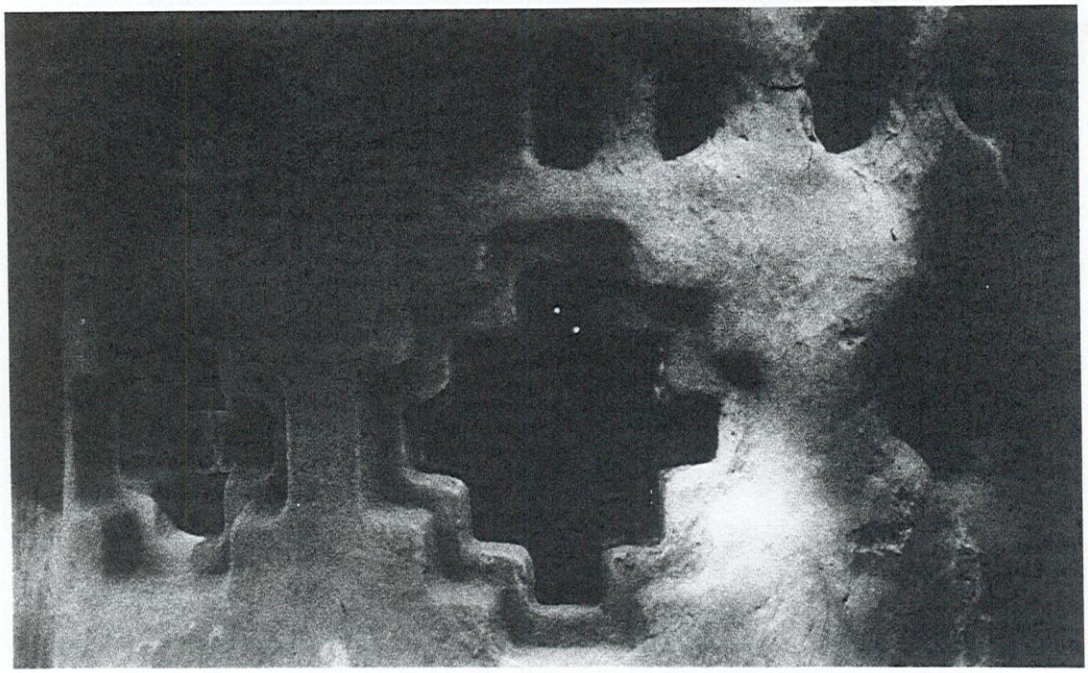
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAROC

1 - Arc en encorbellement sur ouverture réalisée dans un mur en pisé. Habitation à Maadid, Maroc.

2 - Petites ouvertures en encorbellement, vraisemblablement creusée et façonnée dans un mur en bauge.





Réf. 1 : BOURGEOIS, J.L., PELOS, C. ; Spectacular Vernacular, Peregrine Smith Books, Salt Lake City, 1983.

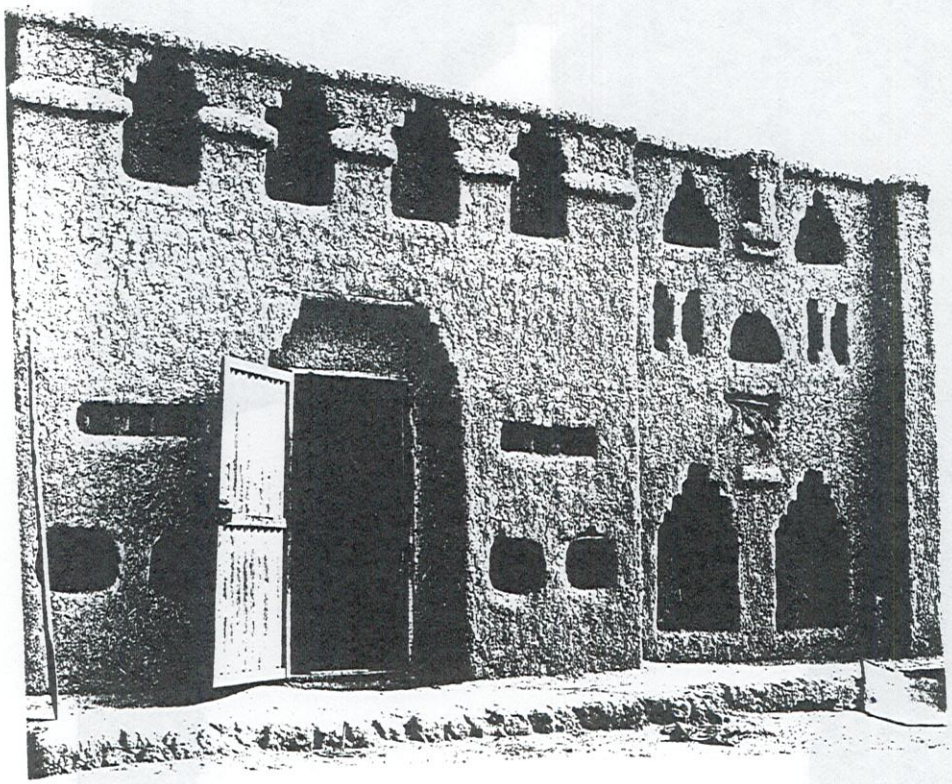
Réf. 2 : Doc. CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MALI

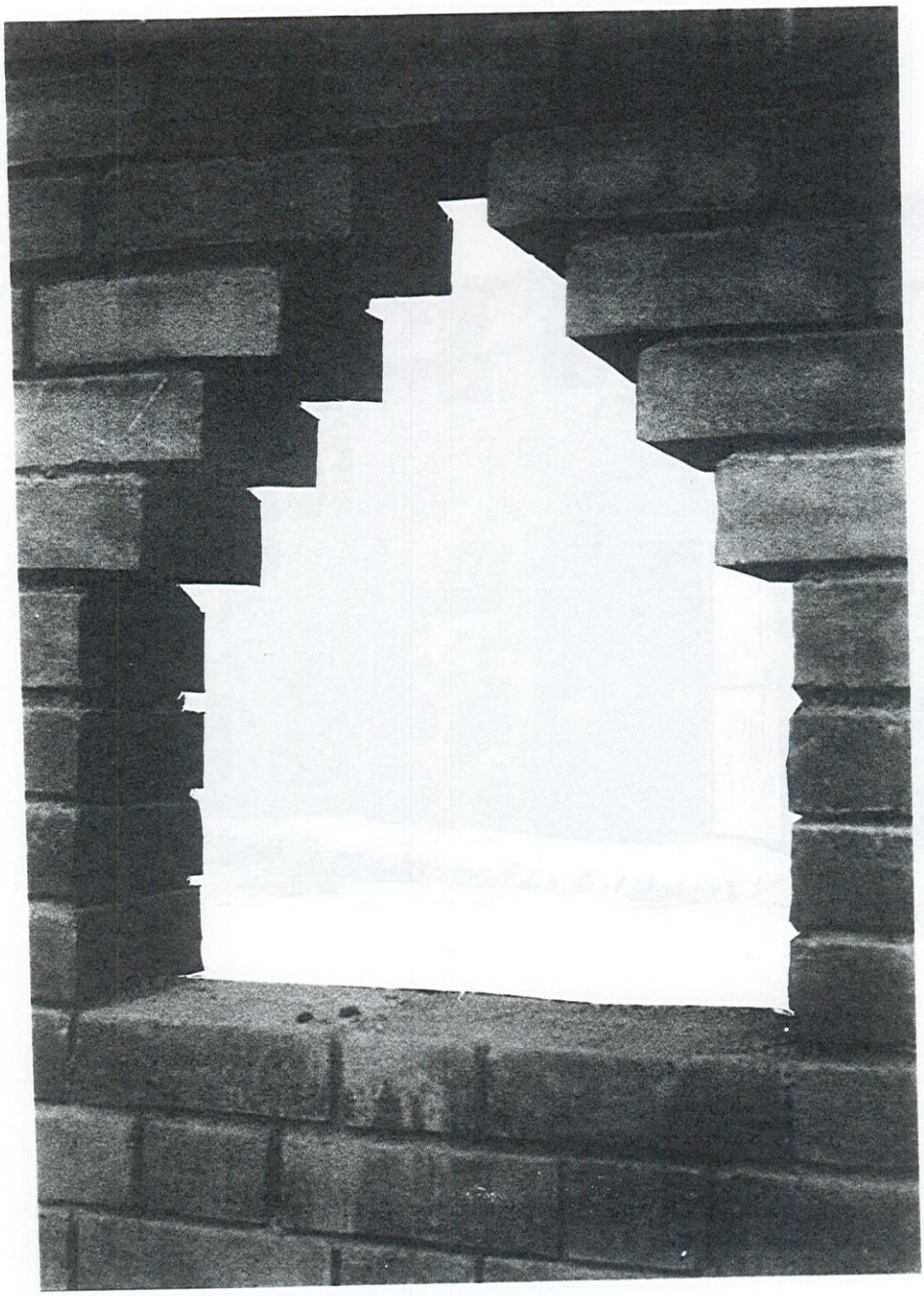
Arcs en encorbellement pour baies et niches décoratives réalisées dans une habitation urbaine en bauge du Mali. L'encorbellement peut être construit à l'aide d'adobes ou directement creusé et façonné dans la bauge. On observe aussi une arcature en encorbellement, au-dessus de l'entrée, permettant une réduction de la portée du linteau.



Réf. : BOURGEOIS, J. L., PELOS, C. ; Spectacular Vernacular, Ed. Peregrine Smith Books, Salt Lake City, 1983.

© CRATerre 86

- Arc en encorbellement, réalisé en blocs de terre comprimée - Espace de jeux pour enfants construit à Grenoble par le groupe "Pierres fendues".



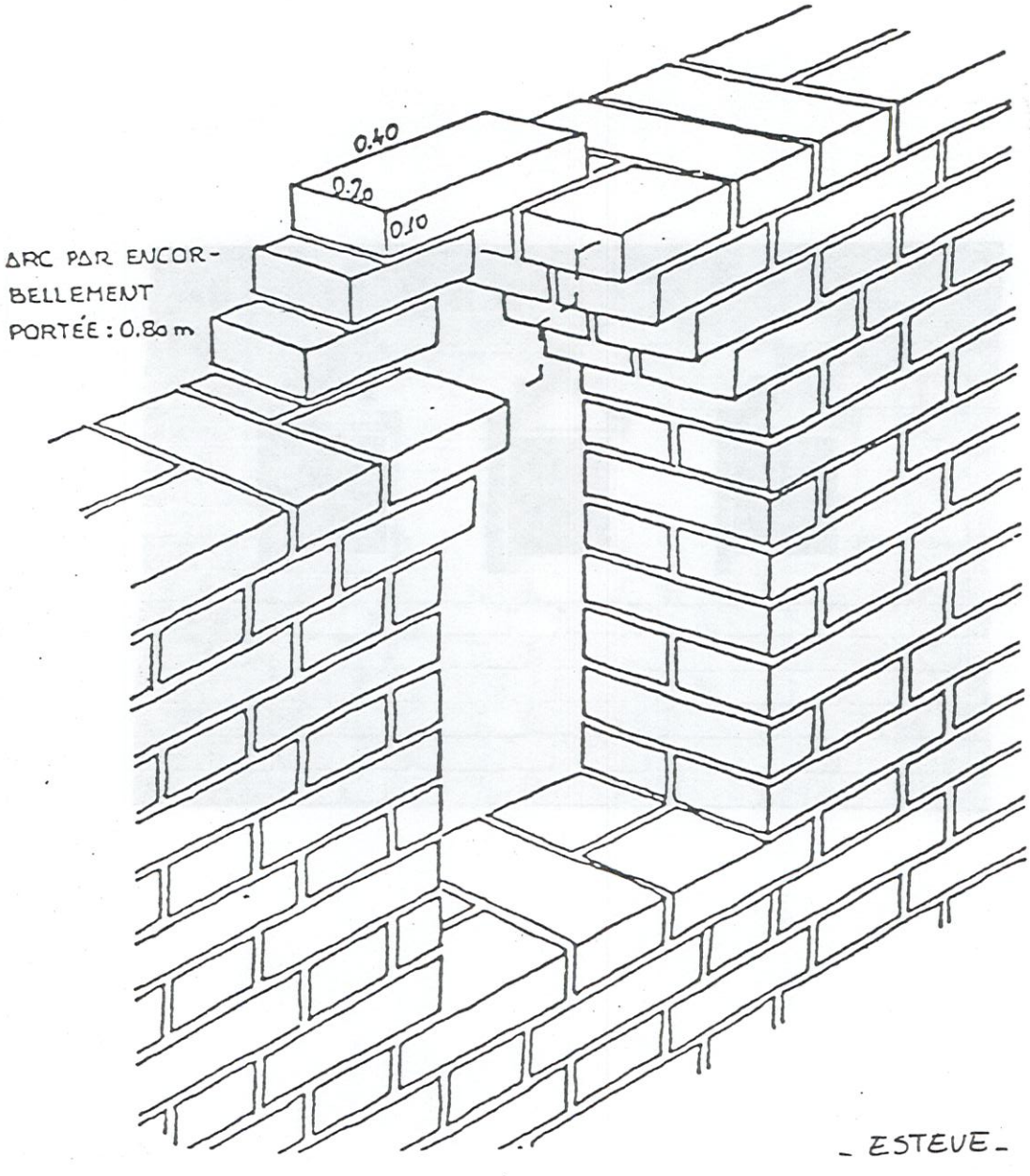
Réf. : Photographies CRATerre (1 et 2).

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAURITANIE

Arc en encorbellement, réalisé en blocs de terre comprimée. Projet d'habitat populaire de Rosso réalisé par l'ADAUA. Axonométrie de l'appareillage.



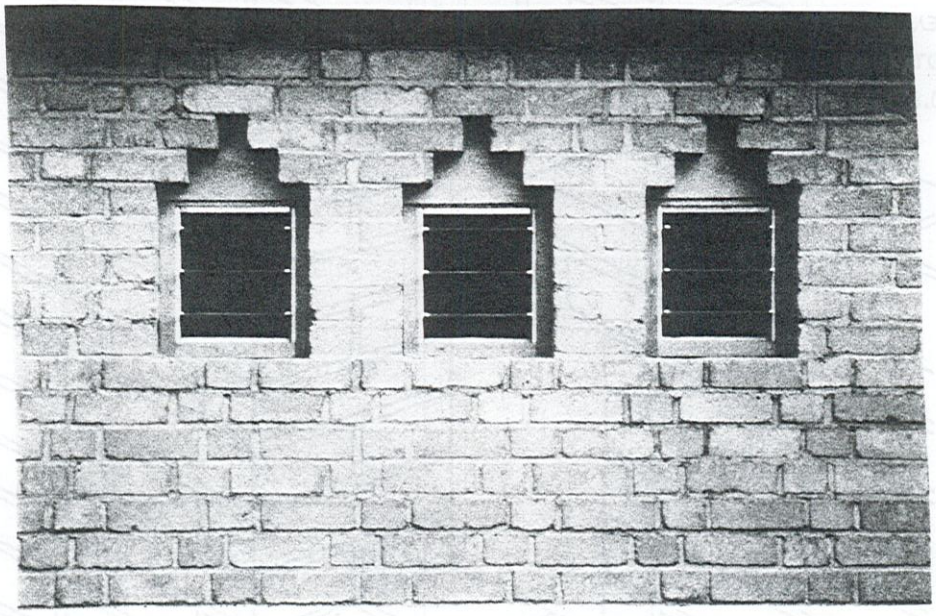
Réf. : Dessin de ESTEVE, J. , architecte.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAYOTTE

Arcs en encorbellement réalisés en blocs de terre comprimée stabilisée. Projet de logements à Passamainti, Mayotte, réalisé par le CRATerre et l'Ecole d'Architecture de Grenoble (1982).



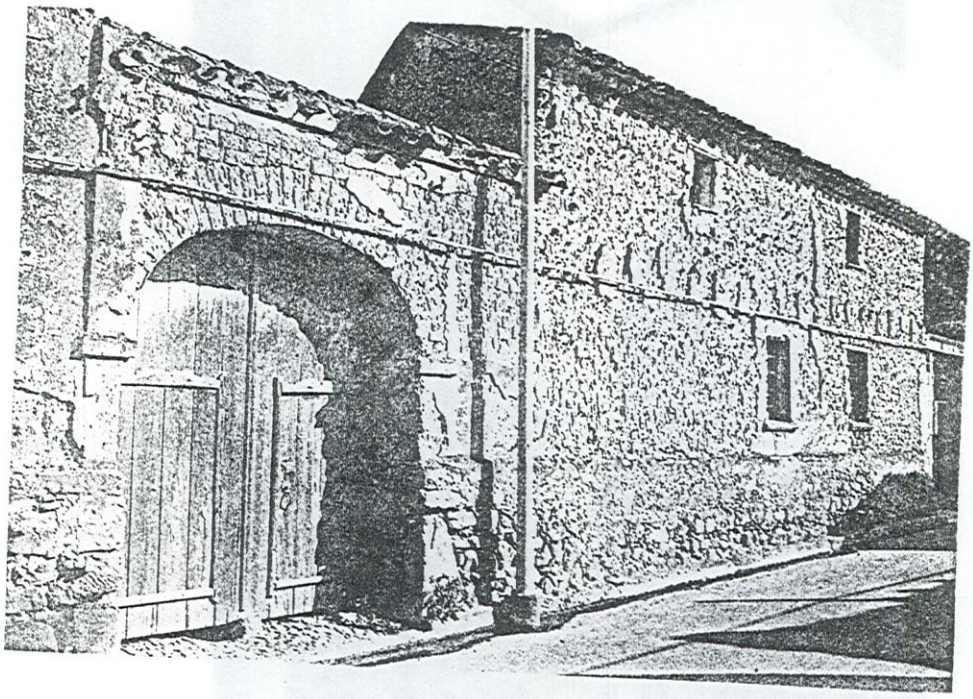
Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
ITALIE

Arc clavé en adobes, en anse de panier à 3 centres – Porche d'une habitation du XVIIIème siècle à San Sperate (Cagliari) Sardaigne, Italie.



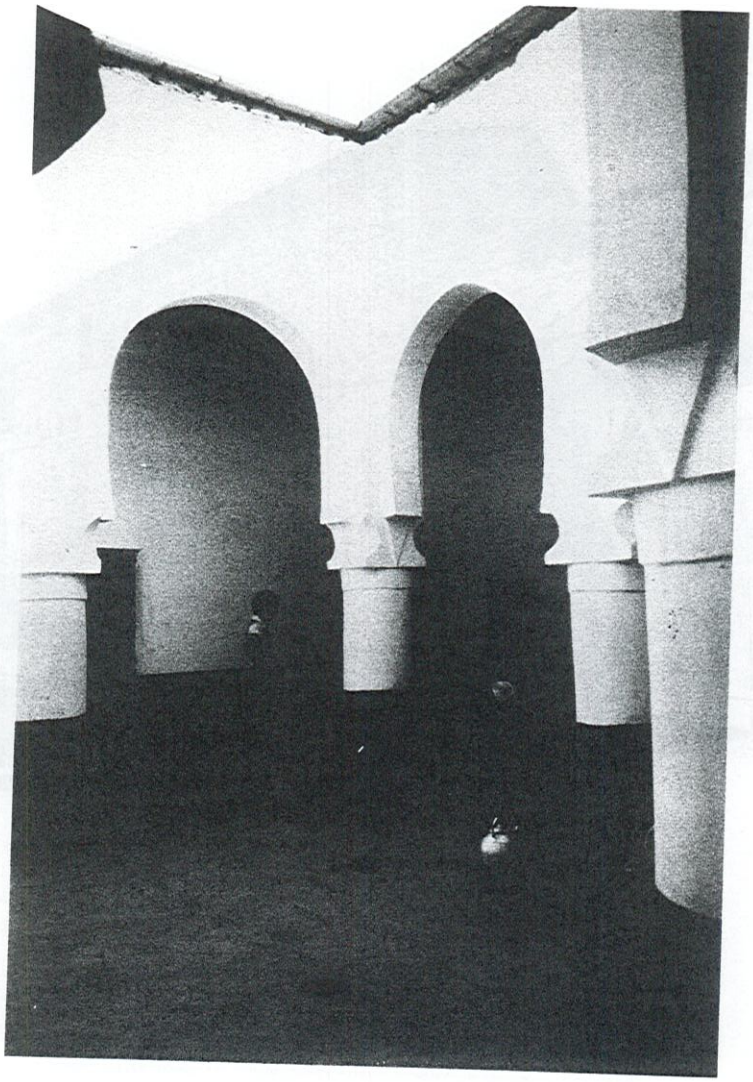
Réf. : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'architettura in terra cruda. Ed. Laterza. Rome, 1982.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAROC

Arcades clavées en briques d'adobe, de forme surhaussée. Intérieur d'un ksar du Sud marocain, vallée du Drâa.



Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

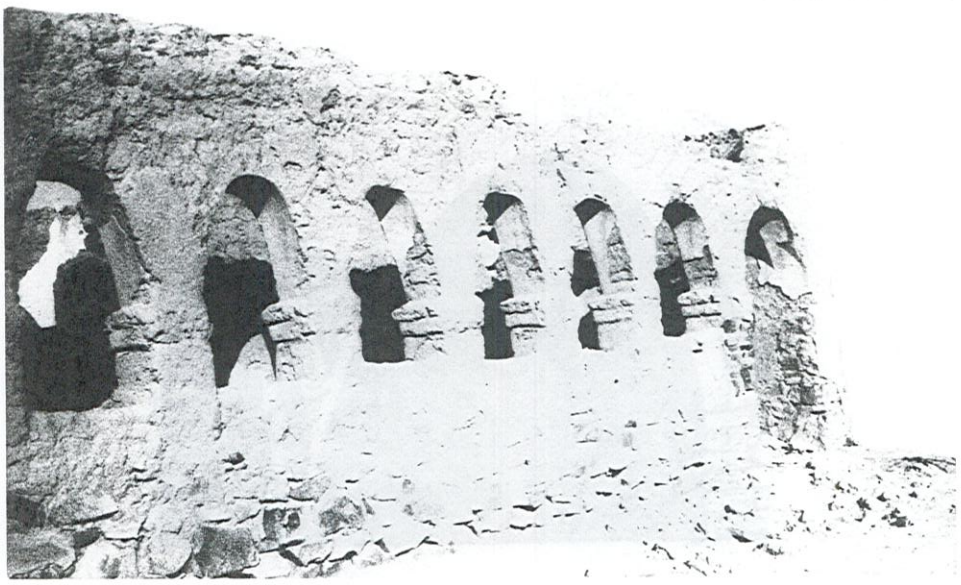
© CRATerre 86

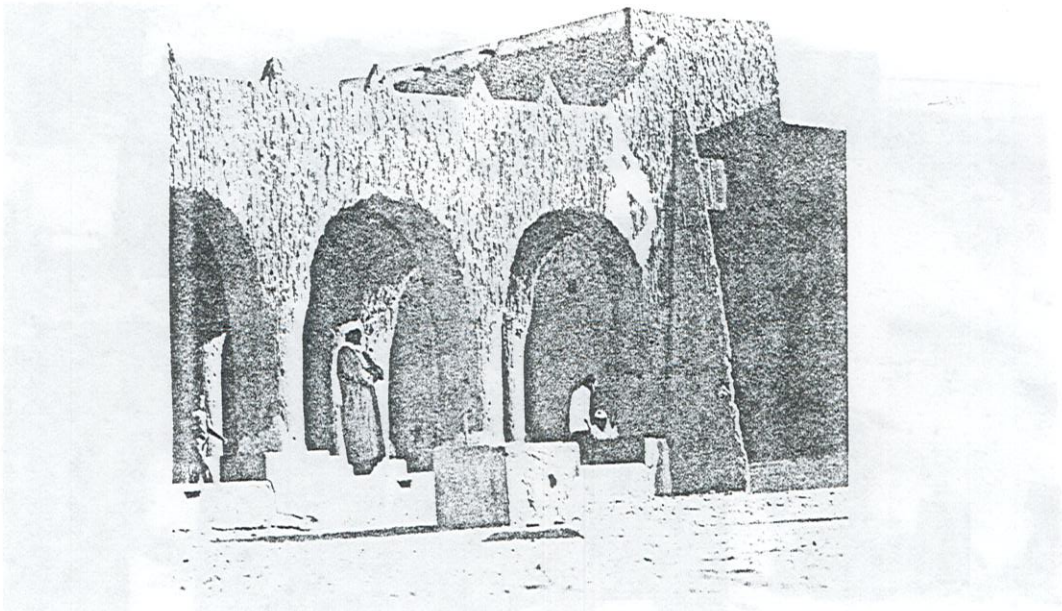
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
ALGERIE ET LYBIE

1 - Arcs clavés, réalisés en adobe, de forme surhaussée. Mosquée de Ksi-Ksou. Algérie.

2 - Arcades en adobes retaillées, Marché de Salah, Lybie.





Réf. 1 : Photographie CRATerre.

Réf. 2 : LANDER, H. ; NIERMANN, M. ; Lehm Architertur in Spanien und Africa. Ed. Karl Robert Langewiesche nachfolger, Hans Köster, Königstein im Taun - 1980.

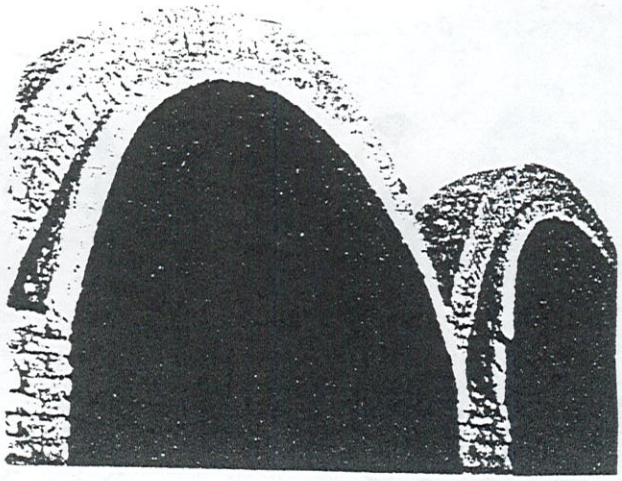
© CRATerre 86

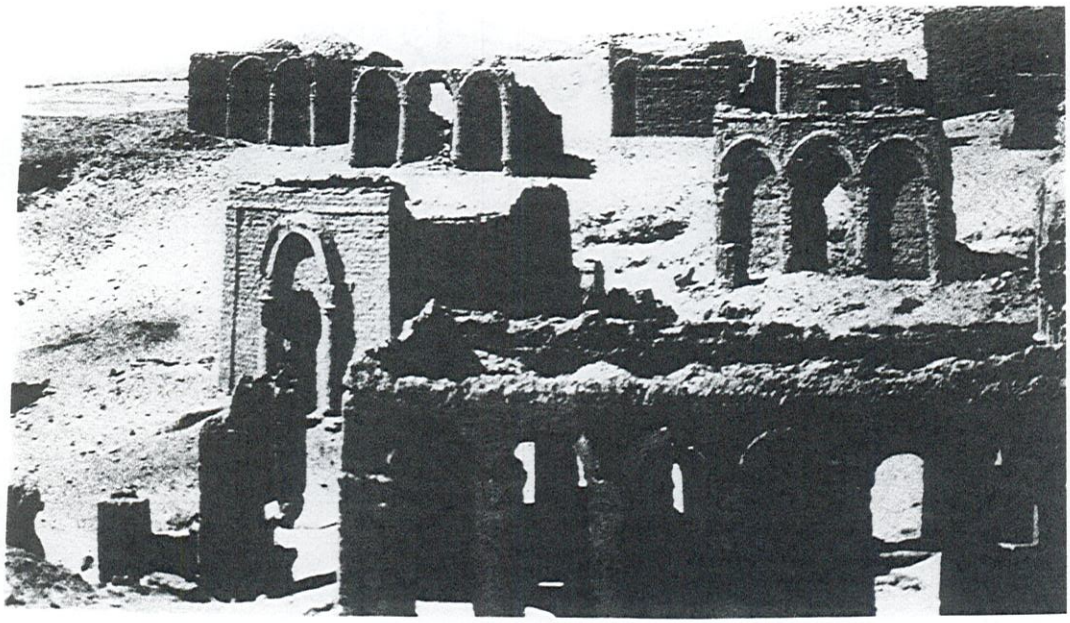
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
EGYPTE

1 - Arcs et arcatures clavés, en maçonnerie d'adobe, de forme plein-cintre ou plein-cintre surhaussé ou en ellipse haute approchant la chaînette. Tombeaux de la nécropole de Bagawat, oasis de Kharga, en Egypte, 4ème siècle ap. J.C.

2 - Arcs doubleaux en adobes, construits sur des berceaux pour renforcer leurs extrémités.





Réf. 1 : Photographie EVRARD, J. ; in des architectures de Terre, catalogue d'exposition du C.C.I., Paris, 1981.

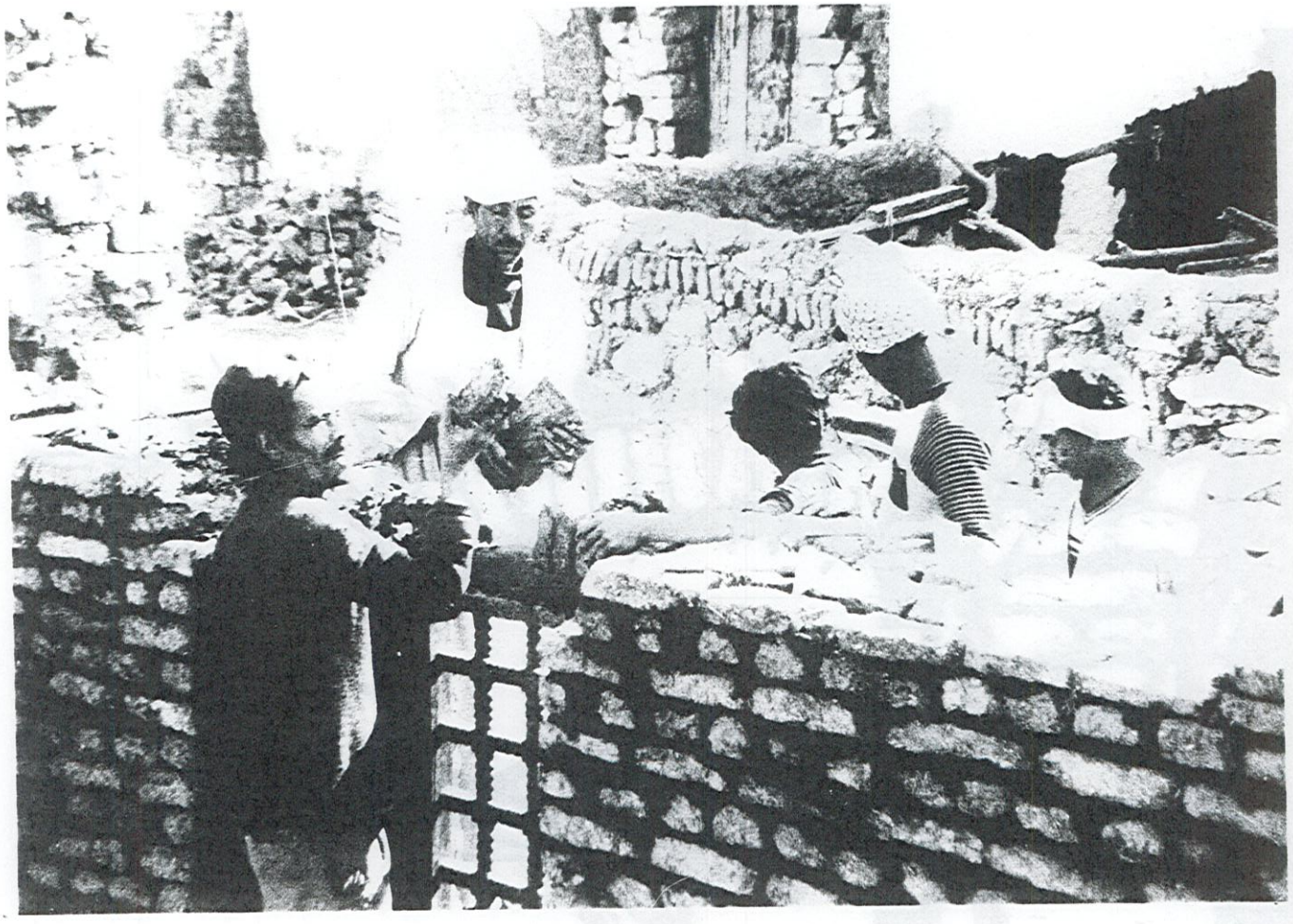
Réf. 2 : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre, 1984.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
EGYPTE

Construction d'un arc clavé surbaissé à deux rouleaux, en adobes. Le cintre est constitué par la menuiserie. Habitation en Nubie, Egypte.



Réf. : Photographie MOUSTAADER, A.; Mission CRATerre 1984.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
EGYPTE

Construction du deuxième rouleau d'un arc clavé en adobes, surbaissé. Le haut de la menuiserie, de forme adaptée, sert de coffrage. Habitation en Nubie, Egypte.

Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; Mission CRATerre, 1984.

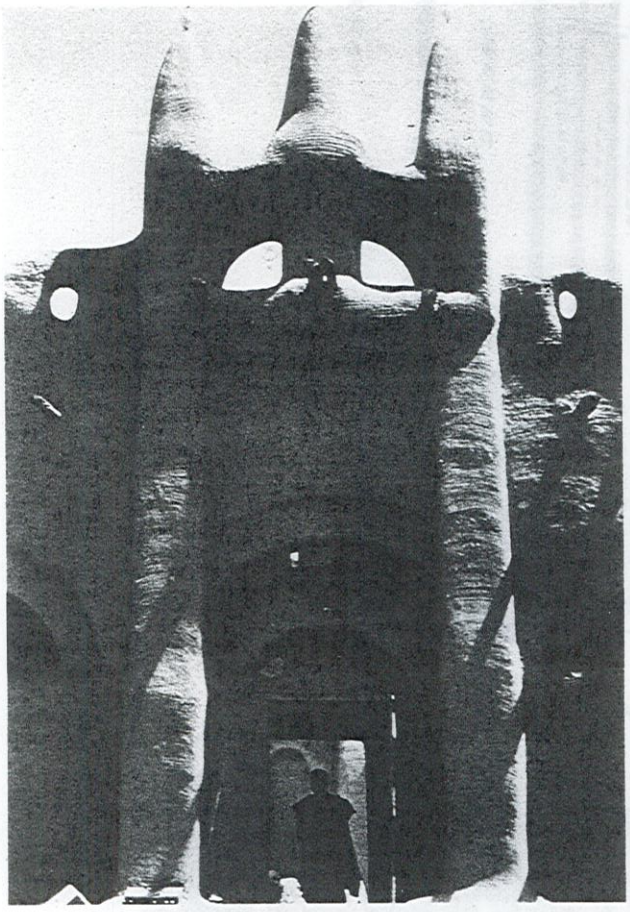
© CRATerre 86

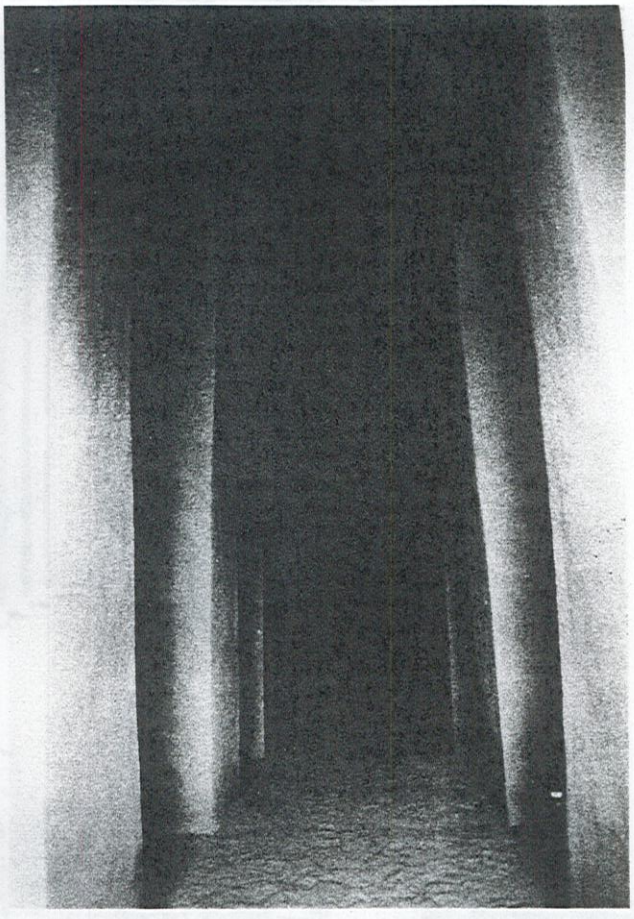
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MALI

1 - Entrée de la mosquée de San, Mali. Arcs clavés pleins cintres surbaissés, en adobes, dont la finition est façonnée en bauge et en mortier de terre.

2 - Intérieur de la mosquée de Djenné, Mali. Arcs en adobes, coffrés, en forme de lancette.





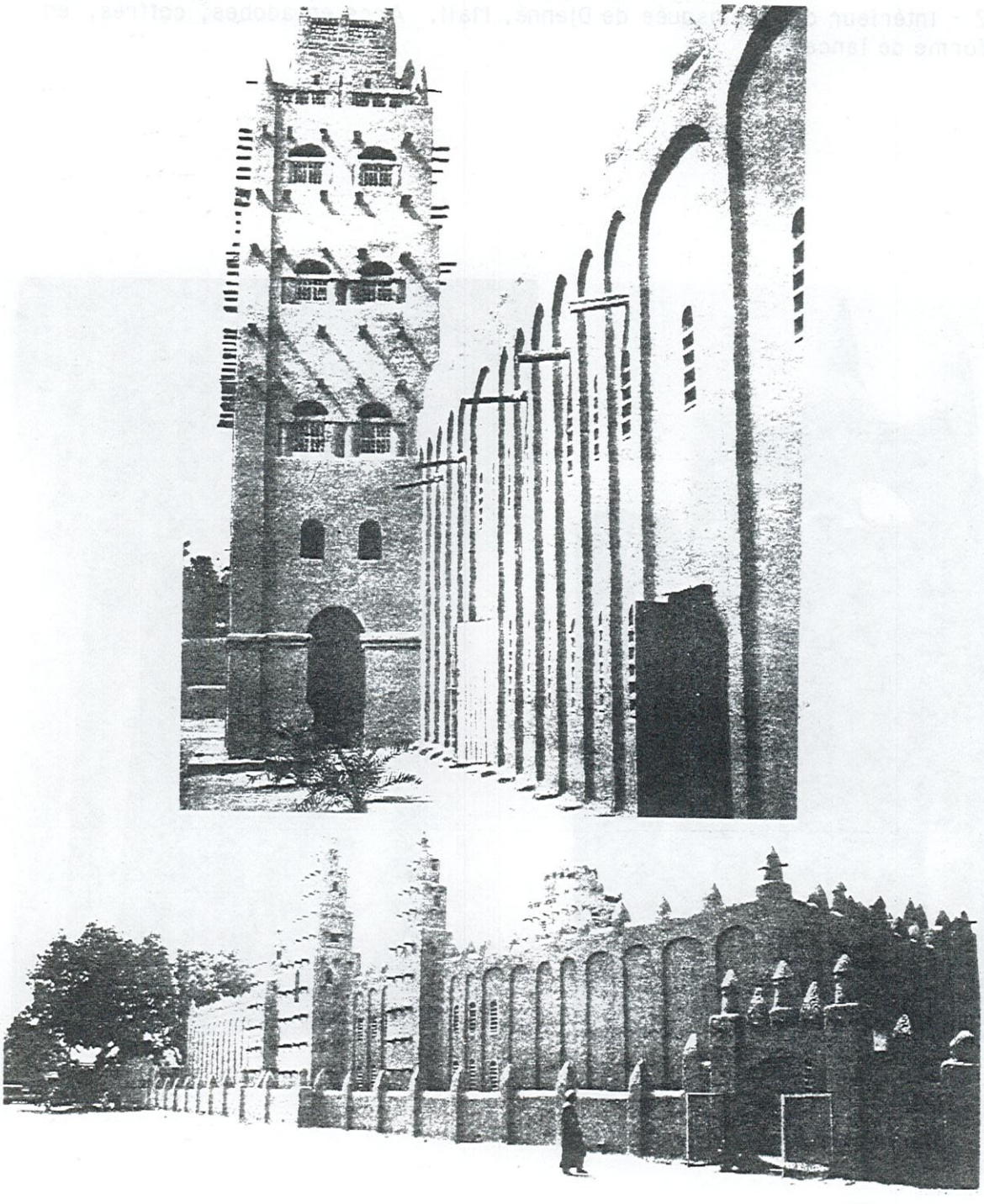
Réf.1-2 : Revue MIMAR 3.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MALI

Arcatures clavées, de forme surbaissée, en décor de façade de la mosquée de Niono, Mali, construite en 1957. Construction en adobes.



Réf. : Revue MIMAR, 3.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

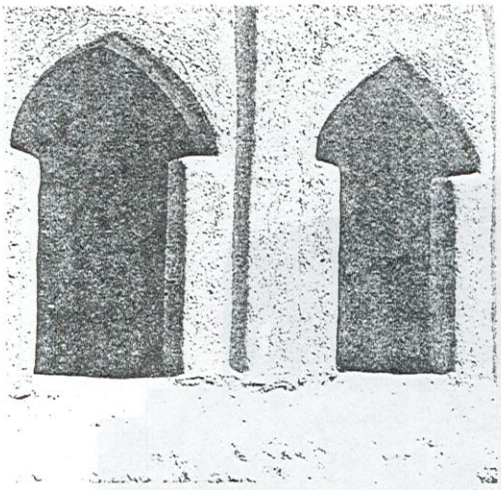
TYPOLOGIE
MALI

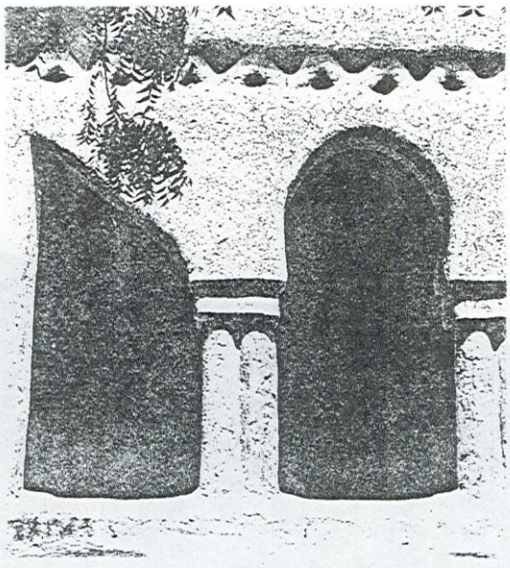
Grande diversité des formes d'arcs en adobes, refaçonnés en bauge ou au mortier de terre, dans l'architecture en terre du Mali.

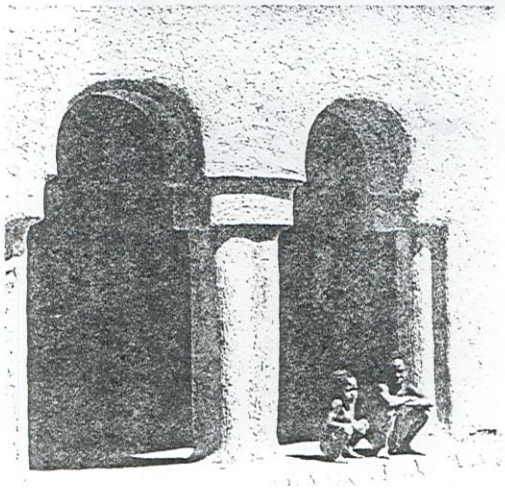
1 - Arcs tiers-point et arcs pleins cintres surhaussés à naissances en encorbellement.

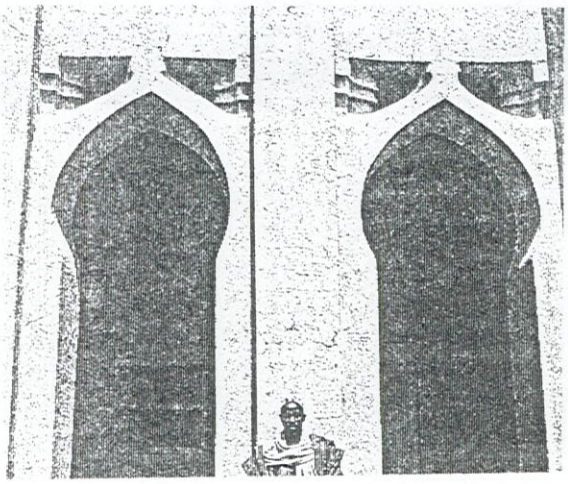
2 - Arcs pleins cintres outrepassés.

3 - Arcs de forme ogivale outrepassée à 4 centres (Mosquée de Koa).









Réf.1-2: BOURGEOIS, J.L. ; PELOS, C. Spectacular Vernacular, Peregrine Smith Books, Salt Lake City, 1983.

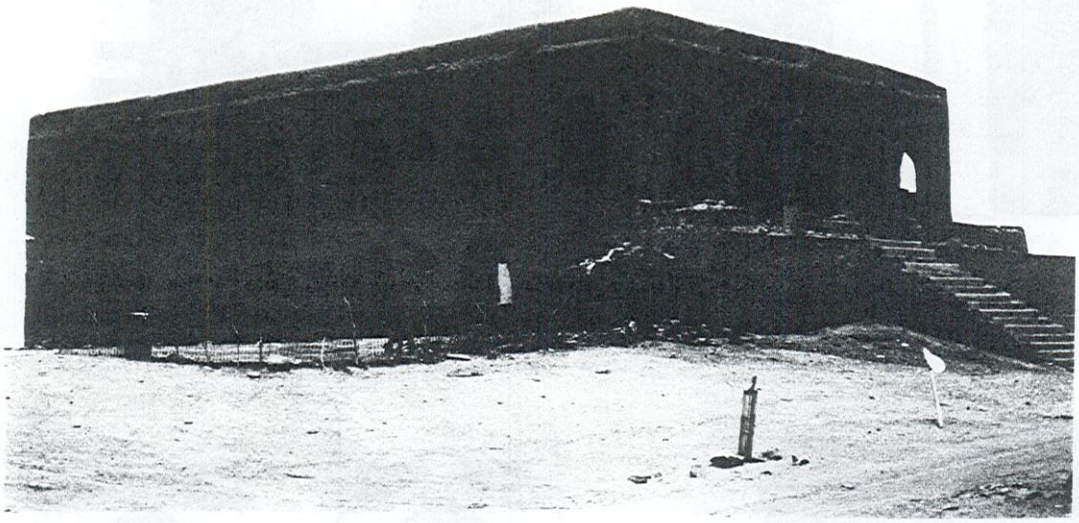
Réf. 3 : Revue MIMAR 12.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAURITANIE

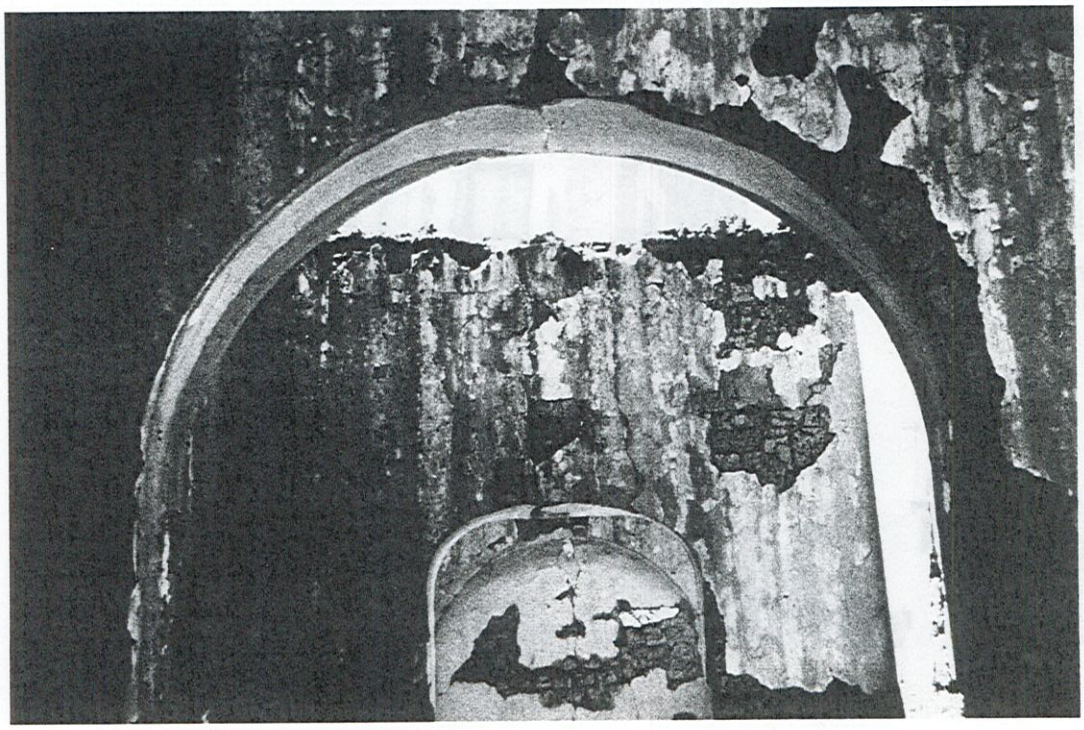
Arcs clavés en maçonnerie d'adobes, coffrés, de forme ogivale équilatérale. Poste de commandement du Général Gouraud à Atar, Mauritanie, début du XXème siècle.



Réf. : Photographie DAVID, Th.

© CRATerre 86

Arc clavé en adobes, plein cintre et arc déprimé (2ème plan). Dispensaire construit au début du siècle, abandonné, Burkina Faso.



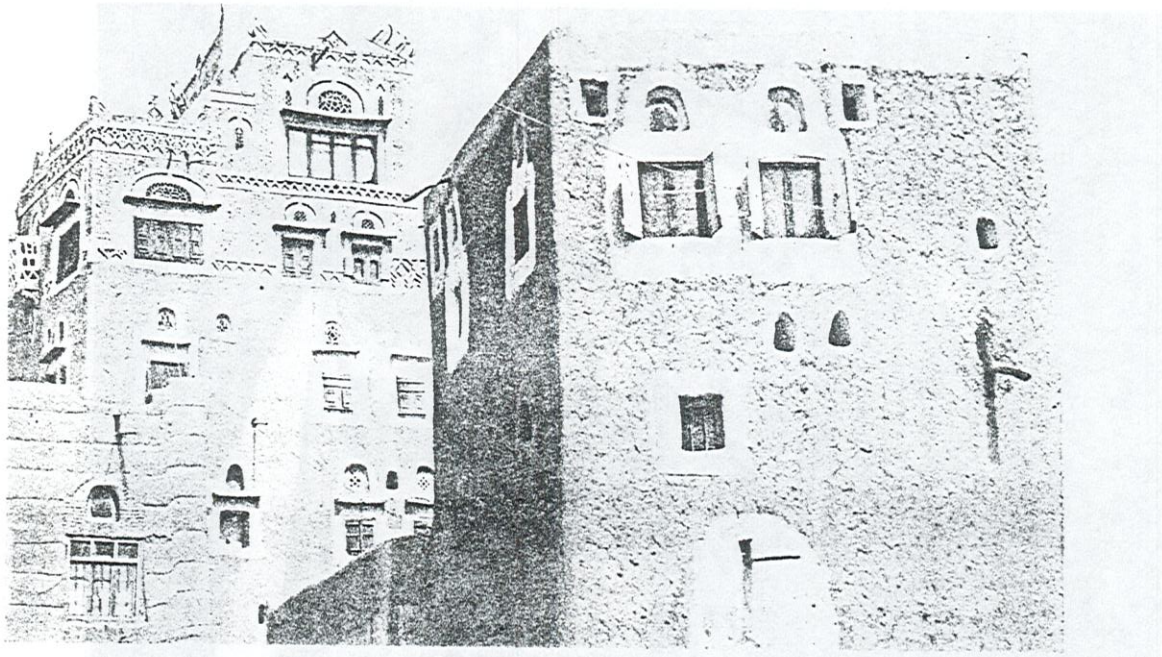
Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
YEMEN

Arcs clavés en adobes, de forme plein cintre surhaussée ou elliptique haute, en anse de panier, au-dessus de fenêtres à linteaux aménagées dans des habitations en bauge. Sada, Yémen.



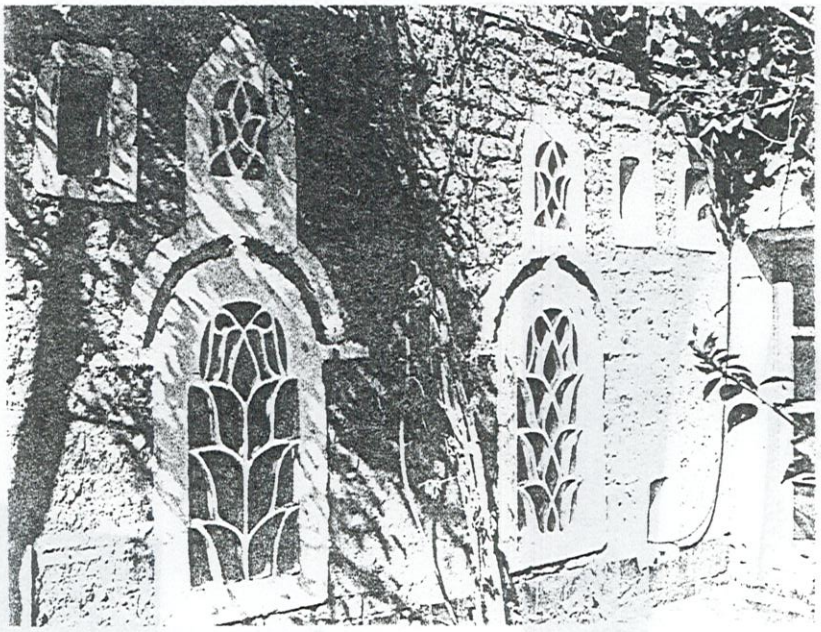
Réf. : SCHNEIDER, J ; Am Anfang Die Erde Sanfter Baustofflehm, Ed. Fricke im Rudolph Müller Verlag, Francfort, 1985.

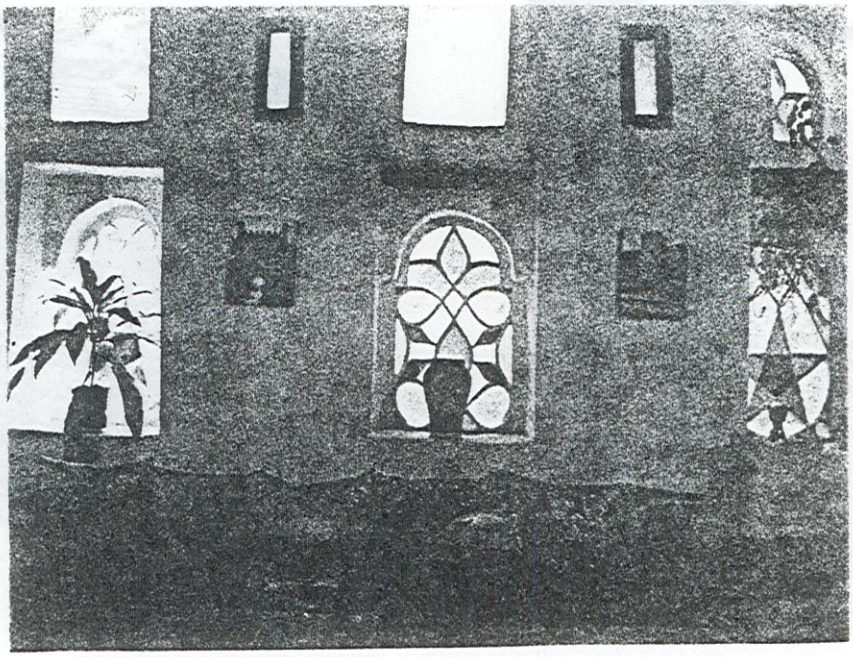
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
YEMEN

Extérieur et intérieur d'une habitation en briques d'adobes à Sanaa, Yemen. Systèmes d'arcs pleins cintres surhaussés avec naissances en encorbellement, et de linteaux. Finition des tableaux au plâtre.





Réf. : SCHNEIDER, J. ; Am Anfang Die Erde Sanfter Baustofflehm, Ed. Fricke im Rudolph Müller Verlag, Francfort, 1985.

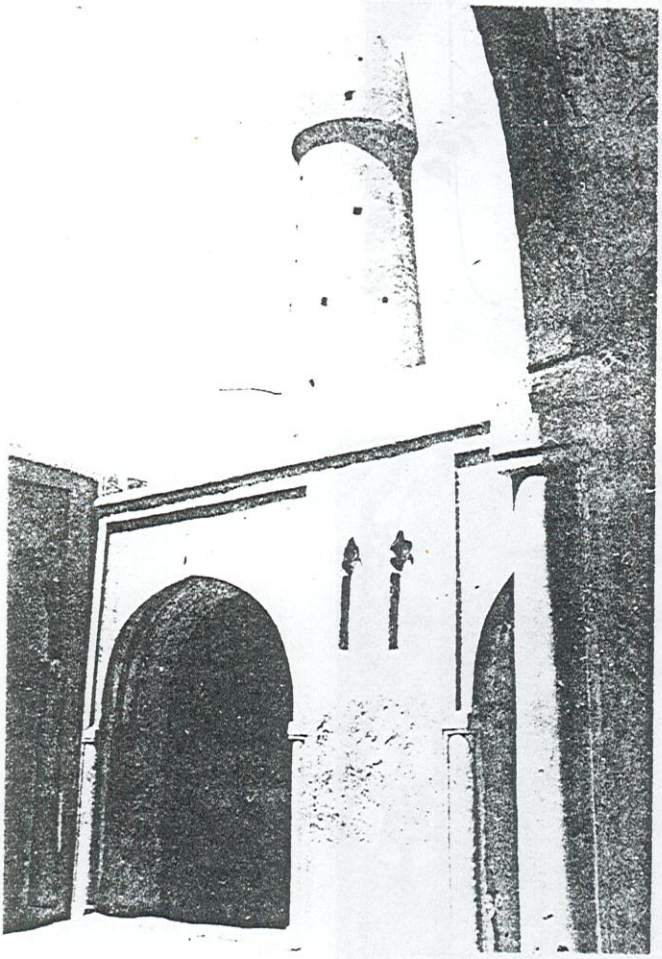
© CRATerre 86

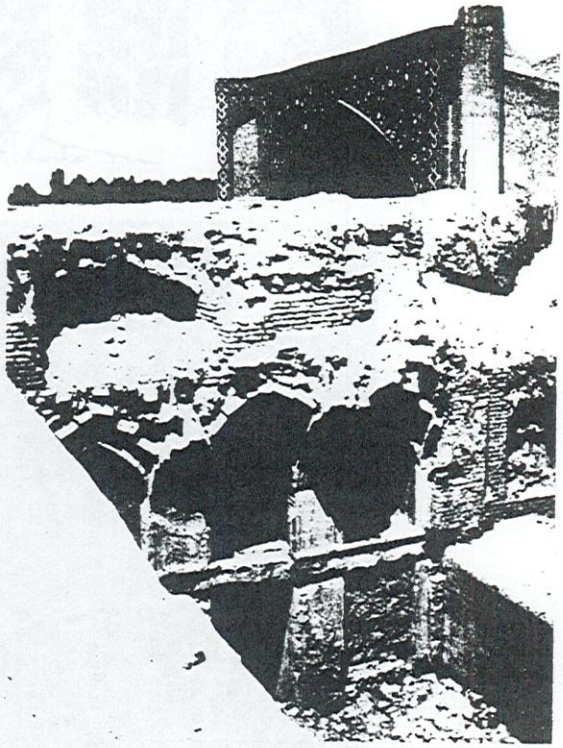
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
IRAN

1 - Arcs - diaphragmes clavés, de forme ogivale, en briques d'adobes, destinés à supporter des berceaux. Architecture du XVIIème siècle, Place Reale à Ispahan, Iran.

2 - Arc tiers-point, en adobes, cour intérieure de la mosquée de Fahraj, Iran, Xème siècle.

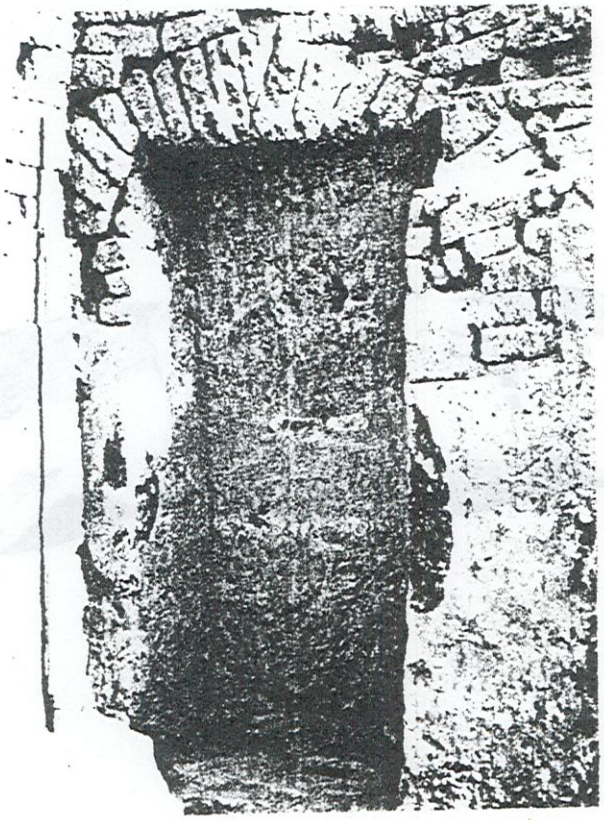




Réf.1-2 : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'Architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.

© CRATerre 86

Arc clavé en plate-bande, en maçonnerie d'adobes.



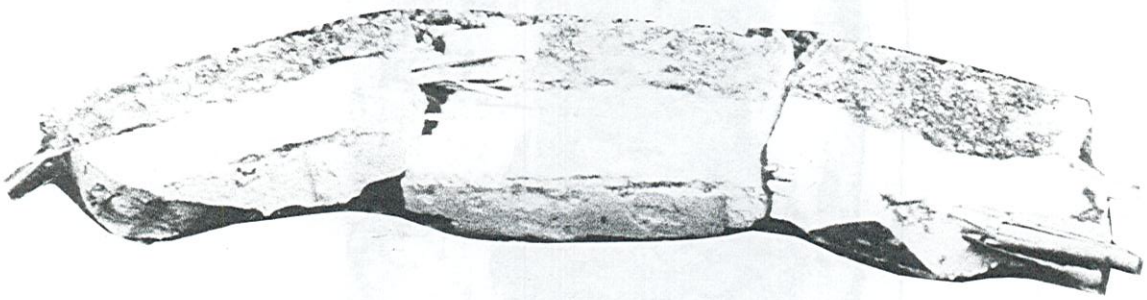
Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984. Photographie OATES.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
IRAN

Construction d'arcs clavés en adobes selon la technique iranienne du coffrage en "lengueh", élément-support réalisé en plâtre armé de roseaux.



Réf. : Photographie ABEDINI-RAD, mission CRATerre, 1984.

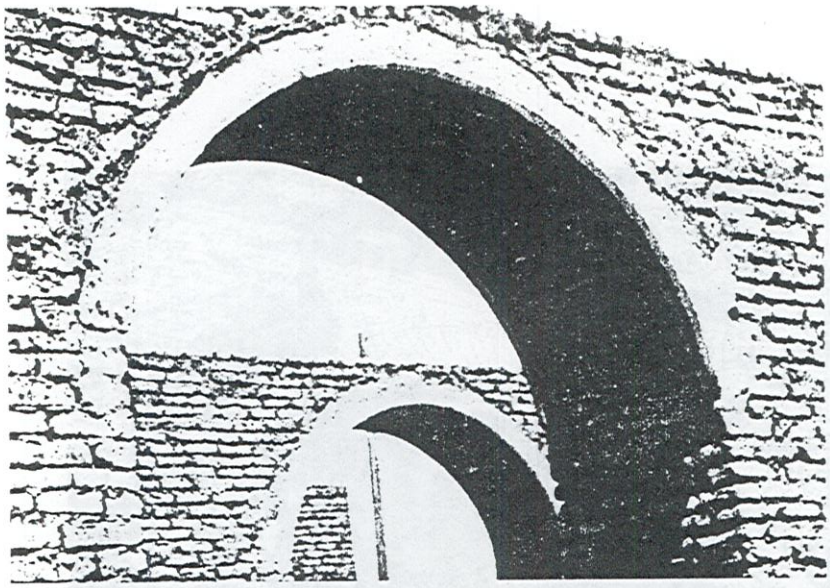
© CRATerre 86

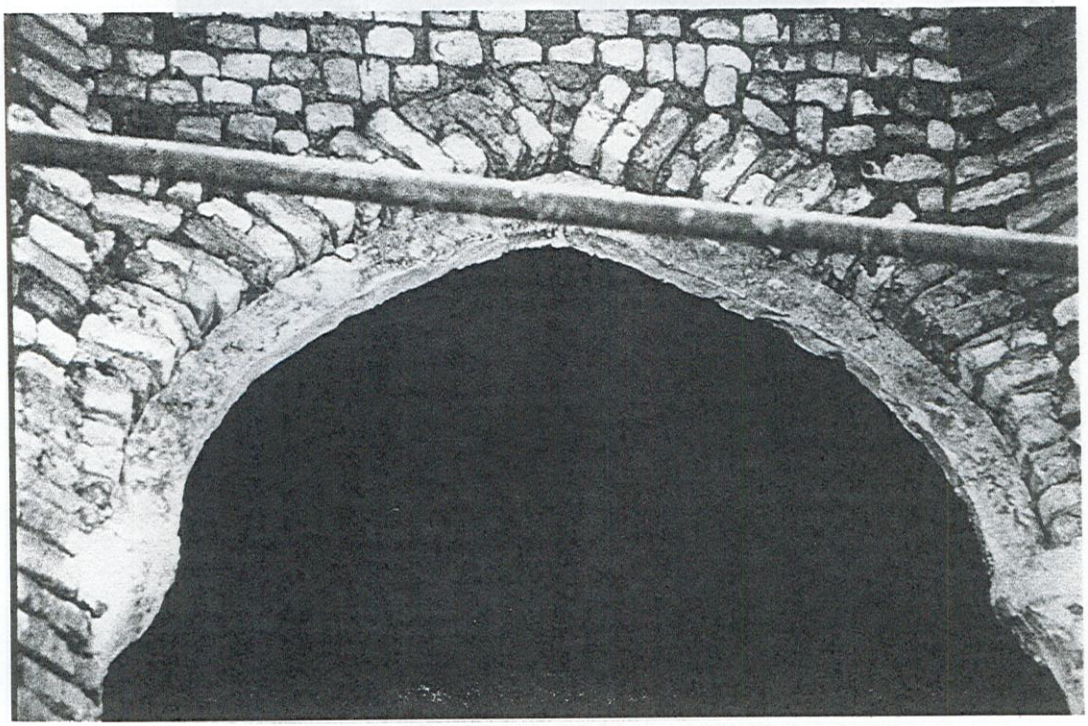
ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
IRAN

1 - Le "lengueh" (cintre) en plâtre armé de roseaux, utilisé pour la mise en œuvre d'un arc plein cintre, reste dans ce cas noyé dans la maçonnerie de briques d'adobes.

2 - Dans ce cas, après la construction de cet arc ogival surbaissé en adobe, le "lengueh" sera retiré.





Réf. 1 : BESENVAL, R. ; (d'après Godard, 1949), Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

Réf. 2 : Photographie ABEDINI-RAD, Arch., mission CRATerre, 1984.

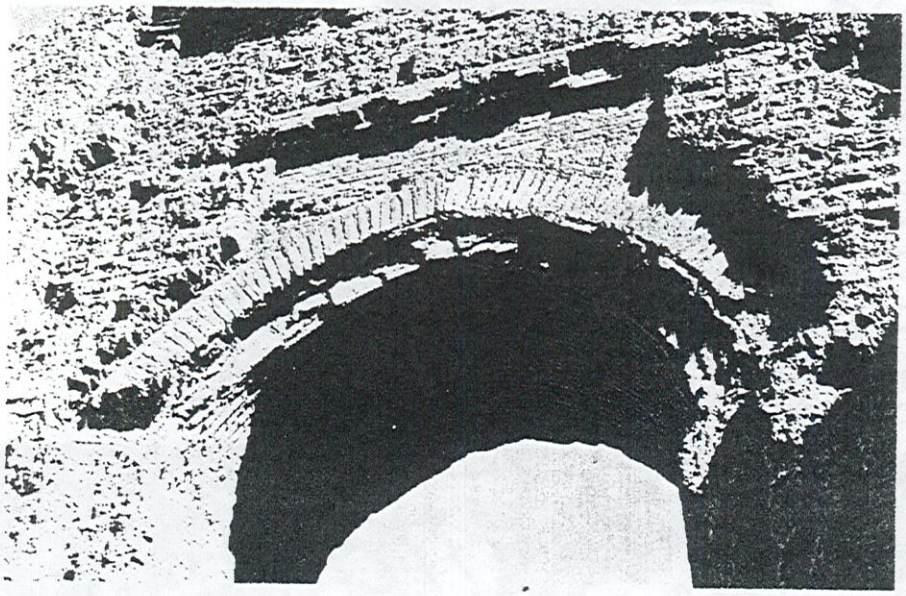
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE AFGHANISTAN

1 - Arc clavé en tranches verticales, doublé d'un rouleau de briques rayonnantes, de forme surbaissée, construit en adobes. La réalisation des tranches a pu adopter l'emploi d'arceaux en terre ou en plâtre armé, comme le suggèrent les têtes de l'arc. Lashkari Bazar, Afghanistan.

2 - Arcs construits sur cintres formés par un remplissage de la baie en adobes. Afghanistan.



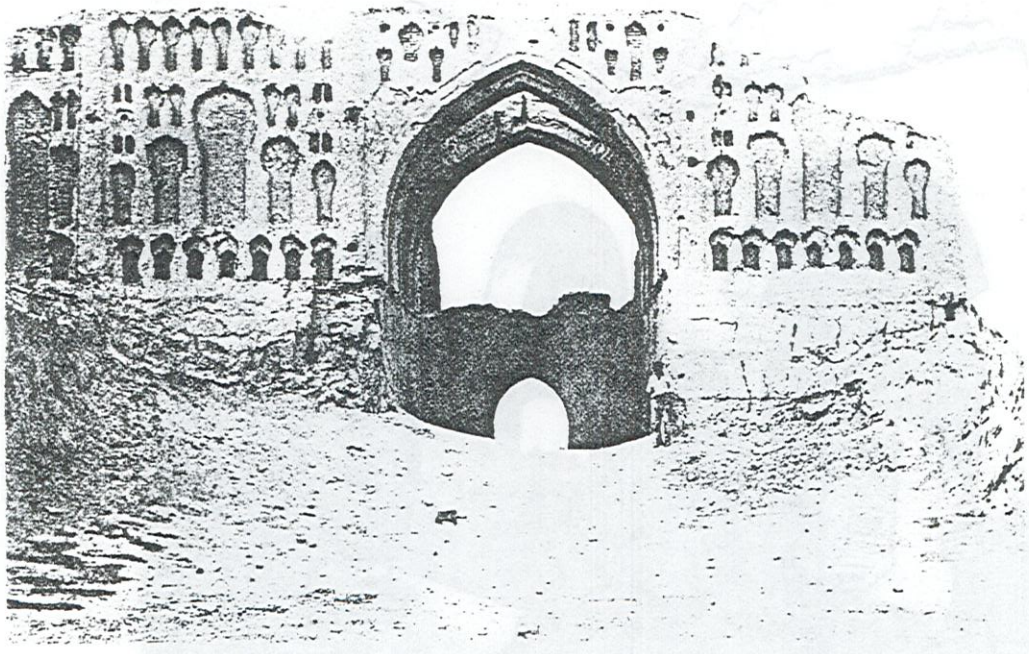
Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
AFGHANISTAN

Arc - diaphragme clavé, de forme ogivale, supportant des berceaux, réalisé en briques d'adobes. On observe aussi le décor d'arcatures et de double arcatures en pleins cintres outrepassés, polylobés et lancéolés. Site de chegini 2, façade de l'Iwan sud-est, Afghanistan.



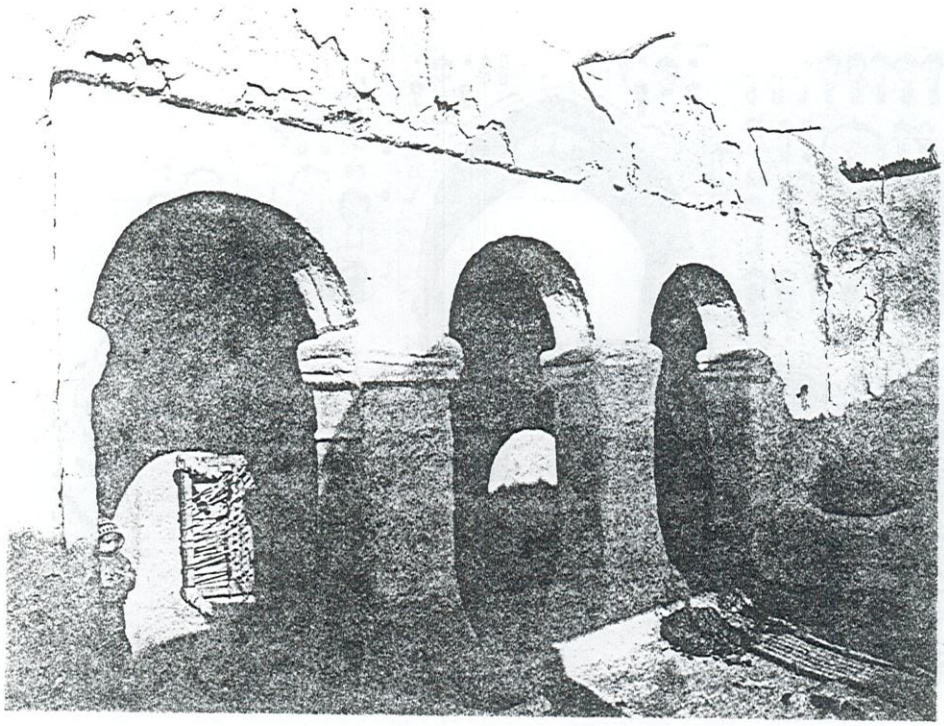
Réf. : ALLCHIN, F.R. ; HAMMOND, N. ; The archeology of Afghanistan, Ed. Academic Press, Londres, 1978.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
INDE

Arc clavé en adobes, plein cintre. Mosquée de Gwalior, région de Agra, Inde.



Réf. : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.

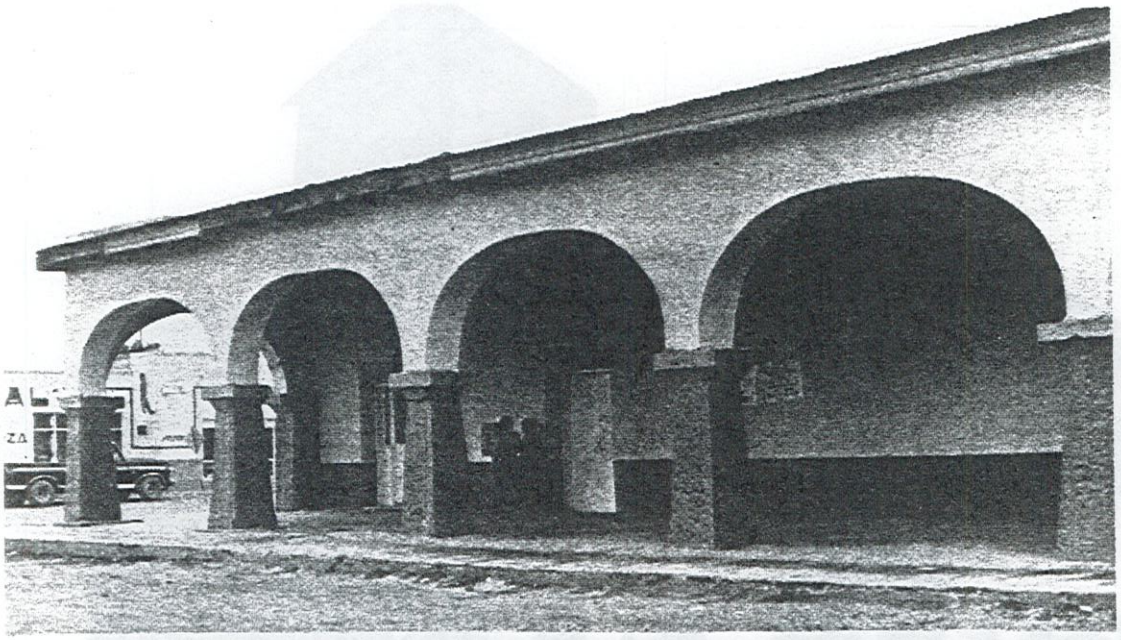
© CRATerre 86

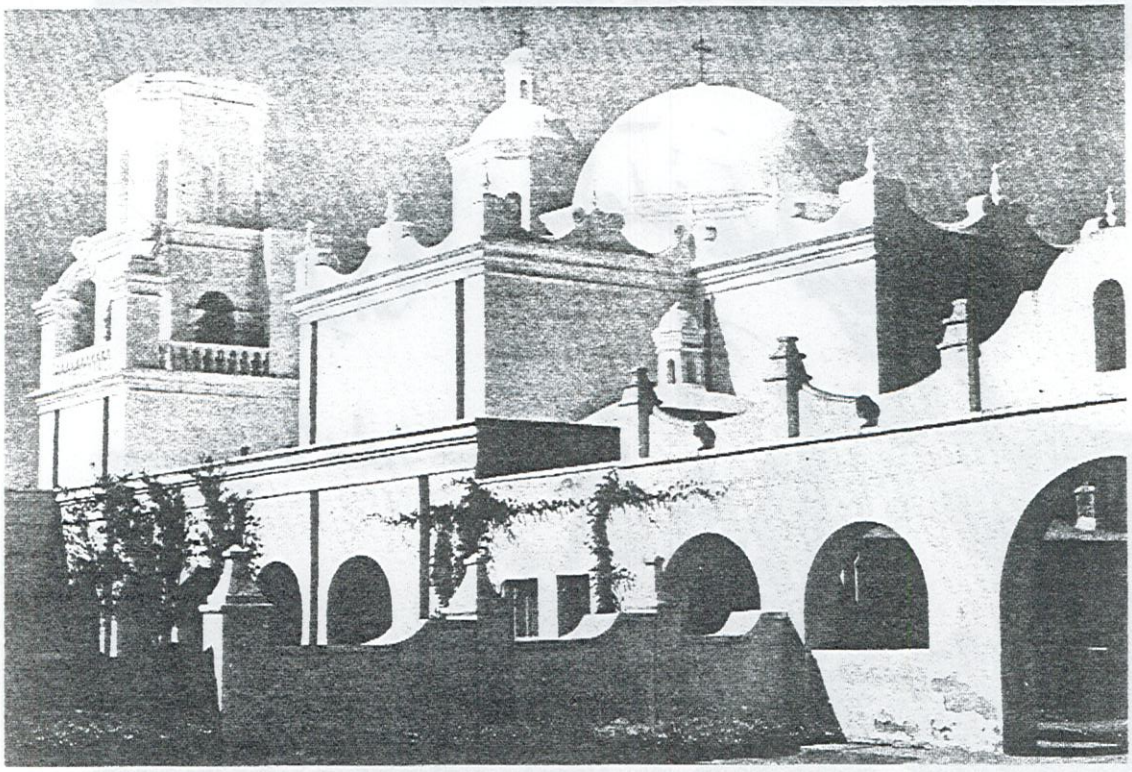
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
USA ET MEXIQUE

- San Xavier del Bac. Tucson Arizona USA 18ème siècle. Divers arcs en adobes.

- Poste à Chihuahua. Mexique. Arcs en anse de panier-adobes.





Réf. 1 : Adobe Today 24.
Réf. 2 : Adobe Today 31.

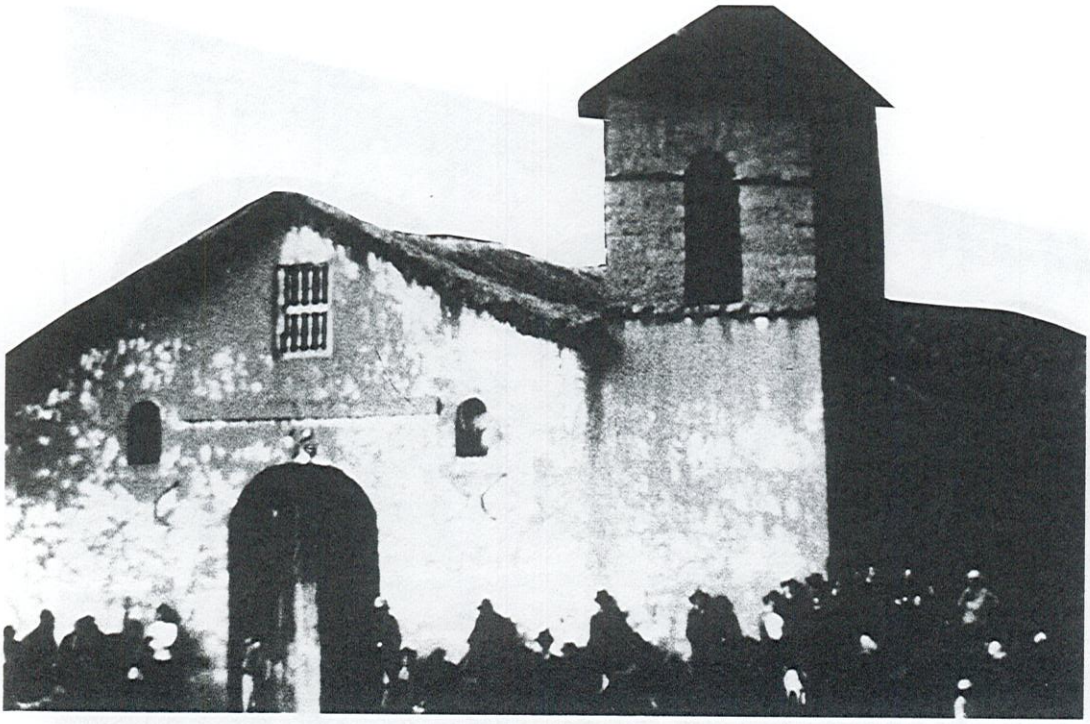
© CRATerre 86

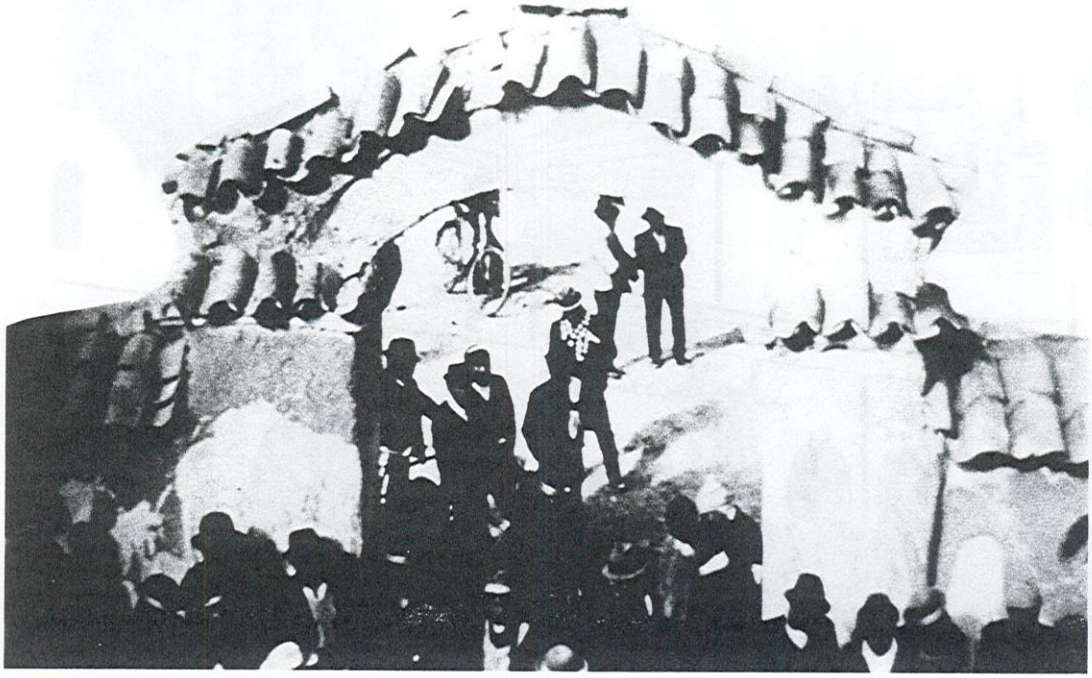
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
PEROU ET BOLIVIE

1 - Arcs en adobes - Eglise dans une haute vallée des Andes au Pérou.

2 - Arcs en adobes formant le porche d'entrée d'une église - Altiplano Bolivien.





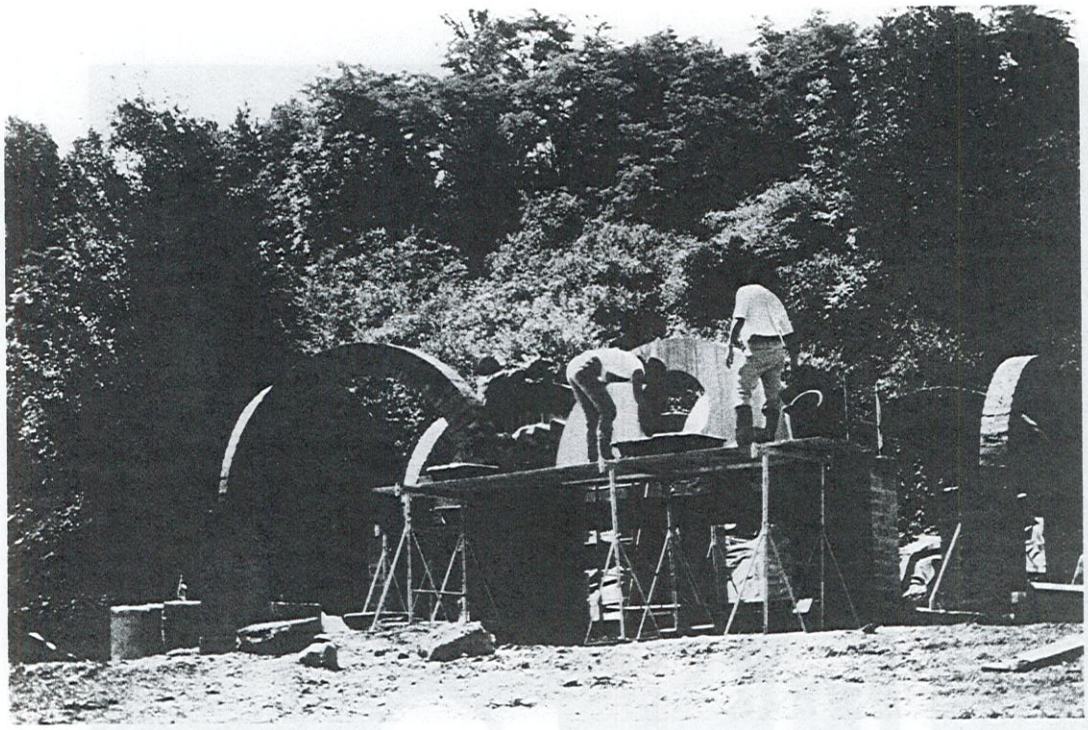
Réf. 1 : Photographie Silvester-Rapho dans : "L'Amérique des Andes" (Beautés du Monde)" Larousse.
Réf. 2 : Photographie Tweedie-Calovific dans : "L'Amérique des Andes" (Beautés du Monde)" Larousse.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
FRANCE

Construction d'arcs-sommiers pleins cintres en blocs de terre comprimée stabilisée sur coffrages en contre-plaqué. Galerie artisanale au Village du Bout du Monde de la Roche Vineuse, 1985, architectes Thierry Joffroy et Ecole d'Architecture de Grenoble.



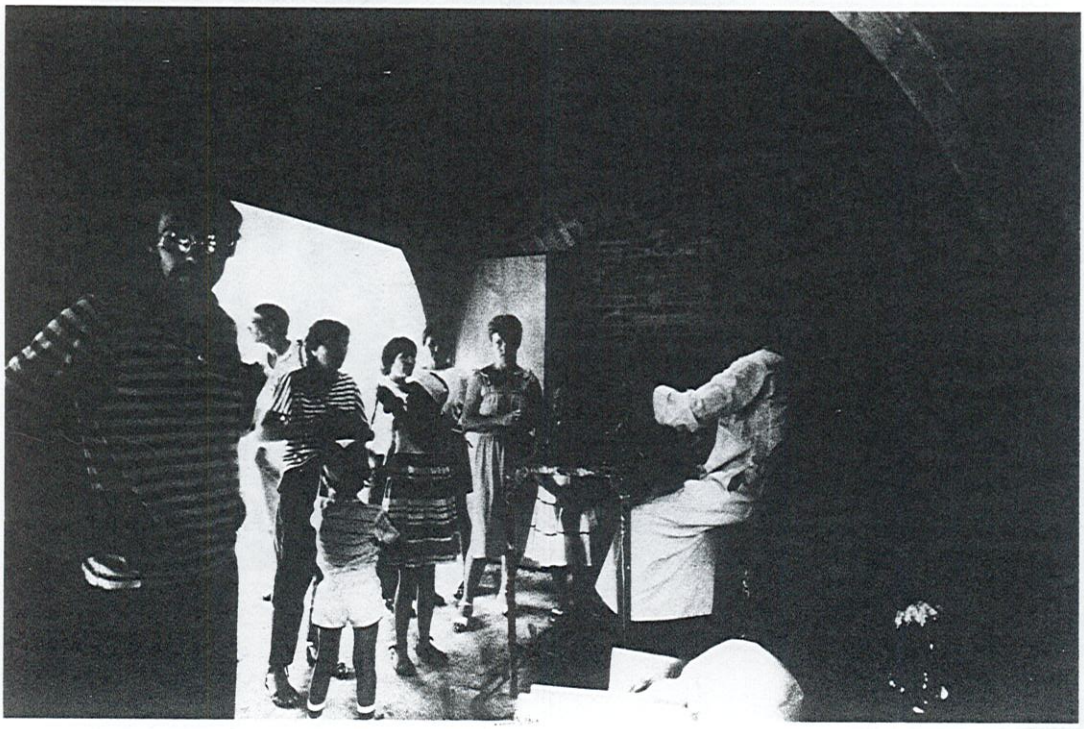
Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

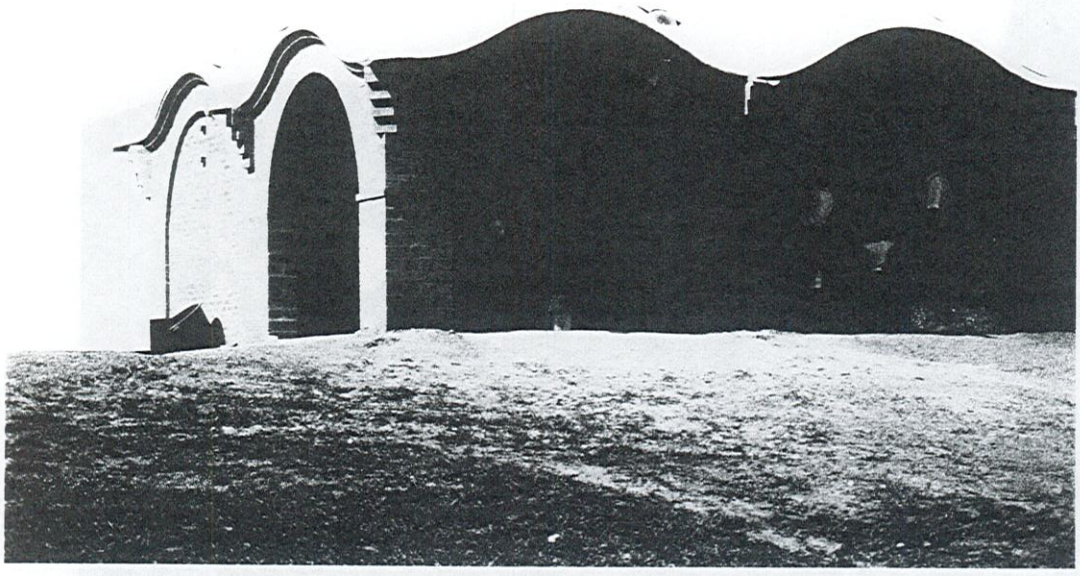
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
FRANCE

Les arcs-sommiers pleins cintres sont couverts par des coupoles en briques cuites hourdées au mortier de terre stabilisée. Projet d'une galerie artisanale au Village du Bout du Monde de la Roche Vineuse, 1985, architectes Thierry Joffroy et Ecole d'Architecture de Grenoble.





Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

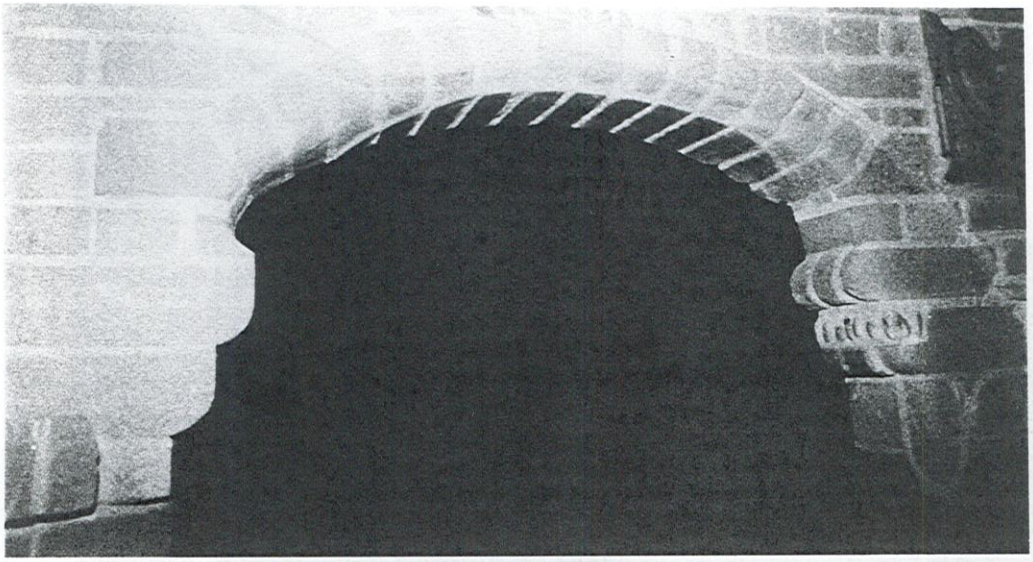
© CRATerre 86

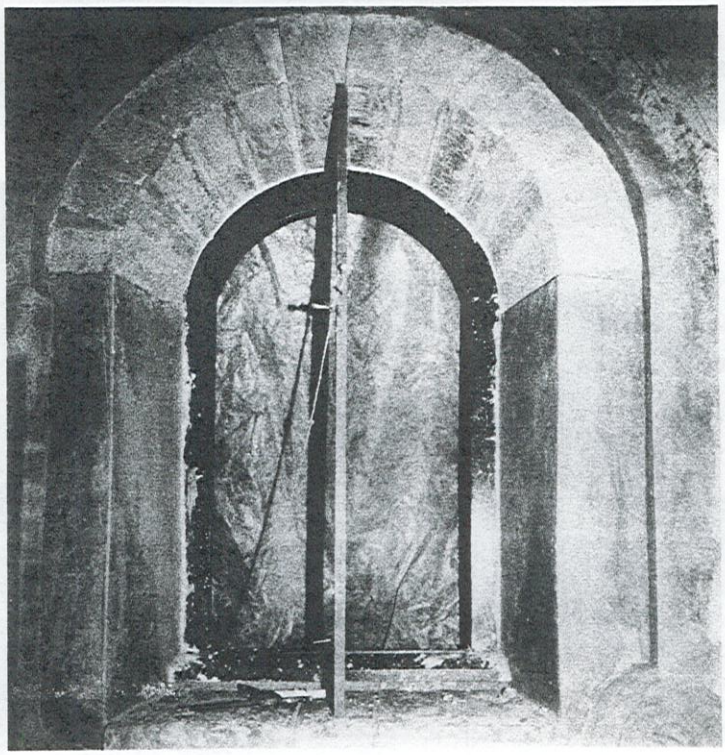
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
FRANCE

1 - Arc surbaissé décoré en blocs de terre comprimée stabilisée - Centre de Terre de Lavalette près de Toulouse, architecte Joseph Colzani, 1984.

2 - Arc en voussure, Centre de Terre de Lavalette, architecte Joseph Colzani, 1984.





Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

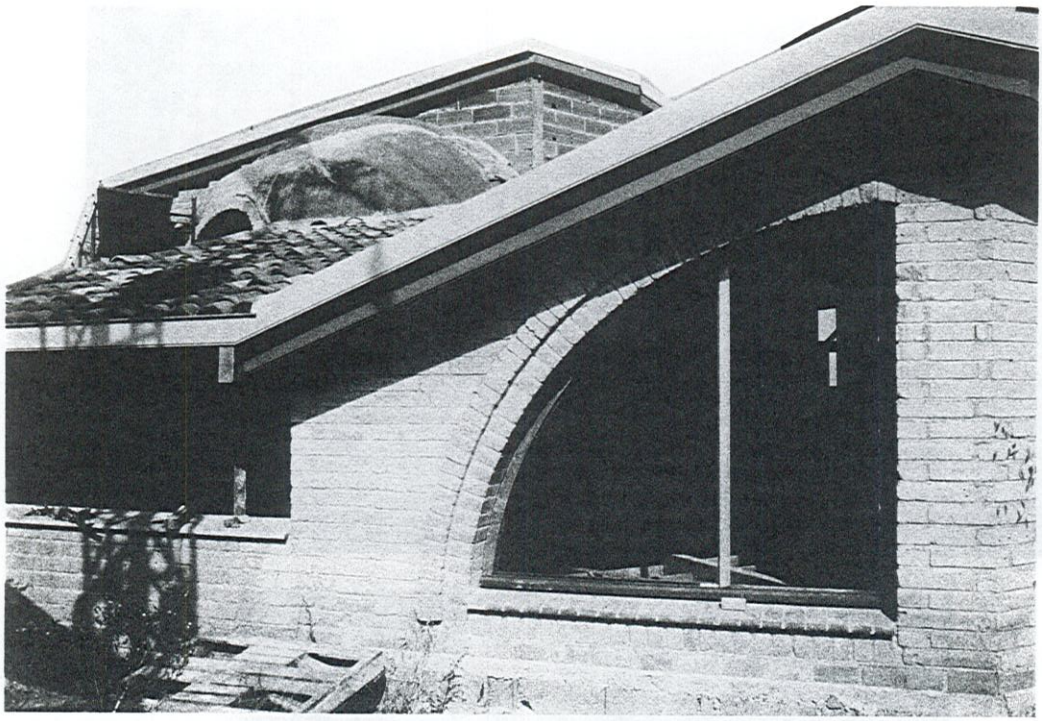
© CRATerre 86

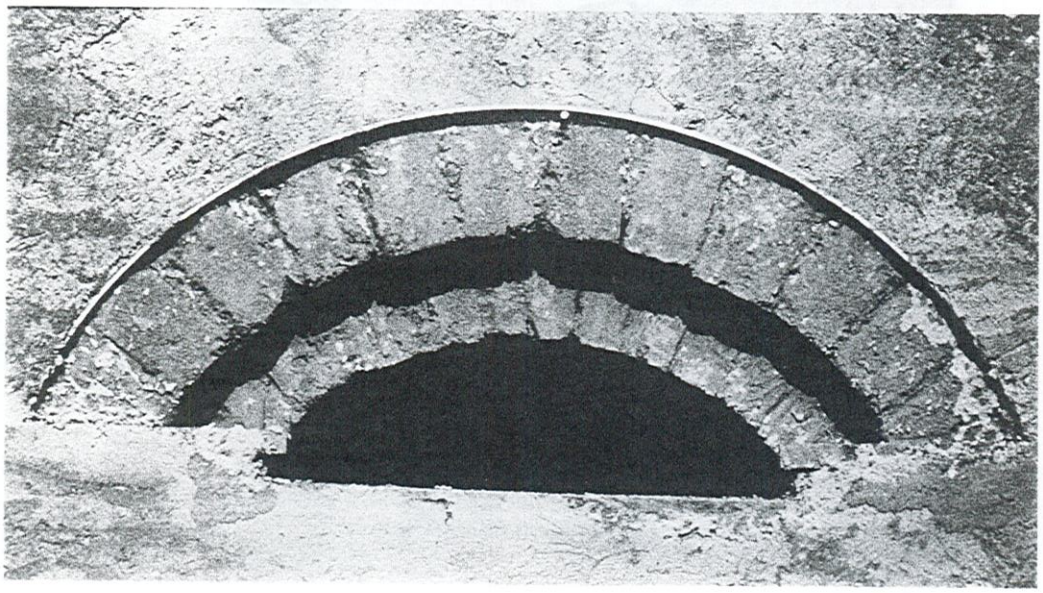
ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
FRANCE

1 - Demi-arc plein cintre à deux rouleaux, en blocs de terre comprimée stabilisée. Centre de Terre de Lavalette, architecte Joseph Colzani, 1984.

2 - Archivolte plein cintre surbaissée à deux rouleaux, en blocs de terre comprimée stabilisée. Bâtiment de stockage au CSTB de Grenoble, conçu et réalisé par l'Ecole d'Architecture de Grenoble, 1984.





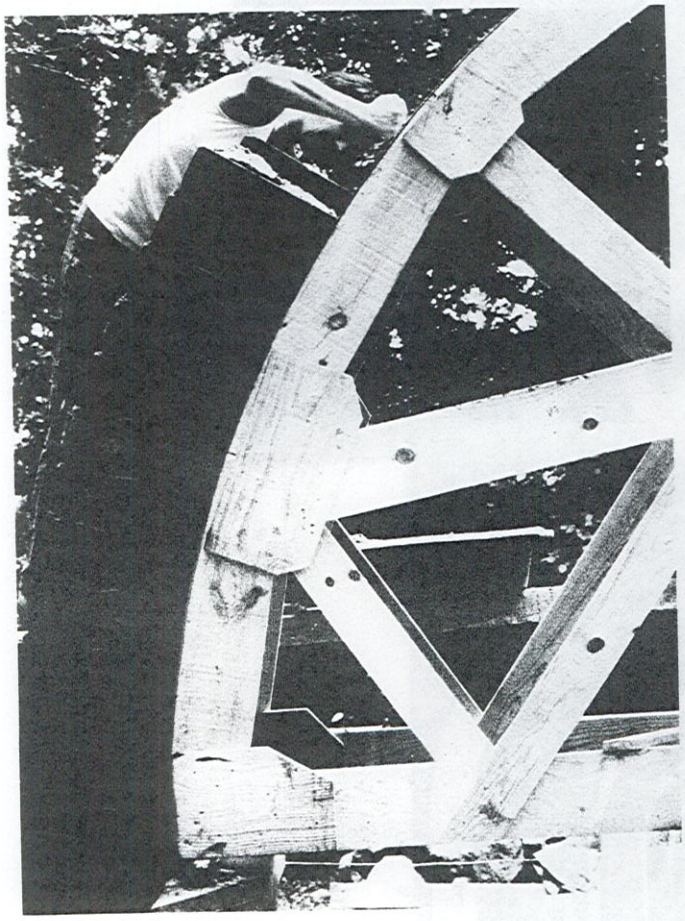
Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

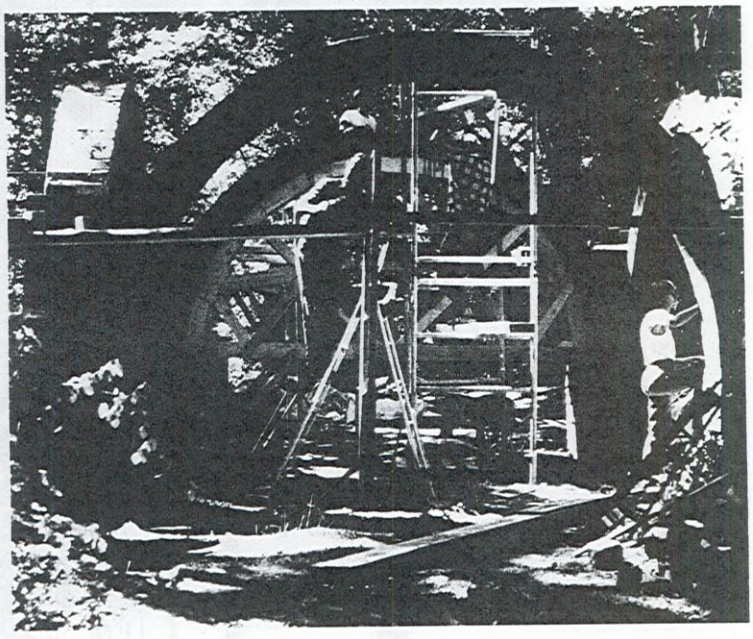
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
FRANCE

Construction d'arcs-sommiers pleins cintres en blocs de terre comprimée stabilisée, réalisés sur coffrages en planches et goussets cloués. Porche d'entrée du "Village du Nouveau Monde de Terrasson" (Dordogne). Architecte Thierry Joffroy, réalisation "Les Murondins", 1985.





Réf. : Photographies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

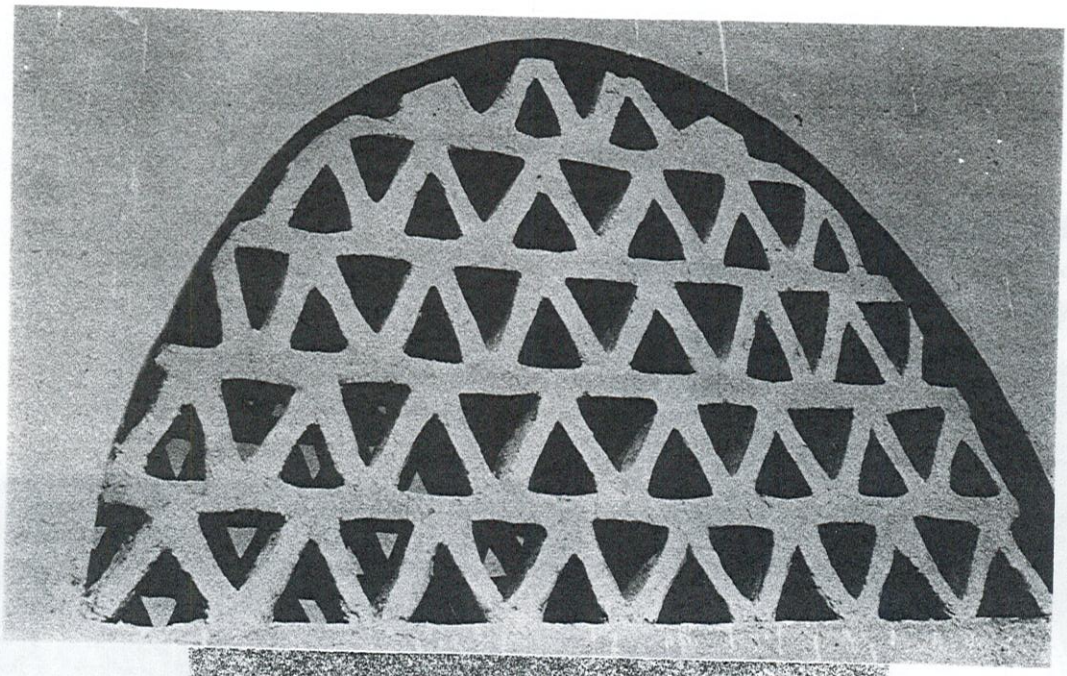
ARCS EN MAÇONNERIE

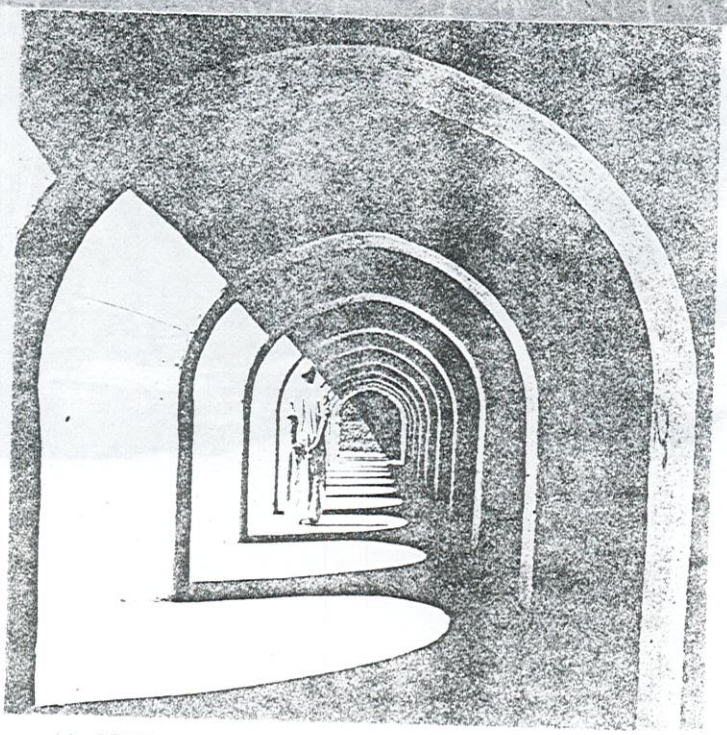
TYPOLOGIE
EGYPTE

Arcs clavés en adobes.

1 - Remplissage de l'arc par un claustra d'adobes, village de New Gourna, Egypte, architecte Hassan Fathy.

2 - Arcades du Marché de Gourna, Egypte, architecte Hassan Fathy.





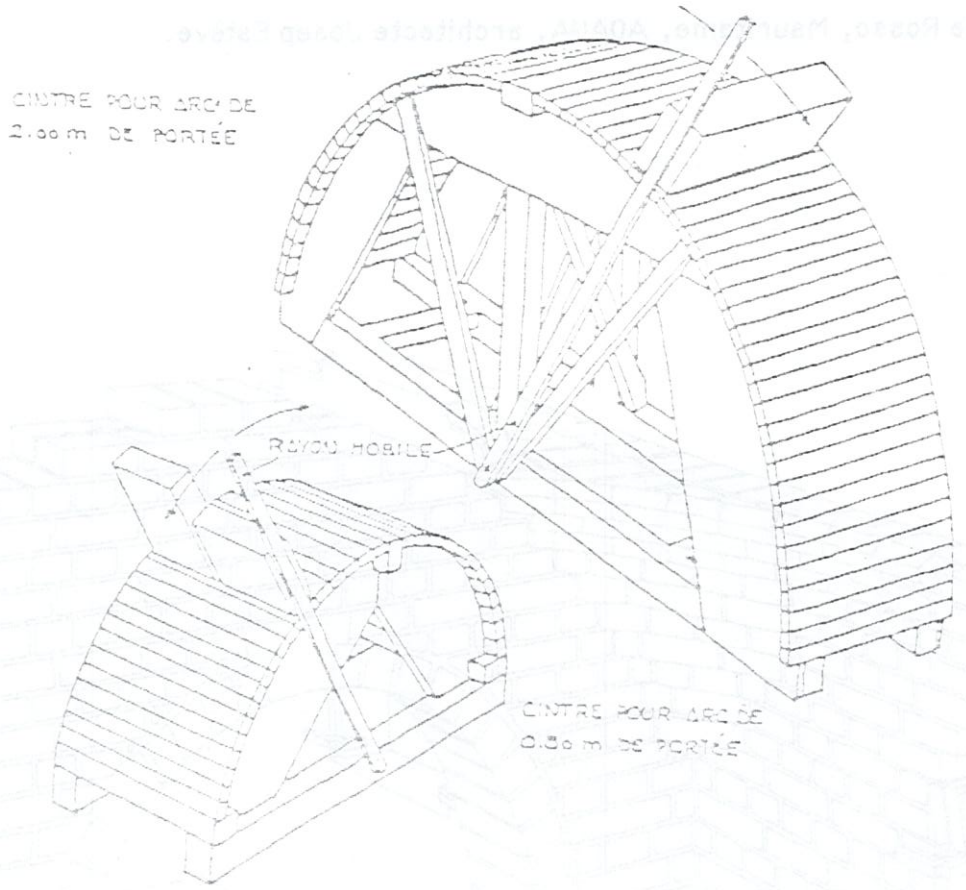
Réf. 1 : Photographie CRATerre.
Réf. 2 : FATHY, H.; Construire avec le Peuple, Ed. Sindbad, Paris, 1970.

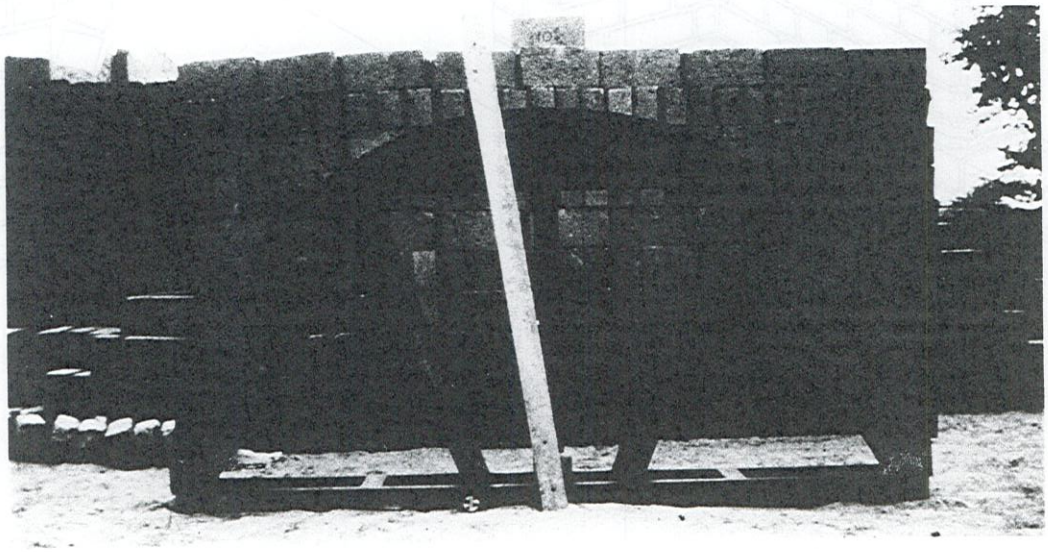
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
MAURITANIE

Application récente de construction d'arcs clavés pleins cintres. Cintres en planches et lattis avec guide mobile de pose des briques. Projet de Rosso, Mauritanie, ADAUA, architecte Josep Estève.





Réf. : Dessin et photographie ESTEVE, J. ; ADAUA.

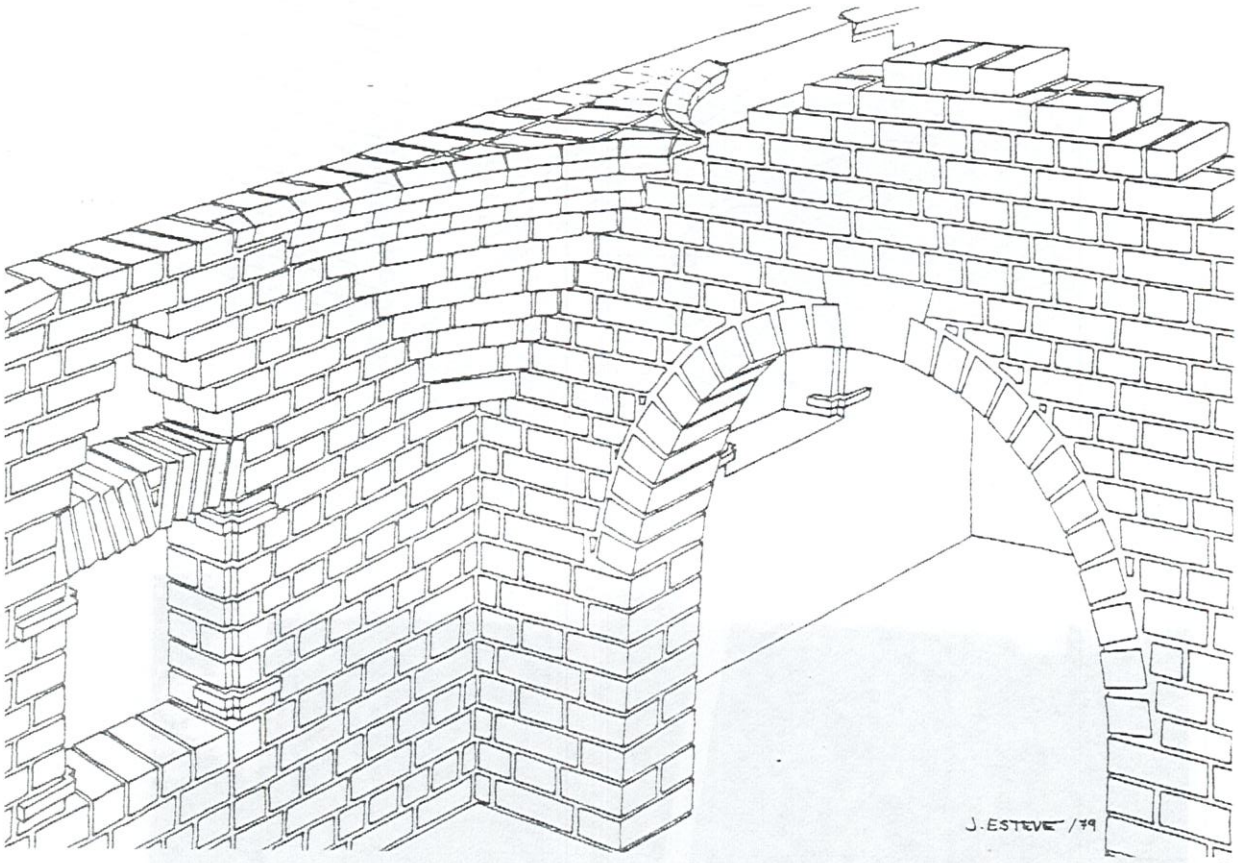
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION MAURITANIE

Application récente de construction d'arcs clavés en blocs de terre comprimée stabilisée :
- Ouverture entre 2 pièces en arc plein cintre,
- Fenêtre en arc plate-bande déchargé par un arc en encorbellement.

Projet de Rosso, Mauritanie, ADAUA, architecte Josep Estève.



Réf. : Documentation ADAUA ; ESTEVE, J.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
SENEGAL

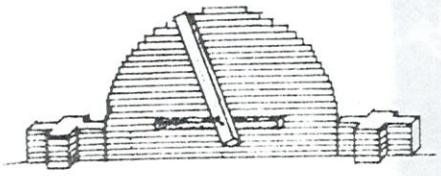
Construction d'arcs clavés pleins cintres, sur coffrages en briques posées à sec. Projet UNESCO de Nianing, Dakar.

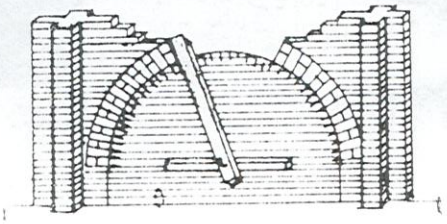
MONTAGE DE L'ARCHE :

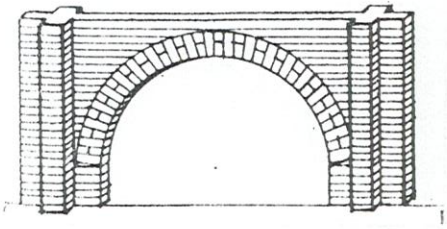
Entre les fondations une forme est élevée en blocs de ciment, en briques ou en briques séchées. Ces matériaux sont montés à sec. Un madrier est posé dans cette forme pour marquer le centre de l'arche. Une planche est clouée sur le madrier. La largeur de la planche correspond à l'épaisseur du bloc du ciment.

La forme est arrondie avec de la terre stabilisée. Les extrémités du mur sont montées avant ou même en même temps que l'arche pour éviter que l'arche devienne gauchie.

La forme de l'intérieur est démontée et les matériaux peuvent être réutilisés. Le démontage de la forme doit se faire avant la pose des voûtes sur l'arche pour faciliter le développement des contraintes de compression dans l'arche.







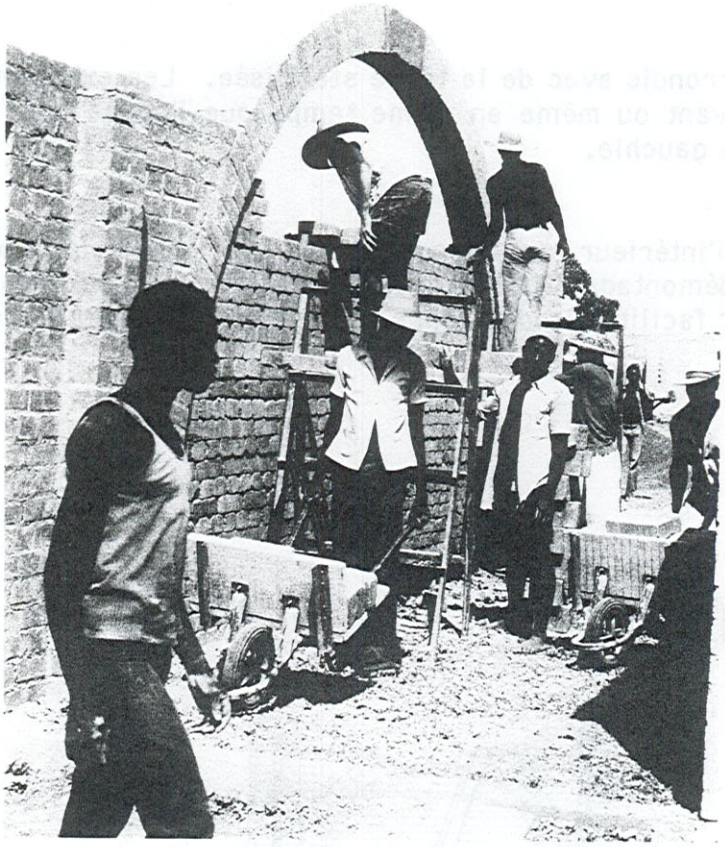
Réf. : DELLICOUR, O. ; EL JACK, K. ; POSMA, C. ; WALICK, P. ; Vers une meilleure utilisation des ressources locales. Centre de formation de Nianing, UNESCO, Dakar, 1978.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION
BURKINA FASO

Décoffrage d'un arc-diaphragme plein cintre, clavé, construit en bloc de terre comprimée, stabilisée. Récupération des briques du coffrage en maçonnerie montée à sec. Projet ADAUA de Kamboince, Burkina Faso.



Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

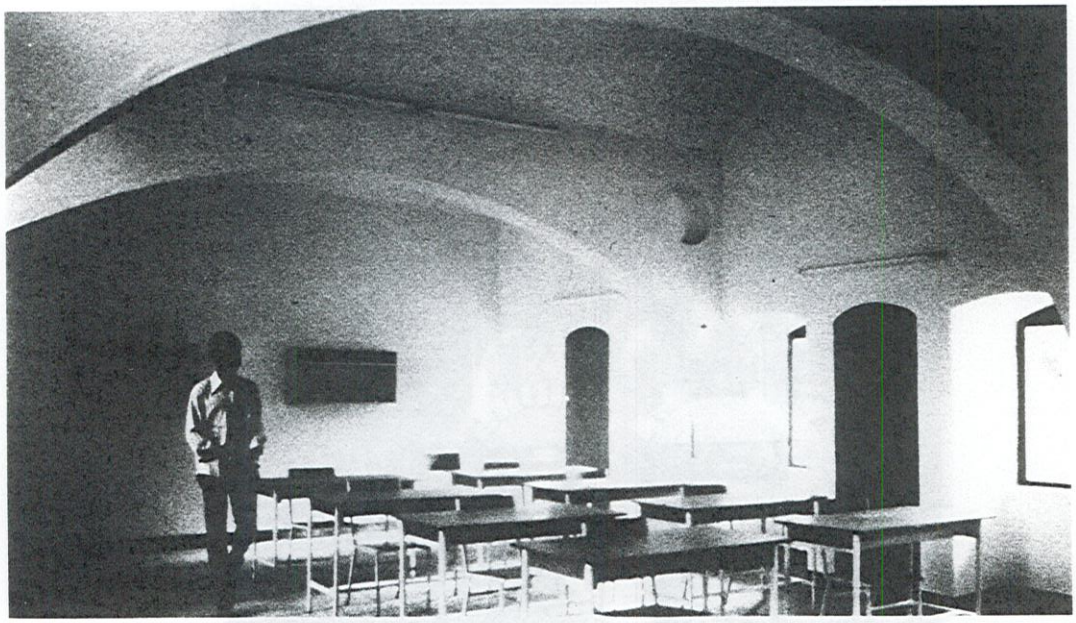
ARCS EN MAÇONNERIE

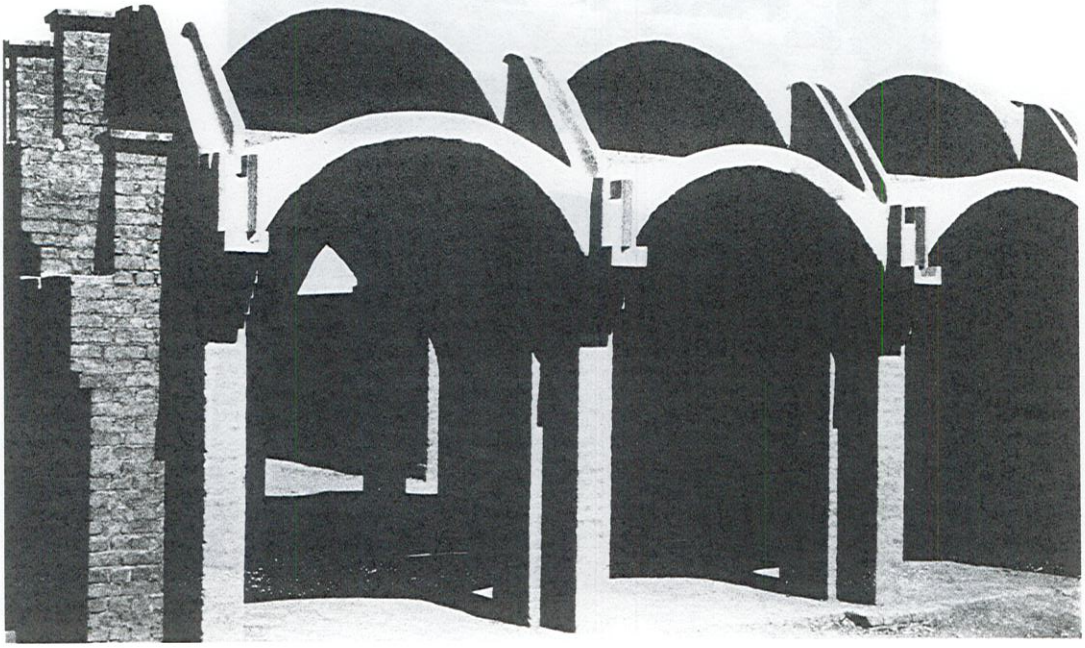
TYPOLOGIE
BURKINA FASO

Applications récentes de construction d'arcs-diaphragmes clavés, en blocs de terre comprimée, stabilisée.

1 - Salle de classe du Centre de formation des monitrices rurales de Kamboince, Burkina Faso, ADAUA, architectes, Belmans, D. ; Posma, C.

2 - CNDAR de Ouagadougou, Burkina Faso, ADAUA.





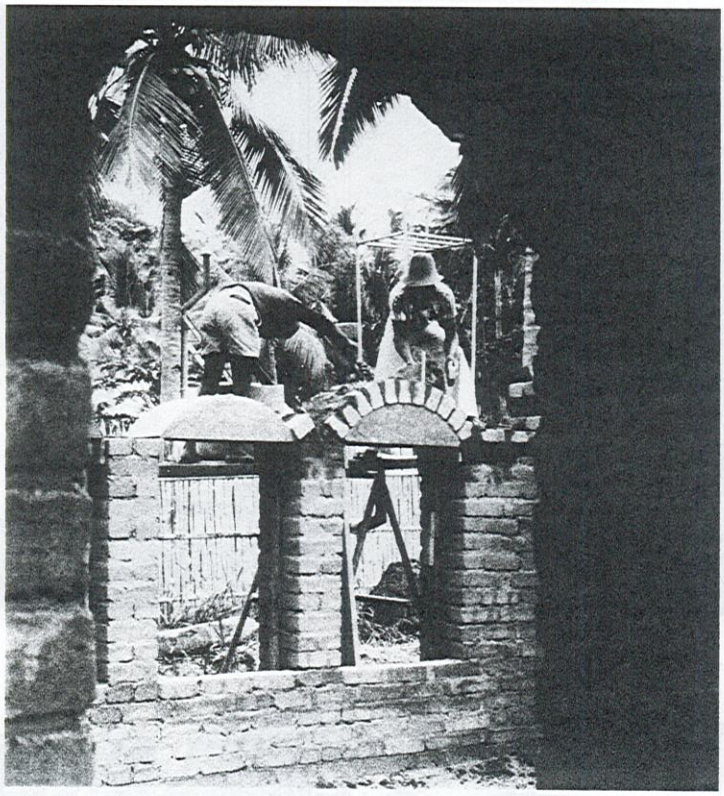
Réf. : Photographie ADAUA ; DERIAZ, PH.

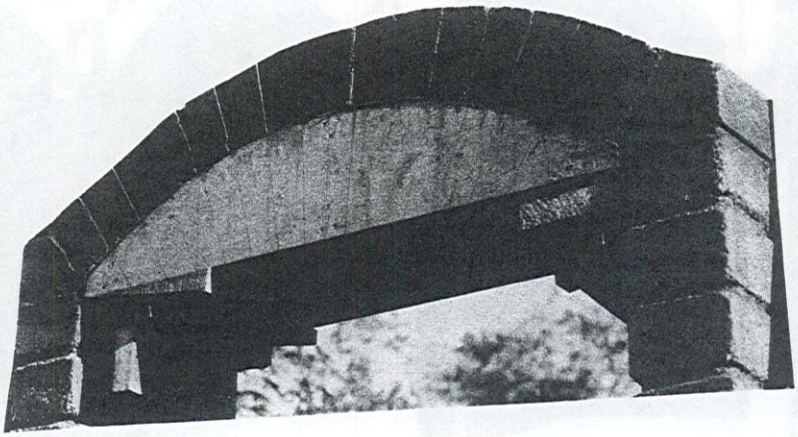
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

CONSTRUCTION MAYOTTE

Construction d'arcs surbaissés en blocs de terre comprimée stabilisée. Chantier de logements de Passamainti à Mayotte, conception-réalisation CRATerre et Ecole d'Architecture de Grenoble, en liaison avec la Société Immobilière de Mayotte, 1982.





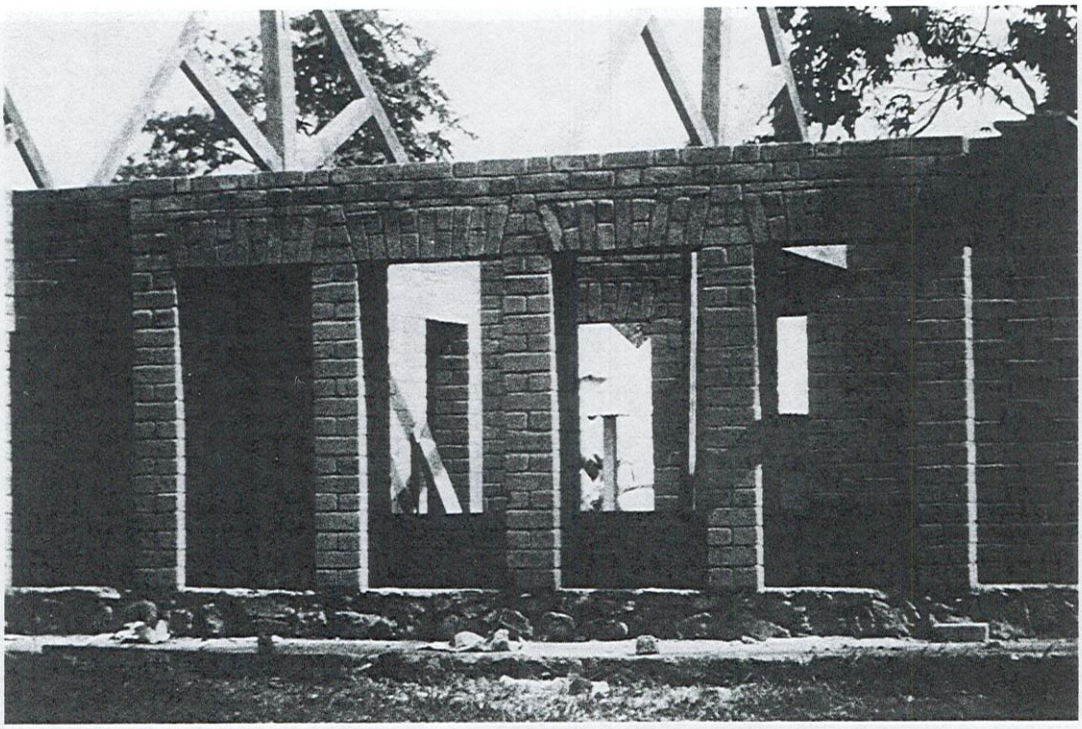
Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE MAYOTTE

Arcature de baies à arcs plates-bandes, réalisés en maçonnerie de blocs de terre comprimée stabilisée. Bâtiment public construit à Mayotte, 1982.



Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

MAYOTTE

Arc surbaissé en blocs de terre comprimée stabilisée. Projet de logements à Passamainti, conception-réalisation CRATerre - Ecole d'Architecture de Grenoble, en liaison avec la Société Immobilière de Mayotte, 1982.

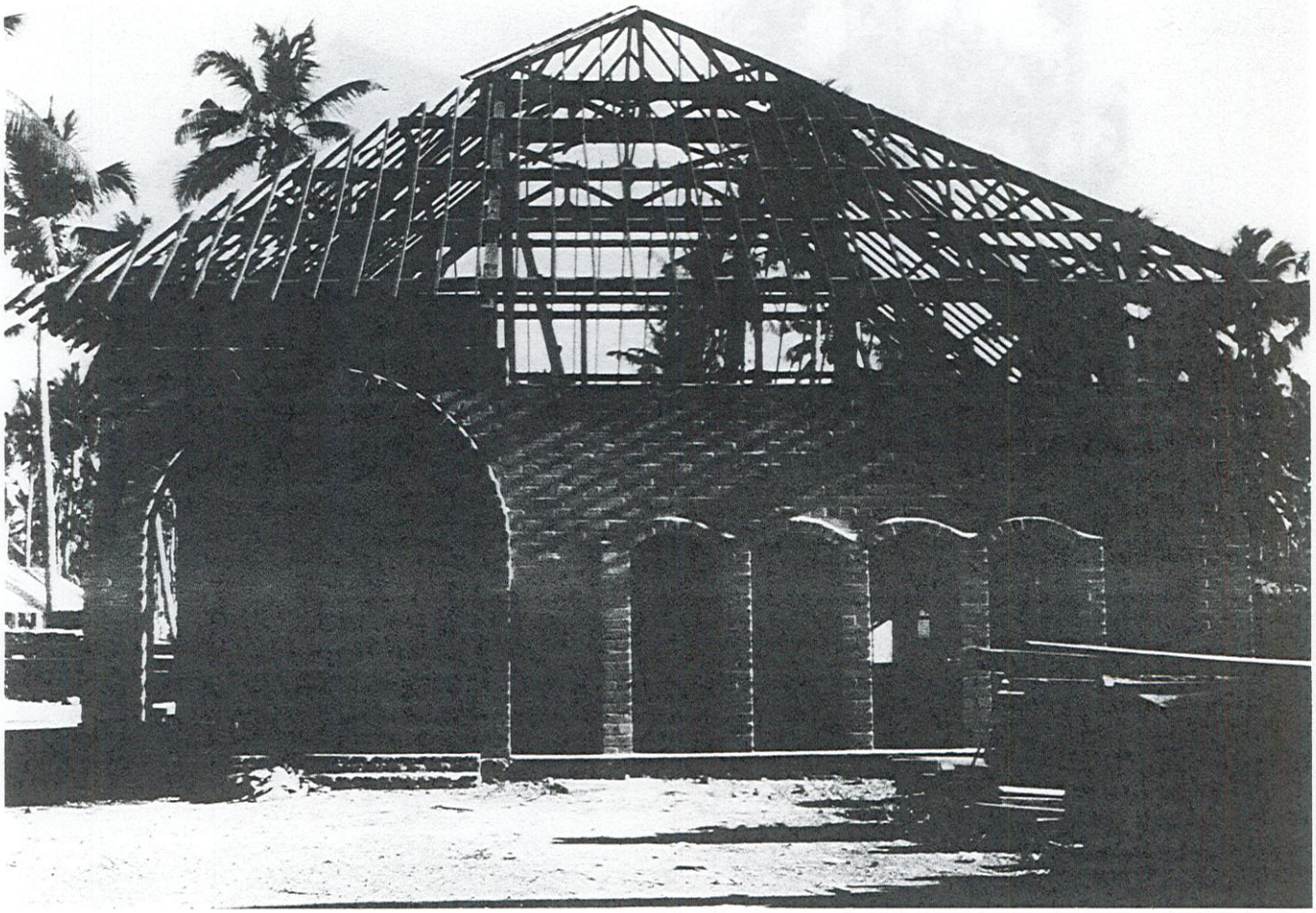
Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE MAYOTTE

Arc-sommier plein cintre et arcature d'arcs surbaissés. Bâtiment de la coopérative MUSADA, réalisé à Mayotte en 1982, architecte Vincent Liétar.



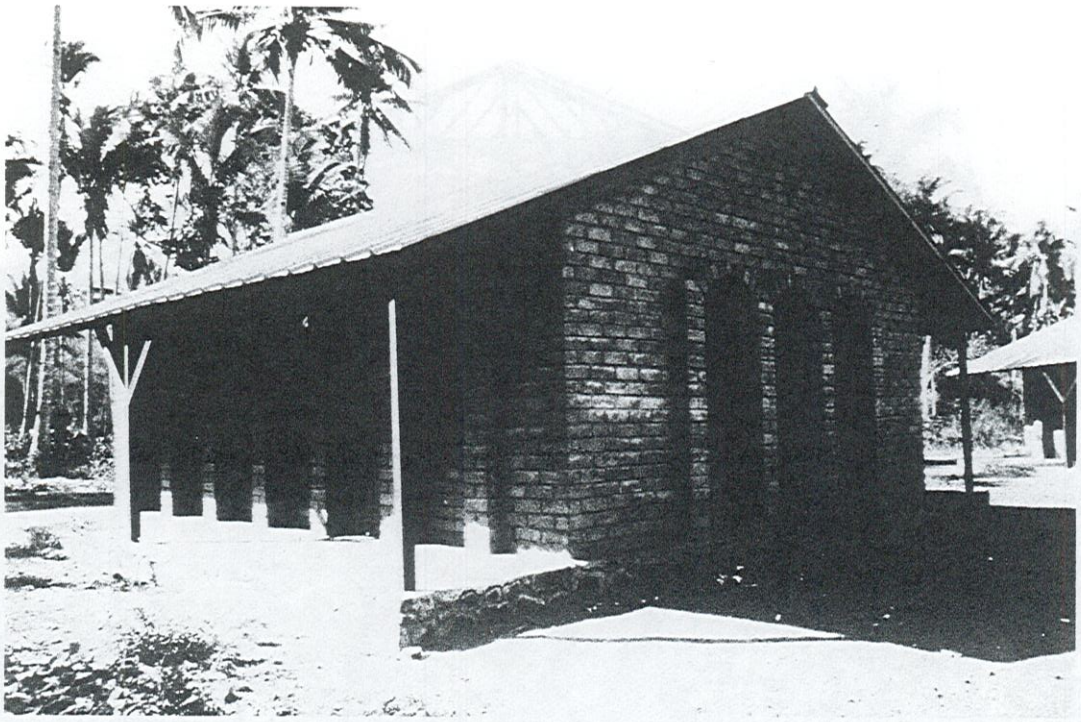
Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
MAYOTTE

Bâtiment de salle de classe en blocs de terre comprimée stabilisée, réalisé par la Société Immobilière de Mayotte, architecte Vincent Liétar. On observe la série de baies en arcs pleins cintres formant une arcature. Projet réalisé en 1982.



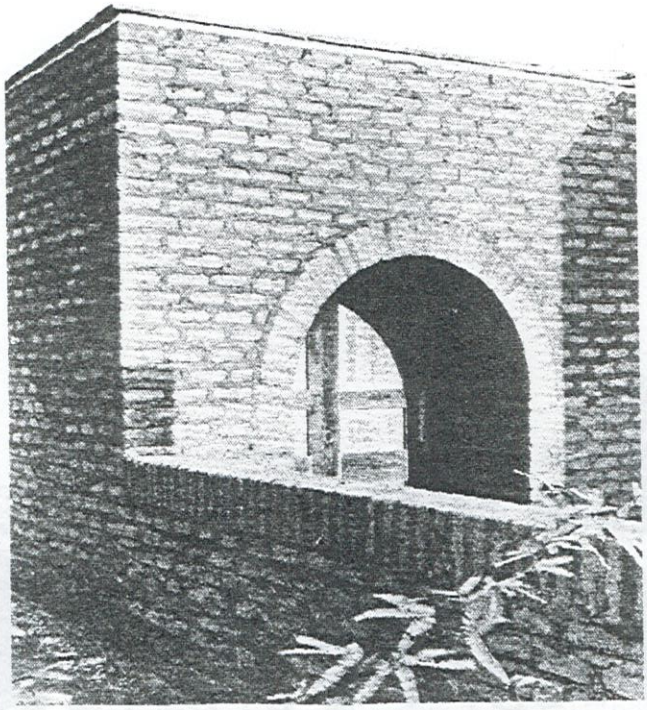
Réf. : Photographie CRATerre.

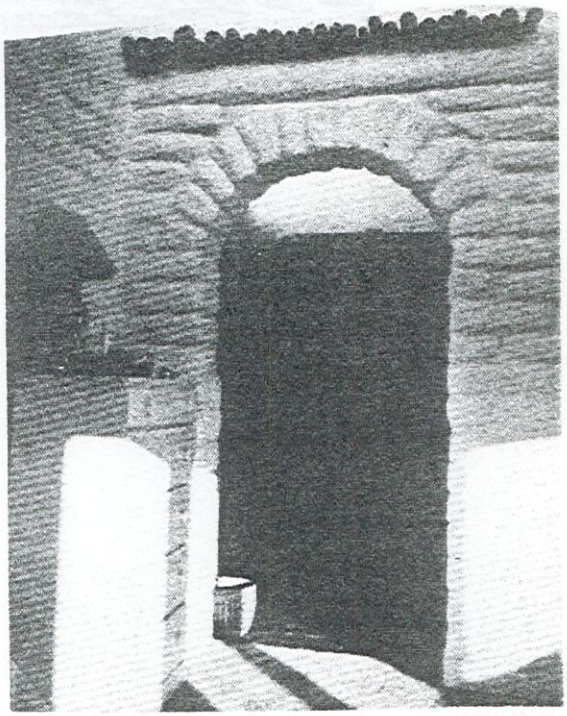
© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
USA

Utilisation d'arcs dans des maisons individuelles récentes aux USA - Adobes stabilisées.





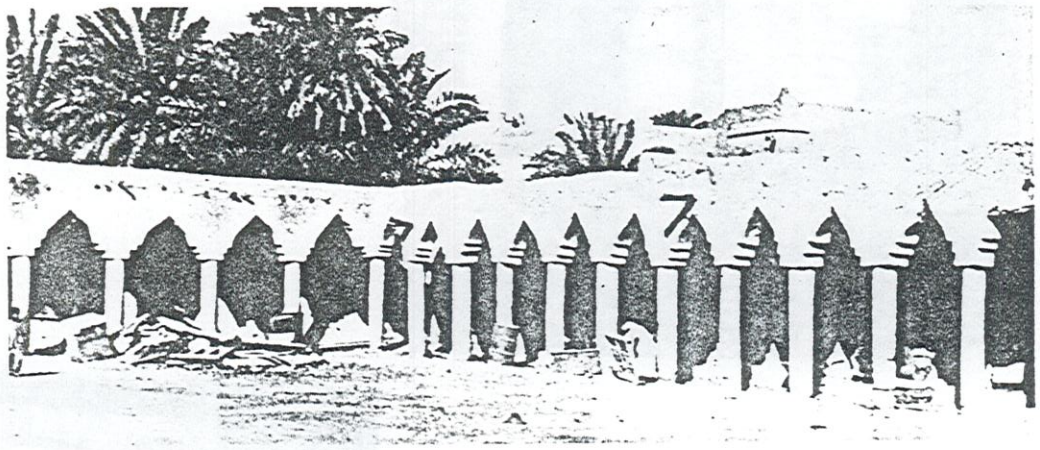
Réf. 1 : Adobe Today 27
Réf. 2 : Adobe Today 39
Réf. 3 : Adobe News 14.

© CRATerre 86

ARCS EN MAÇONNERIE

TYPOLOGIE
ARABIE SAOUDITE

Arcs en doucines affrontées avec naissances en encorbellement, réalisés en adobes. Mosquée de Riyad, Arabie Saoudite.



Réf. : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.

© CRATerre 86

ARCS COMPOSITES

© CRATerre 86

ARCS COMPOSITES

Les exemples les plus connus de cette typologie d'arcs composites appartiennent à l'architecture vernaculaire des régions du Sud du Niger et du Nord du Nigéria. Il s'agit de constructions en terre, armées de bois, dont la structure de toiture est constituée d'arcs renforcés. Quel que soit le rôle structural des armatures, les arcs de forme funiculaire travaillent essentiellement en compression donnant par conséquent un rôle structural majeur à la terre. Il s'agit davantage d'une technique d'armature-coffrage perdu dans l'épaisseur de la maçonnerie de bauge.

L'architecture des Soraye Hausa du Niger fournit les plus beaux exemples. Cette technique d'arcs renforcés et de bauge armée permet de franchir des portées supérieures à 8 mètres. L'armature est constituée de tiges minces et souples, découpées dans des troncs de palmier, entrelacées puis enrobées d'un épais mortier de bauge.

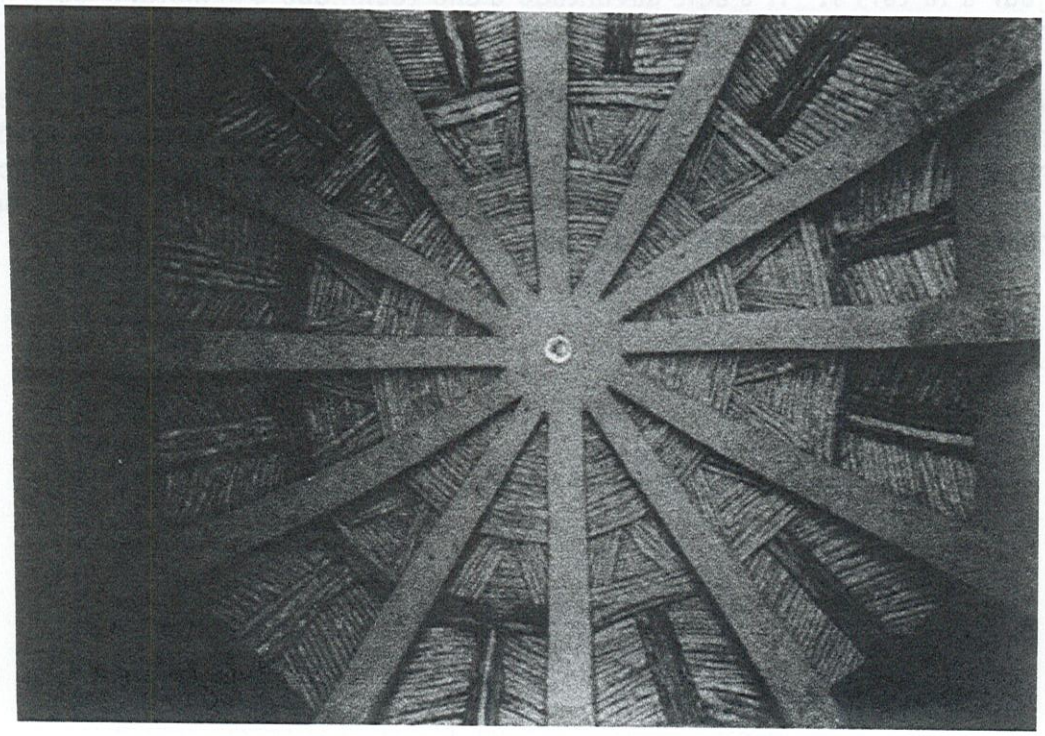
© CRATerre 86

ARCS COMPOSITES

TYPOLOGIE
NIGER ET NIGERIA

1 - Structure en arcs doubleaux armés, concentriques, Niger.

2 - Les dégradations du sommet de la structure laissent apparaître l'armature de bois des arcs de bauge.



Réf. 1 : Photographie CRATerre

Réf. 2 : BOURGEOIS, J L. ; PELOS, C. ; Spectacular Vernacular, Ed. Peregrine, Smith Books, Salt Lake City, 1983.

© CRATerre 86

ARCS COMPOSITES

CONSTRUCTION
NIGER ET NIGERIA

1 – Structure d'une case Soraye Hausa du Niger :

A – Mur en bauge sur soubassement en cailloux noyés dans un mortier de terre,

B – Armatures principales noyées dans le mur de bauge, au droit de la naissance des arcs,

C – Chaînages horizontaux,

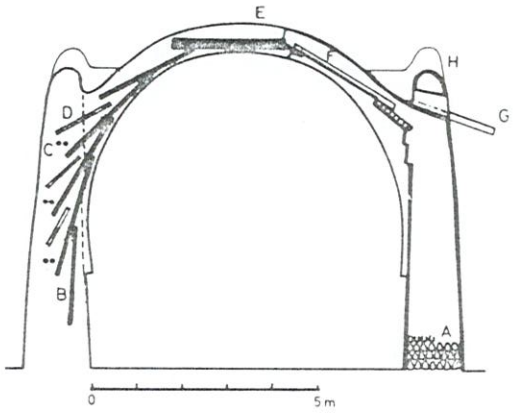
D – Armatures des reins de l'arc,

E – Calotte en bauge,

F – Lattis de bois de palmier supportant la calotte en terre,

G – Gargouille,

H – Acrotère en bauge.



2 – Construction des arcs.

Réf. 1 : LEARY, A, Artaud Archeology Research Papers n° 12.

Réf. 2 : DETHIER, J. ; Catalogue de l'exposition "Des Architectures de Terre", CCI, Paris, 1981.

© CRATerre 86

VOUTES ET COUPOLES MONOLITHIQUES

© CRATerre 86

VOUTES ET COUPOLES MONOLITHIQUES

Trois modes de construction en terre permettent de réaliser des voûtes et coupoles monolithiques :

1 - La terre creusée, qui correspond à l'architecture troglodytique,

2 - La terre damée, qui correspond à l'architecture en pisé,

3 - La terre façonnée, qui correspond à l'architecture en bauge ou en façonnage direct.

Les voûtes creusées et les voûtes façonnées sont les techniques les plus anciennes de voûtes monolithiques. Certaines régions du monde développent encore ces modes de construction des voûtes par creusement ou façonnage qui sont relativement simples et qui emploient peu d'outils. Seules les voûtes monolithiques en pisé correspondent à une technologie plus actuelle associée à l'emploi de coffrages résistants et parfois assez sophistiqués.

© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

L'importance du patrimoine d'architecture en terre troglodytique a longtemps été négligée, au bénéfice de l'architecture troglodytique en pierre. La géographie mondiale de l'architecture en terre creusée est très dépendante du climat et de la nature du sol. Le plus souvent, les constructions sont creusées dans l'épaisseur de sols tendres de tuf, lœss ou de lave poreuse et sont établies sous des climats chauds et secs. A l'exception de la fameuse ceinture de lœss chinoise, ce sont les pays méditerranéens d'Europe et les pays maghrébins qui concentrent ce type d'architecture dont un bon nombre d'établissements sont encore occupés. La construction de voûtes monolithiques en terre creusée correspond à une technique d'excavation horizontale, soit directement dans le front apparent de la couche de terre, soit après creusement vertical d'un espace de cour intérieure qui répartit les accès aux différentes pièces de l'habitation. L'excavation débute généralement par les plafonds des espaces qui adoptent des formes voûtées indispensables à la stabilité des constructions creusées. Les formes de voûtes monolithiques creusées sont généralement en berceaux, à flèches plus ou moins importantes. Les voûtes surbaissées et plates sont rares car elles présentent un risque d'effondrement du fait de l'introduction de contraintes de traction. On a pu aussi observer des formes de voûtes creusées complexes, en berceaux croisés ou même en coupoles.

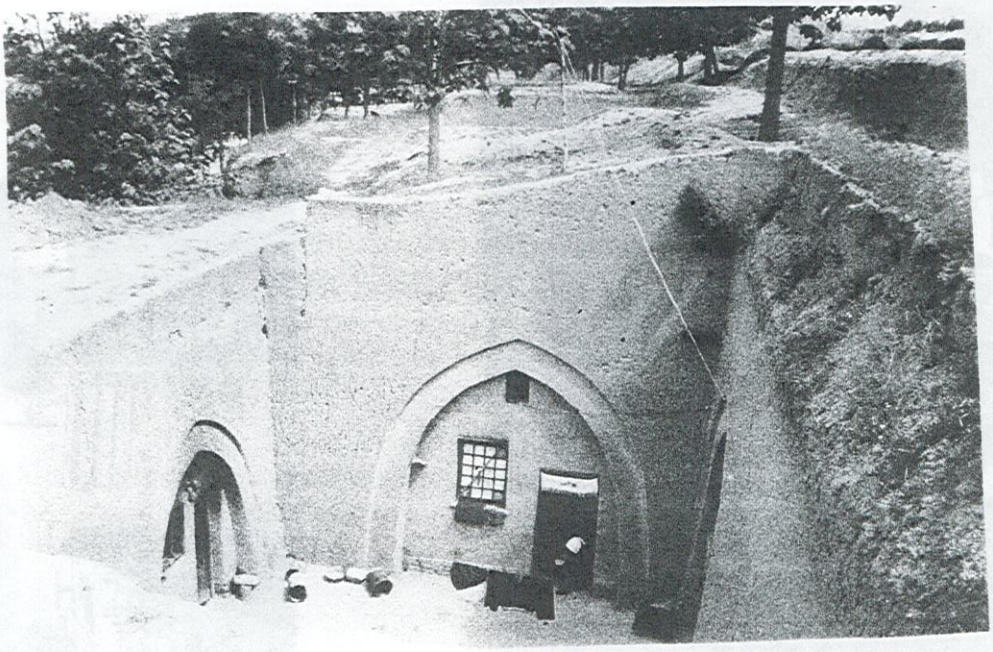
© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

TYPOLOGIE CHINE

Cour d'une habitation creusée chinoise.

L'architecture troglodytique en terre de la ceinture de lœss chinoise, dans les provinces de Honnan, Shansi et Kansu est organisée autour d'une cour centrale excavée par creusement vertical. Cette vaste région rassemble près de 10 millions de chinois qui occupent des milliers d'habitations. Dans la région de Toyang, les "puits" des habitations creusées sont profonds de 9 à 10 mètres et d'une surface au sol allant de 200 à 250 m2. Les pièces qui s'organisent autour de cette fosse de plan carré ou rectangulaire sont voûtées, avec des portées assez petites d'environ 4 mètres et une hauteur sous l'intrados des berceaux voûtés à peu près équivalente. L'architecture troglodytique chinoise a aussi d'autres vocations que celle d'habitation. On observe en effet de nombreuses constructions creusées à vocation d'usines, d'écoles, de locaux administratifs ou même d'hôtels.



Réf. : Photographie de la revue MIMAR, 3.

© CRATerre 86

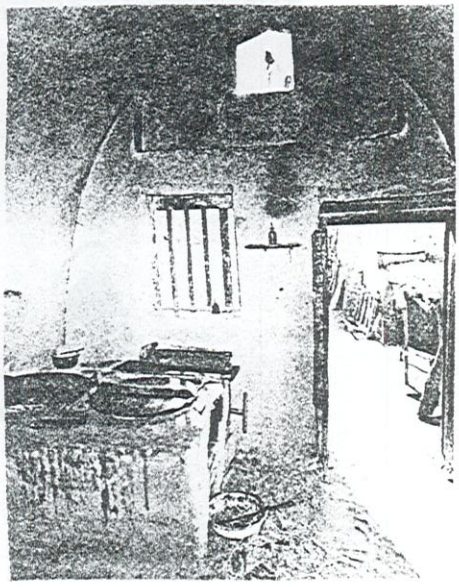
VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

TYPOLOGIE CHINE

Voûtes creusées, en forme de berceaux à génératrices légèrement brisées.

1 - Atelier de tissage.

2 - Cuisine.



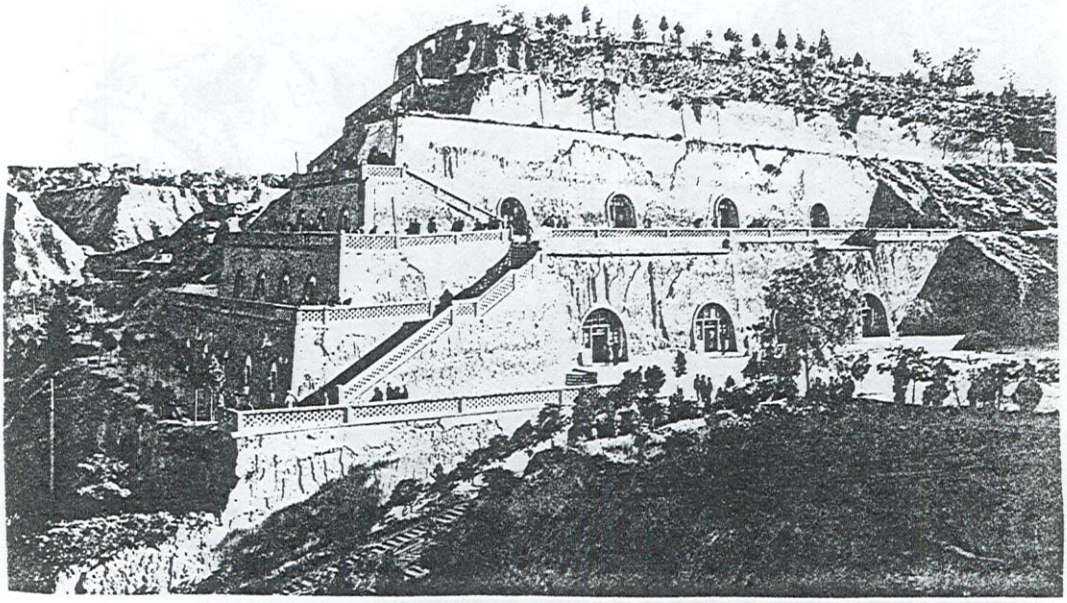
Réf. : Revue MIMAR, 3 ; Transformations de l'habitat rural.

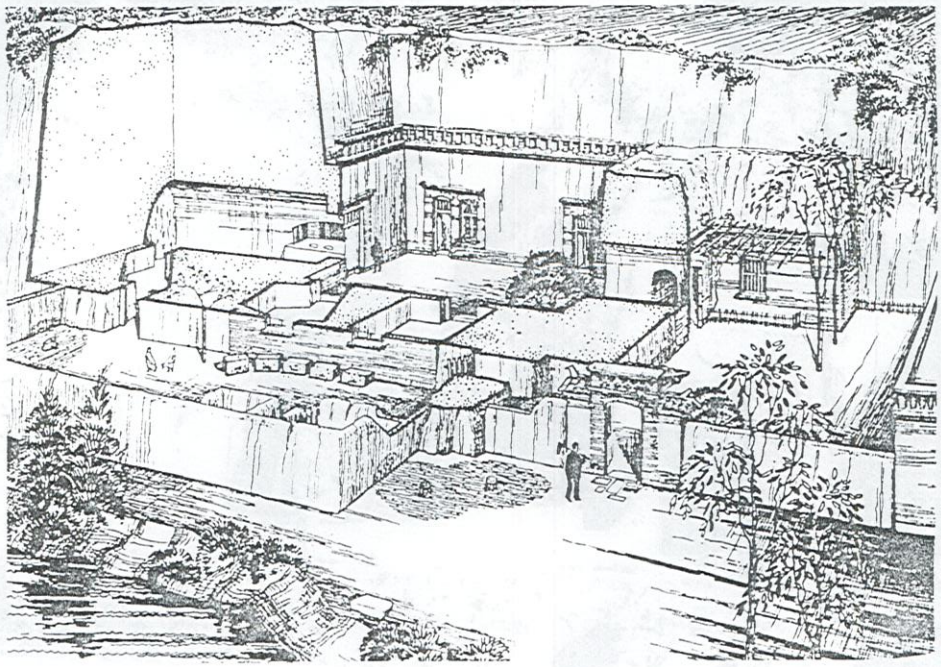
© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES **TYPOLOGIE CHINE**

1 - Ecole et internat dans la province de Shanxi.

2 - Coupe perspective de la maison Dian Lui à Xingyang, province du Henan - (dessin de Y L. Zhon).





Réf. : Photographie et dessin de la revue MIMAR, 3 ; Transformations de l'habitat rural.

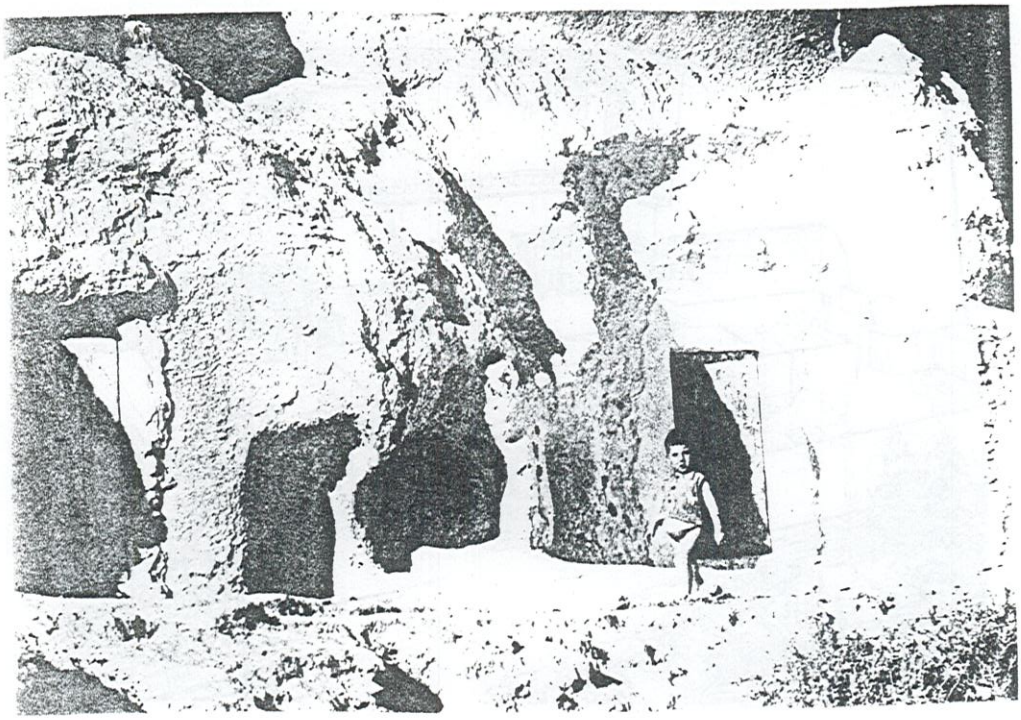
© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

TYPOLOGIE ESPAGNE

1 – Habitations troglodytiques à Cuevas del Almanzora, Espagne.

2 – Habitations troglodytiques à Guadix, Espagne.



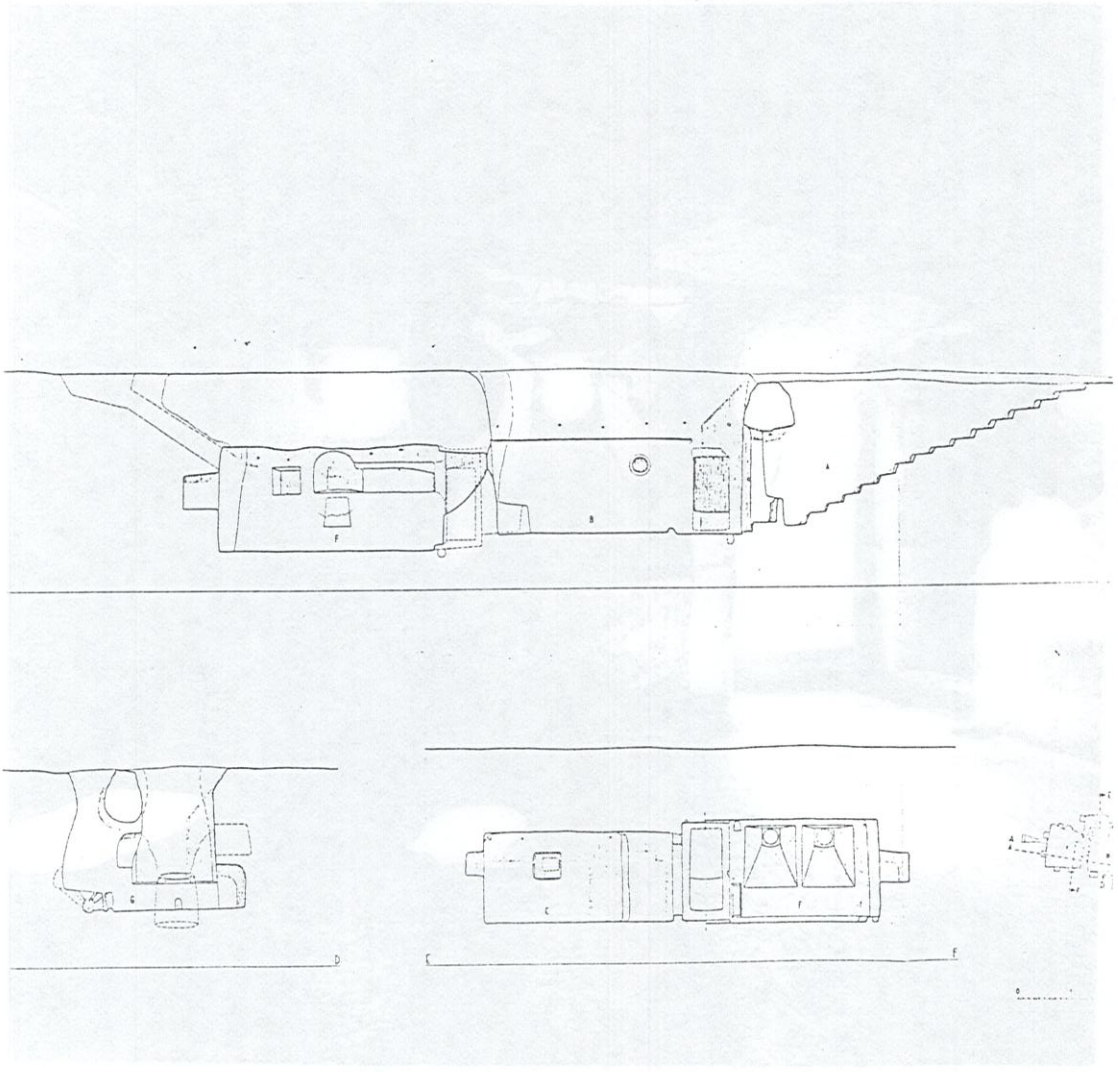
Réf. : LANDER, H. ; NIERMANN, M. ; Lehm architektur in Spanien und Africa, Ed. Karl Robert Langewiesche nachfolger, Hans Köster Königstein im Taunus, 1980.

© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

TYPOLOGIE EGYPTE

Les ermitages chrétiens du désert d'Esna, en Egypte, furent construits entre la fin du 6ème et le début du 7ème siècles. Leur plan s'organise autour d'une cour centrale à ciel ouvert qui distribue des pièces aux surfaces parfois importantes, de l'ordre de 30 m2. Les voûtes sont assez plates et supportent une épaisseur de terre d'environ 2 mètres. Les fouilles ont révélé un bon état des constructions malgré l'effondrement de plusieurs voûtes.



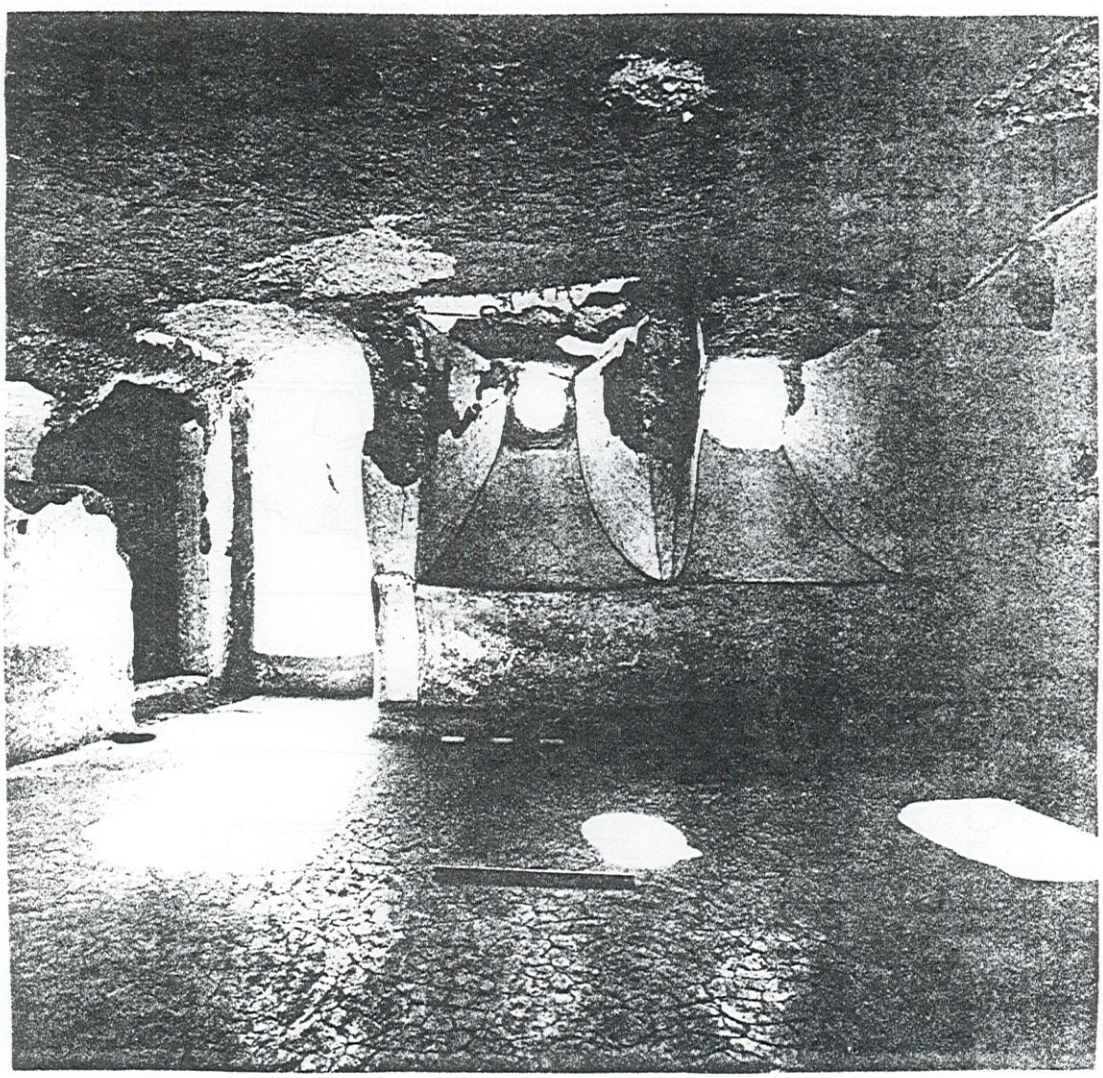
Réf. : SAUNERON, S. ; JACQUET, J. ; Les ermitages chrétiens du désert d'Esna. Institut français d'Archéologie du Caire, Paris, 1972.

© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES CREUSEES

TYPOLOGIE EGYPTE

Intérieur de l'ermitage n°1 du désert d'Esna, vue de l'oratoire.



Réf. : SAUNERON, S. ; JACQUET, J. ; Les ermitages chrétiens du désert d'Esna. Institut français d'Archéologie du Caire, Paris, 1972.

© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

Les développements contemporains de l'utilisation de la terre en construction ont amené des expérimentations sur les voûtes en pisé. Les résultats obtenus n'ont pas suscité un intérêt permettant des applications en nombre. Jusqu'à ce jour, la construction de voûtes monolithiques en terre damée a développé l'emploi de coffrages de type intégral ou modulaire. Cette orientation ne doit pas être considérée comme limitative d'un plus large registre de possibilités d'emploi de coffrages qui pourraient être adaptés à tous types de formes de voûtes en pisé, même complexes.

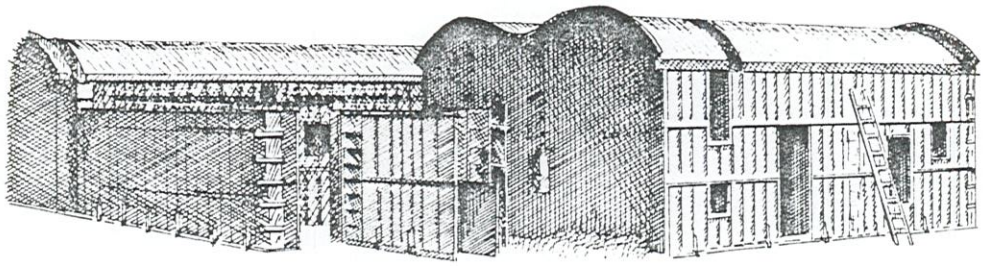
© CRATerre 86

VOUTES MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

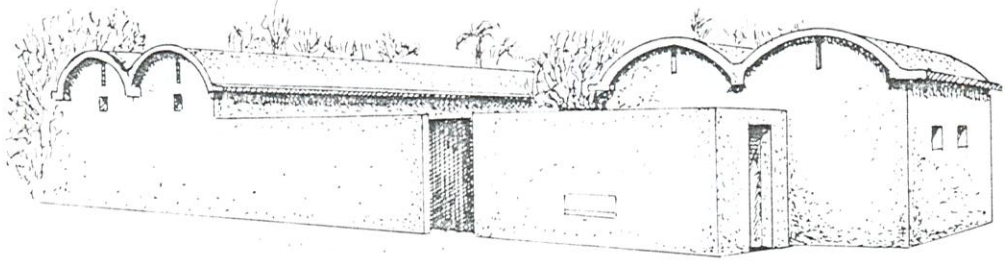
TYPOLOGIE MAROC

Dans le projet du CERF BTS 67, réalisé à Ouarzazate (MAROC), sous la direction de Alain Masson, les maisons en pisé stabilisé sont mises en œuvre d'un seul bloc grâce à des coffrages intégraux. Les voûtes, épaisses de 8 cm, sont surbaissées et les poussées reprises par des culées en béton et des tirants métalliques.

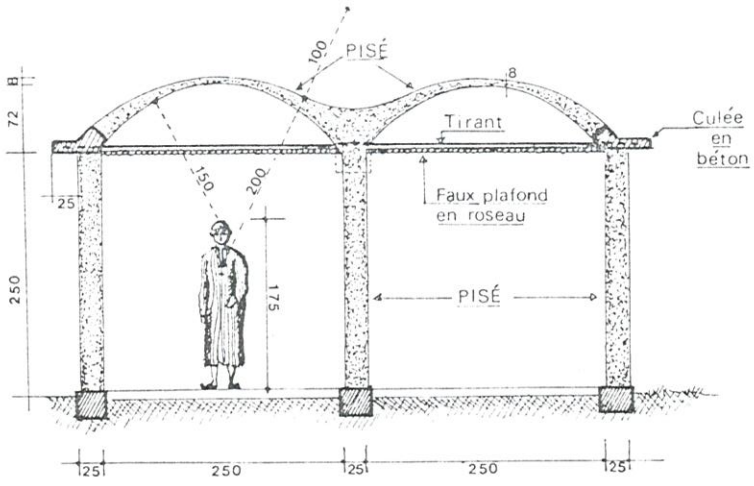
Projet de OUARZAZATE



Coffrage



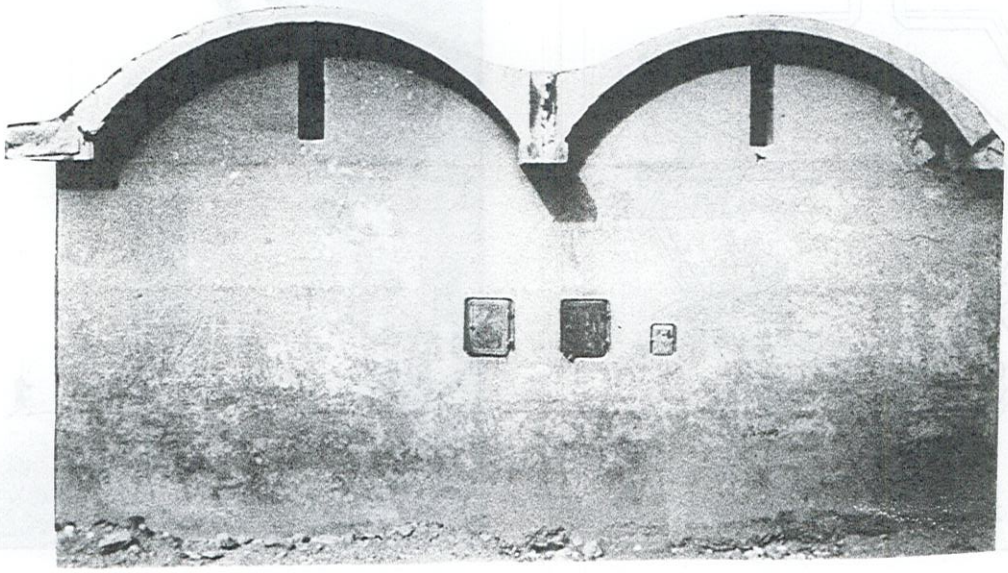
Vue générale des batiments



Réf. : CRATerre, Construire en terre, Ed. Alternatives, Paris, 1979, d'après doc. CERF.

© CRATerre 86

Aspects du projet BTS 67 de Ouarzazate, Maroc, réalisé par le CERF, sous la direction de Alain Masson.



Réf. : Photographies, DAVID, Th.

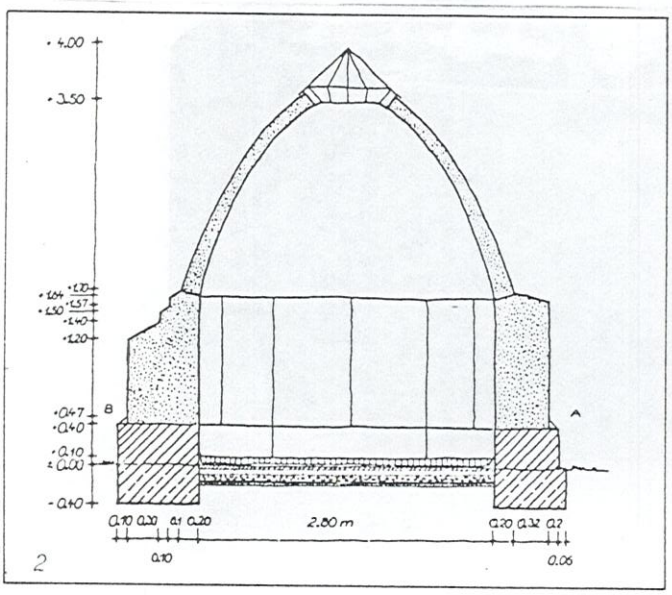
© CRATerre 86

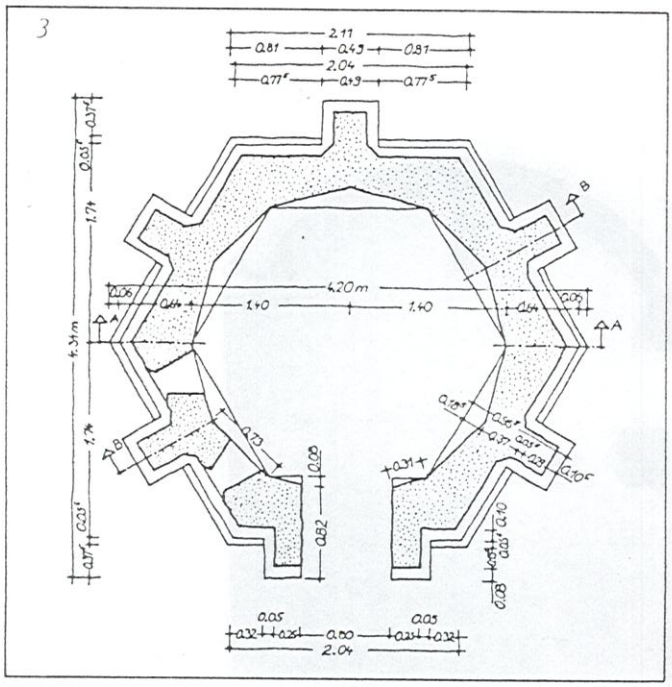
COUPOLES MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

TYPOLOGIE RFA

1 – Expérimentation d'une coupole en pisé, réalisée au GHK. (Gesamthochschule) de Kassel (RFA), sous la direction de Gernot Minke. La coupole est générée par la rotation d'un arc ogival équilatéral, légèrement surbaissé. Son diamètre est de 2,80 m et son épaisseur de 20 cm en sa base et de 10 cm en son sommet.

2 – Vue de la coupole, terminée.





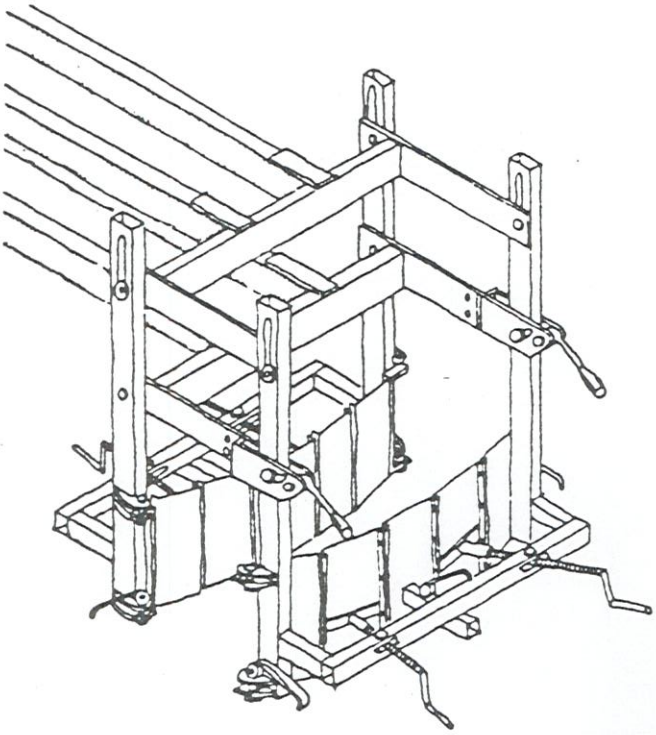
Réf. 1 : MINKE, Gernot ; Bauen mit lehm (1 et 2) Ökobuch Verlag, Grebenstein, 1984.
Réf. 2 : SCHNEIDER, J. ; Am Anfang Die Erde Sanfter Baustoff Lehm, Ed. Fricke im Rudolph Müller Verlag, Francfort, 1985.

© CRATerre 86

COUPOLES MONOLITHIQUES EN TERRE DAMEE

CONSTRUCTION RFA

Pour la mise en œuvre de la coupole expérimentale en pisé du GHK., un coffrage spécial a été conçu qui pivote autour d'un mât et qui est réglable tant en hauteur, qu'en inclinaison et en courbure.



Réf. : MINKE, Gernot ; Bauen Mit Lehm (1 et 2), Ed. Ökobuch Verlag, Grebenstein, 1984.

© CRATerre 86

COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

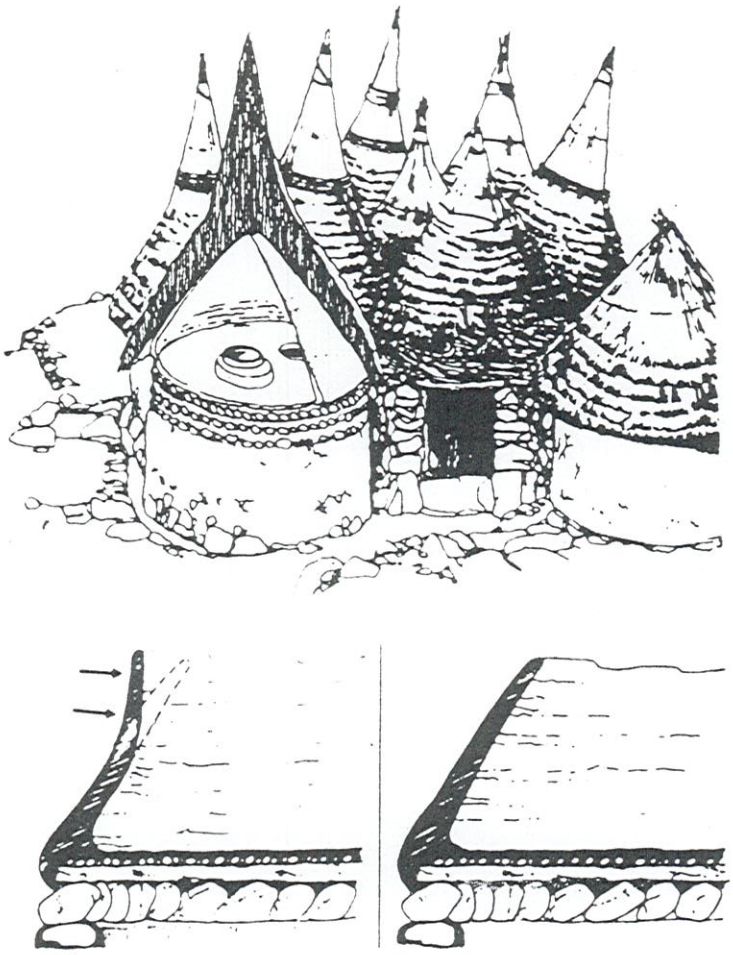
C'est l'architecture primitive qui lègue les plus beaux exemples de coupoles en terre façonnée. Aujourd'hui encore, beaucoup de pays, en Afrique noire notamment, perpétuent leurs traditions de construction en terre façonnée. Les greniers africains témoignent d'une qualité technique autant qu'architecturale. La technique de la terre façonnée est apparemment simple mais exige un savoir-faire élaboré qui manifeste une connaissance poussée de la matière, du matériau, de la structure et de la forme. La construction des coupoles en terre façonnée emploie une terre à l'état plastique, mise en œuvre sous forme de boules ou de boudins, de pains de terre préalablement préparés, soudés entre eux grâce à leur plasticité puis façonnés à la main. Les formes obtenues avec le façonnage direct sont très variées. Les plus courantes sont définies par la rotation d'un arc générateur sur un plan circulaire, de forme élancée ou ogivale ou même en mitre. Des formes moins courantes rappelant celles de grandes bouteilles, de gros pots ou vases de terre, de voûtes en arcs de cloître sur plan carré peuvent être également observées.

© CRATerre 86

COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

CONSTRUCTION - TYPOLOGIE CAMEROUN

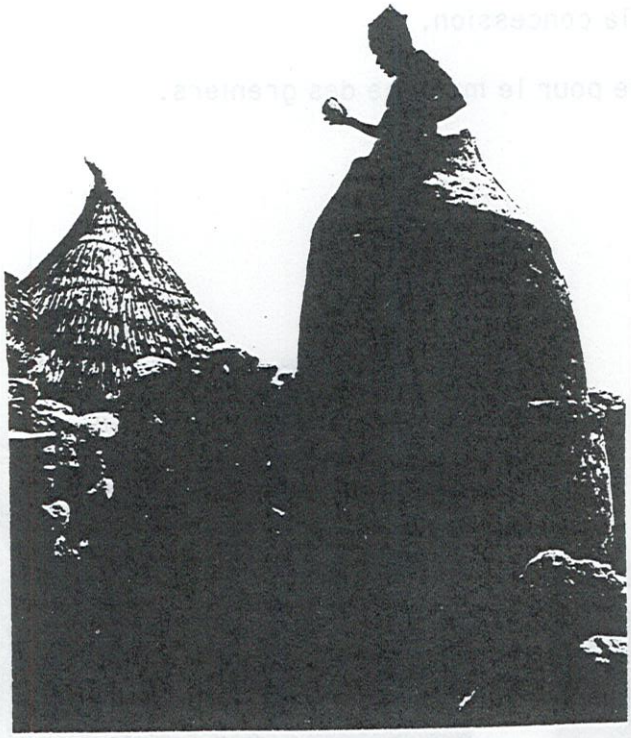
Au Nord Cameroun, la construction des greniers Mafa réclame l'intervention de spécialistes, tant pour le choix de la terre que pour le montage des greniers en forme de coupole façonnée. La terre est très plastique et préparée sous forme de boudins empilés en assises de 20 à 25 cm. Cette opération généralement effectuée le matin n'est pas encore associée au façonnage de la courbure de la coupole car la terre est encore trop plastique. Ce n'est qu'en fin d'après-midi, après un début de dessication du matériau que la paroi est travaillée à l'aide d'un galet, par lissage et martelage afin de lui donner son inclinaison et sa courbure. L'assise suivante n'est dressée qu'après un séchage quasiment complet de la précédente assise. Un seul homme est à l'ouvrage qui travaille en se tenant à l'intérieur du grenier-coupole. Suivant la qualité de la terre, sept à dix assises devront être réalisées. Une ouverture au sommet laissera circuler librement l'air. Le façonnage direct de boudins de terre permet de réaliser des coupoles dont le diamètre est supérieur à trois mètres pour une épaisseur des parois qui dépasse rarement les quatre à cinq centimètres à mi-hauteur. La protection de ces constructions est assurée par une couverture de chaume.

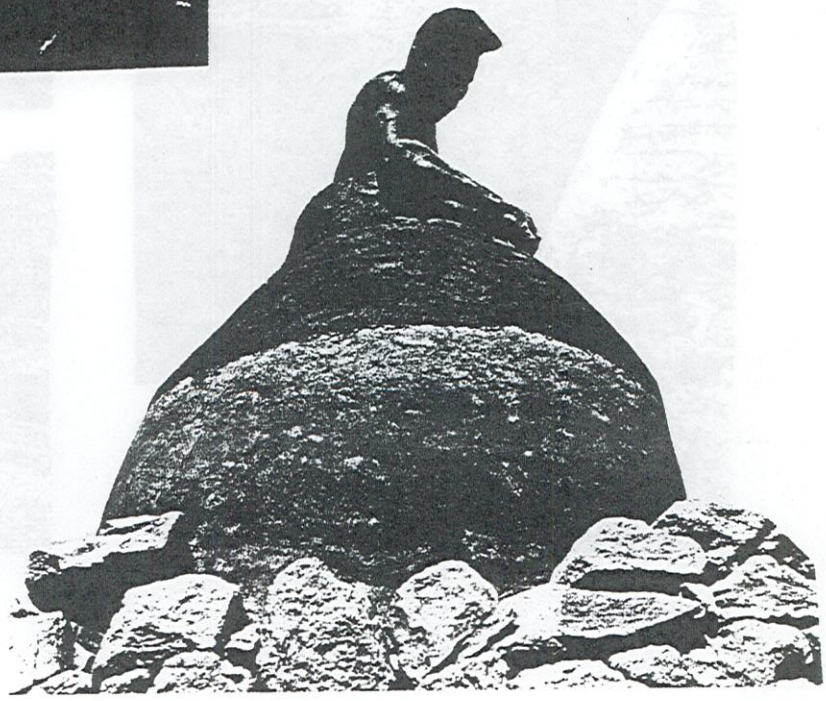


Réf. : SEIGNOBOS, Ch.; Nord Cameroun, Montagnes et Hautes Terre, Ed. Parenthèses, Roquevaire, 1982.

© CRATerre 86

1 et 2 - Exemples de greniers en terre façonnée chez les Mofou du Nord-Cameroun.





Réf. 1 et 2 : CHESI, G. ; Les derniers Africains, Ed. Arthaud, Paris, 1978.

© CRATerre 86

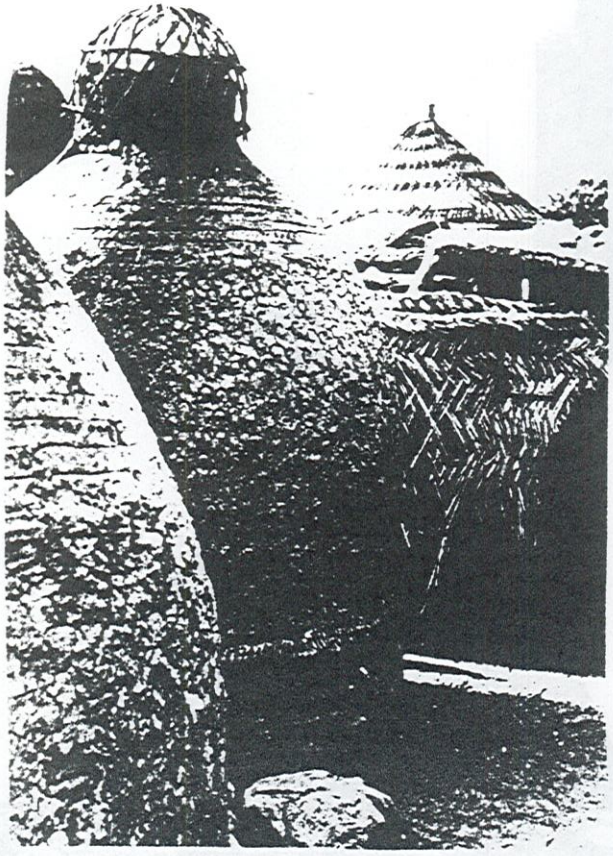
COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

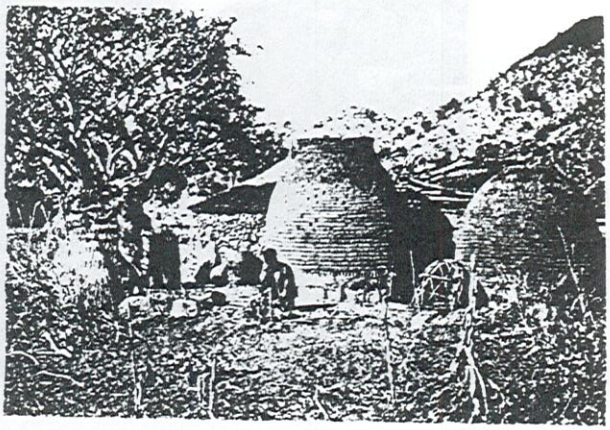
TYPOLOGIE - CONSTRUCTION CAMEROUN

Greniers-bouteilles chez les Daba de montagne du Nord-Cameroun. "La technique varie en ce que les boudins de terre, de taille réduite, restent apparents un peu à la manière de briques".

1 - Daba, grenier à l'intérieur de la concession.

2 - Confection des boudins de terre pour le montage des greniers.





Réf. 1 et 2 : SEIGNOBOS, Christian ; Nord Cameroun, Montagnes et Hautes Terres, Ed. Parenthèses, Roquevaire, 1982.

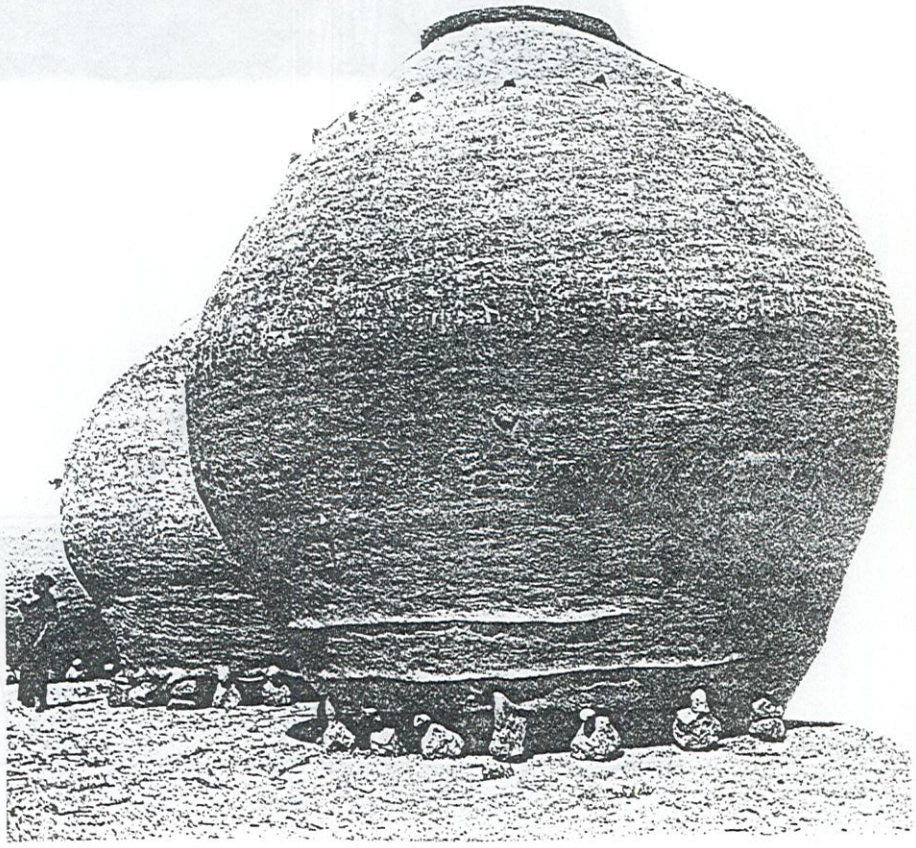
© CRATerre 86

COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE NIGER

1 - Silos à grains, entre Niamey et Gao, au Niger.

2 - Silos à grains au Niger.



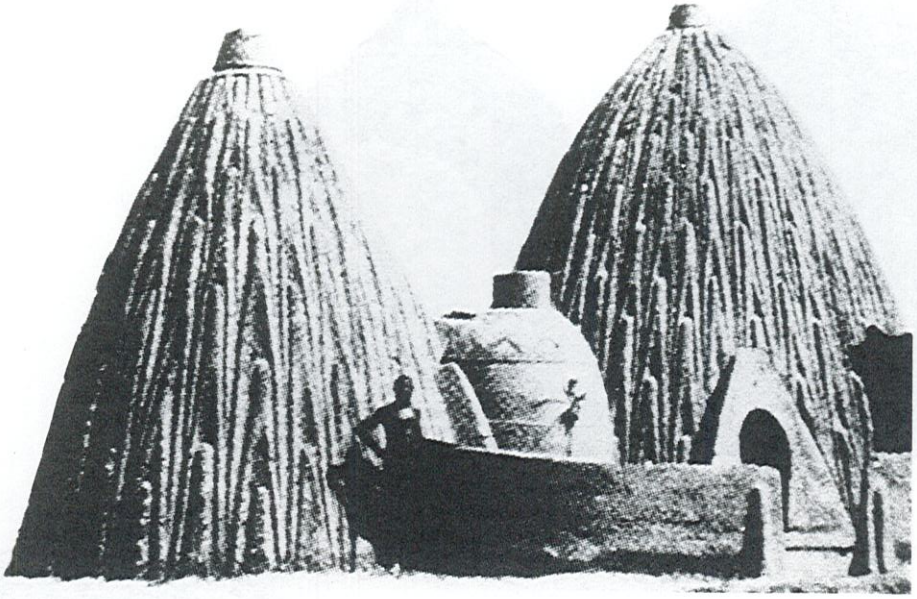
Réf. 1 : GARDI, René ; Maisons Africaines, Ed. Sequoia, Paris-Bruxelles, 1974.
Réf. 2 : RENAUDEAU, M. ; Regards sur le Niger, Ed. Delroisse, Paris, 1978.

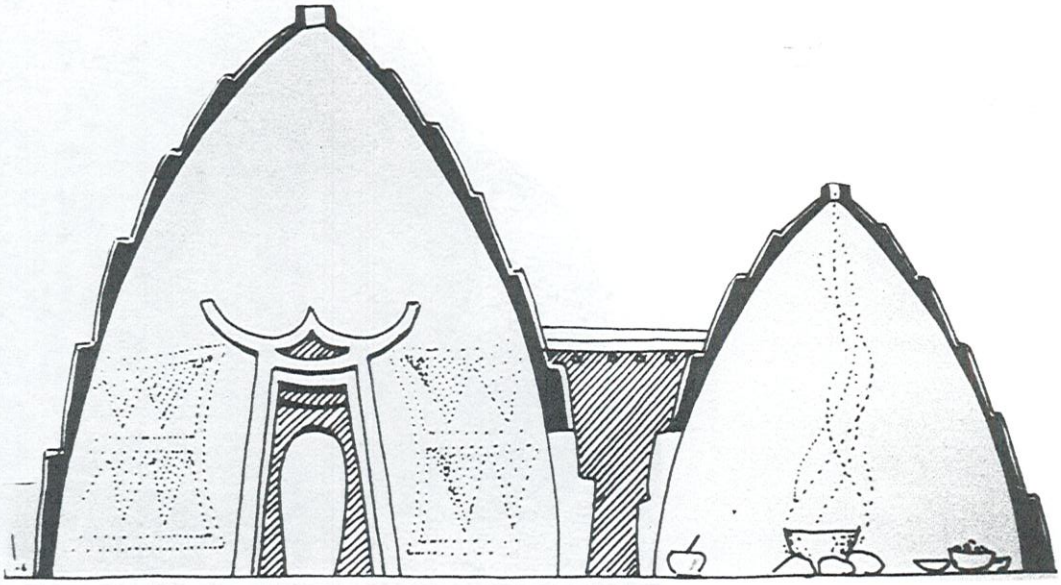
© CRATerre 86

COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE CAMEROUN

Photographie et coupe des fameuses cases-obus de l'ethnie Mousgoum du Cameroun. Ces coupoles élancées, hautes de 6 à 7 mètres peuvent avoir un diamètre supérieur à 5 mètres. L'épaisseur de la paroi n'est pas supérieure à 10 centimètres. Le décor en épi est aussi une protection contre l'érosion du ruissellement qui est ralenti par les sinuosités de la matière.





Réf. : Documentation CRATerre.

© CRATerre 86

COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

TYPOLOGIE BURKINA FASO

Greniers façonnés dont les sommets sont des voûtes en arc de cloître sur plan carré. Village Marka entre Koudougou et Dedougou, Burkina Faso.

Réf. : Photographie DIAVOLTA, carte postale Eurolux, 1978.

© CRATerre 86

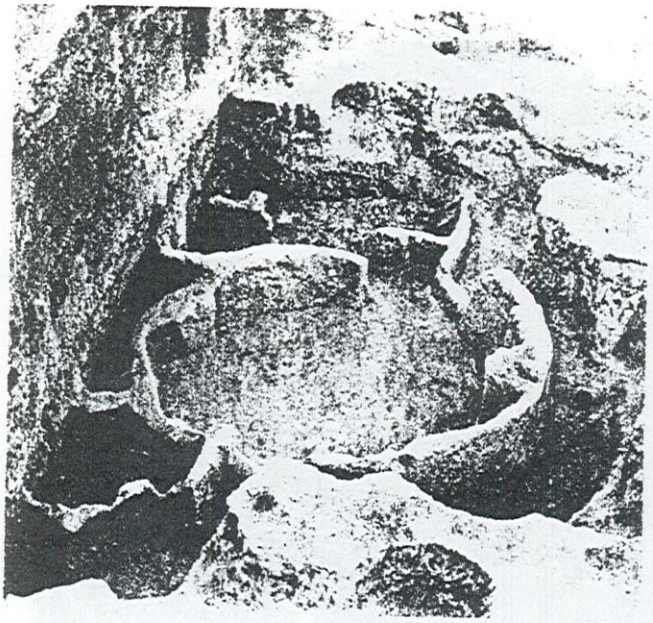
COUPOLES EN TERRE FAÇONNEE

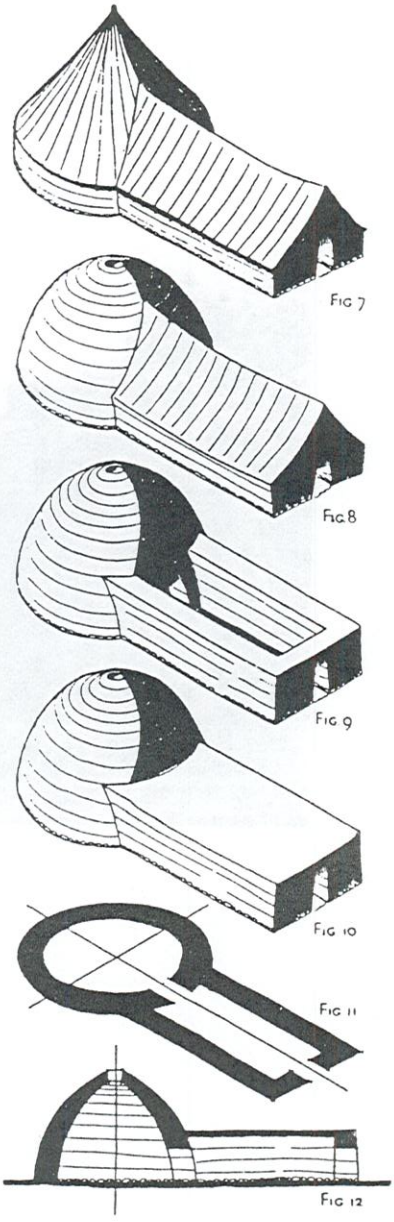
TYPOLOGIE IRAQ

Les tholoï des sites halafiens du Vème millénaire semblent avoir été élevées en bauge sur des empierrements. Certaines de ces coupoles coniques ou ellipsoïdales avaient un diamètre de 4 mètres et jusqu'à 6 mètres. L'épaisseur des parois en bauge variait de 25 à 30 cm (Tell Arpachiyah, Tepe Gawra) à 70 cm (Yarim Tepe II).

1 - Tepe Gawra : tholos niveau XX (d'après Tobler, 1950).

2 - Reconstitution des tholoï de Tell Arpachiyah (d'après Mallowan, 1935).





Réf. 1 et 2 BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES ET COUPOLES EN MAÇONNERIE

© CRATerre 86

VOUTES ET COUPOLES EN MAÇONNERIE

Les voûtes et coupoles en maçonnerie sont bâties en petits éléments appareillés. Généralement, le matériau de construction est la brique d'adobe ou le "strut" (Iran). Aujourd'hui, le bloc de terre comprimée est aussi employé pour la construction de voûtes en maçonnerie. Ce matériau offre de meilleures résistances à la compression autant qu'à la flexion mais pèche par rapport à son poids supérieur à celui des adobes ou des "struts" traditionnels, donnant en conséquence des poussées beaucoup plus importantes pour des voûtes et coupoles de même épaisseur que celles traditionnellement bâties. La construction en petits éléments appareillés permet de bâtir tous les types de voûtes et coupoles connues pouvu qu'elles travaillent en compression. La portée des structures n'est limitée que par la résistance du matériau et la qualité de leur conception et de leur construction. Deux exemples historiques de voûtes en adobes attestent de possibilités extraordinaires.

- La citerne de Dilberjin Tepe, en Afghanistan du Nord, qui couvre un espace de 81 m2 (9 m x 9 m) par une voûte en trompe d'angle.

- La glacière de l'oasis de Meru, en Iran, couverte par une coupole en encorbellement de 16,70 mètres de diamètre, soit 285 m2.

Les techniques de mise en œuvre des voûtes et coupoles en maçonnerie en briques de terre sont variées, soit sur coffrage cintré intégral ou glissant, soit sans coffrage, en encorbellement, par tranches régulières ou irrégulières, ou encore par assises horizontales tronconiques.

© CRATerre 86

VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

Les voûtes en berceau coffré présentent un appareil de briques rayonnant, à la façon des arcs en maçonnerie clavés. C'est d'ailleurs par succession et juxtaposition d'arcs clavés qu'ont été bâties les premières voûtes, vers le début du troisième millénaire avant notre ère, sans doute à l'aide du déplacement d'un cintre de faible longueur. Par la suite, l'homme construira des voûtes totalement appareillées, à joints montants alternés, vraisemblablement dressées sur des coffrages intégraux. Aujourd'hui, dans la construction traditionnelle de voûtes en berceau (Egypte, Iran p e.) l'emploi de coffrages ou de cintres est rare ; la technique de construction par tranches est dominante. La construction des voûtes en berceau coffré présente l'intérêt de ne nécessiter que deux murs d'appui latéraux dont l'espacement et la longueur sont déterminés par le plan de translation de l'arc générateur. Il est ainsi possible d'ouvrir les deux extrémités de l'espace couvert par la voûte. Dans l'architecture ancienne des voûtes en berceau coffré, les génératrices de la forme sont le plus souvent en plein cintre ou paraboliques mais l'on observe quelques cas de formes intermédiaires. Aujourd'hui, dans les projets récents, on observe une tendance à bâtir des berceaux surbaissés dont les poussées sont reprises par des chaînages ou poutres tirants. La mise en œuvre adopte le coffrage glissant qui permet d'utiliser des briques de plus grande taille et en conséquence d'accélérer l'exécution. L'appareil à joints montants alternés est toujours adopté avec reprise de chaque nouvelle tranche en créneau.

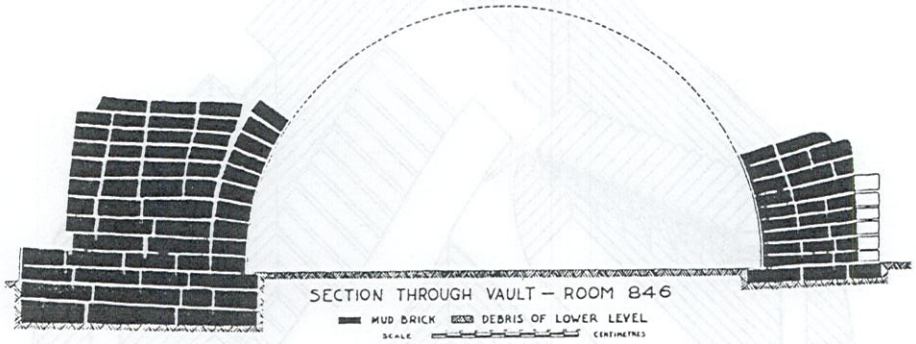
© CRATerre 86

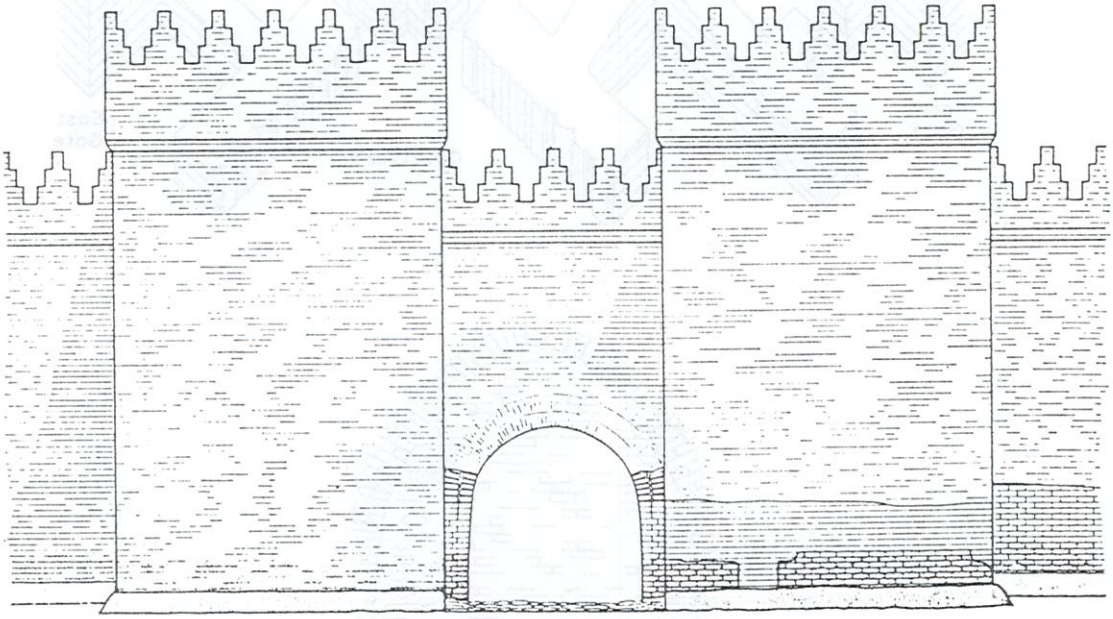
VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

TYPOLOGIE IRAQ

1 - Les vestiges les plus anciens, connus à ce jour, de voûtes en berceau à assises rayonnantes et de forme plein cintre, ont été révélés par les fouilles du site de Tepe Gawra, en Iraq du Nord et datent du IIIème millénaire. La portée de l'arc est de 3,25 mètres.

2 - Le porche d'entrée du fort Salmanazar, à Nimrud, Iraq du Nord, est une voûte en berceau de 4 mètres de portée formée par la juxtaposition d'arcs clavés en adobes. La voûte est à deux rouleaux et les murs latéraux de support présentent un léger encorbellement pour préparer les naissances de la voûte.





West Elevation

Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

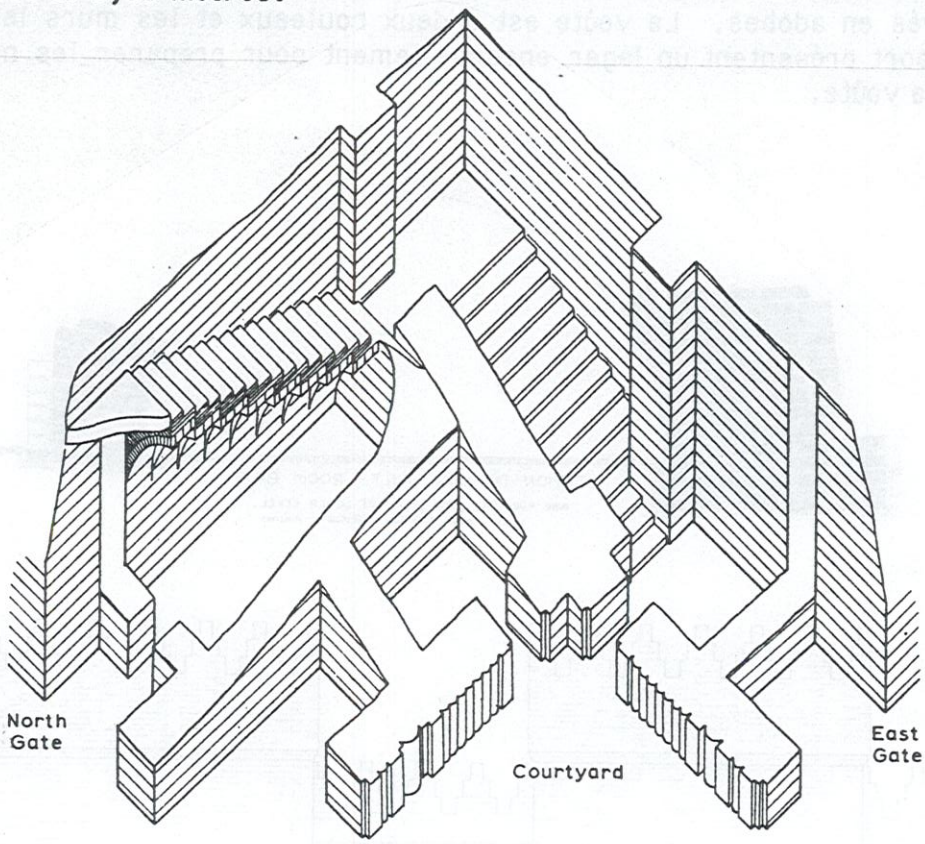
© CRATerre 86

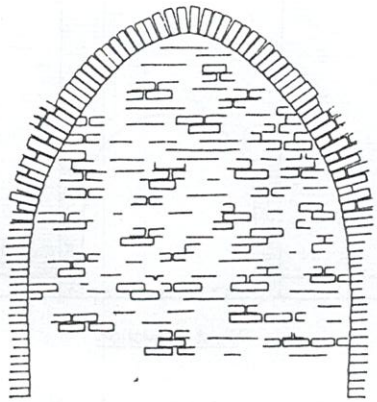
VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

TYPOLOGIE IRAQ

1 - Site de Tell Al Rimah, Iraq du Nord. Berceau à décrochements successifs supportant un escalier. La portée est de 3,80 m. L'ouvrage est daté du 2ème millénaire.

2 - La pièce VIII est couverte d'un berceau de forme parabolique bâti en assises rayonnantes appuyées sur des naissances en encorbellement. La portée est de 3,80 mètres.





PROFILE OF VAULT, ROOM VIII

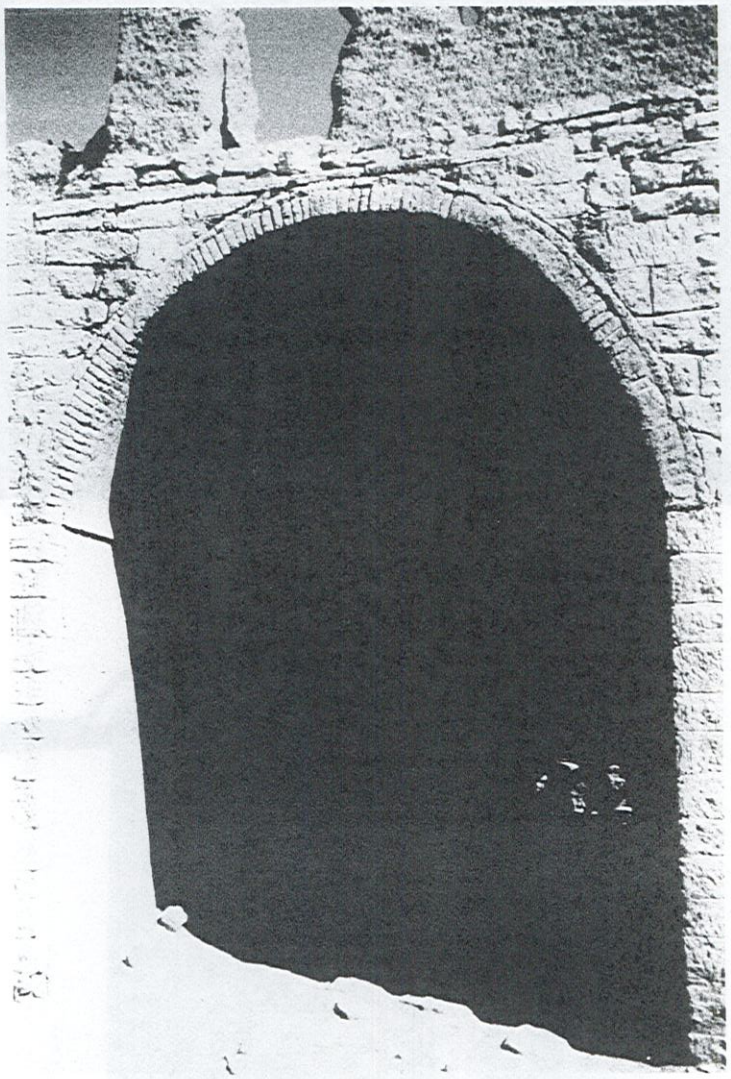
Réf. 1 et 2 BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

TYPOLOGIE EGYPTE

Monastère de Saint Siméon à Assouan, Egypte. Berceau à assises rayonnantes construit sur cintre, daté du 10ème siècle de notre ère.



Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

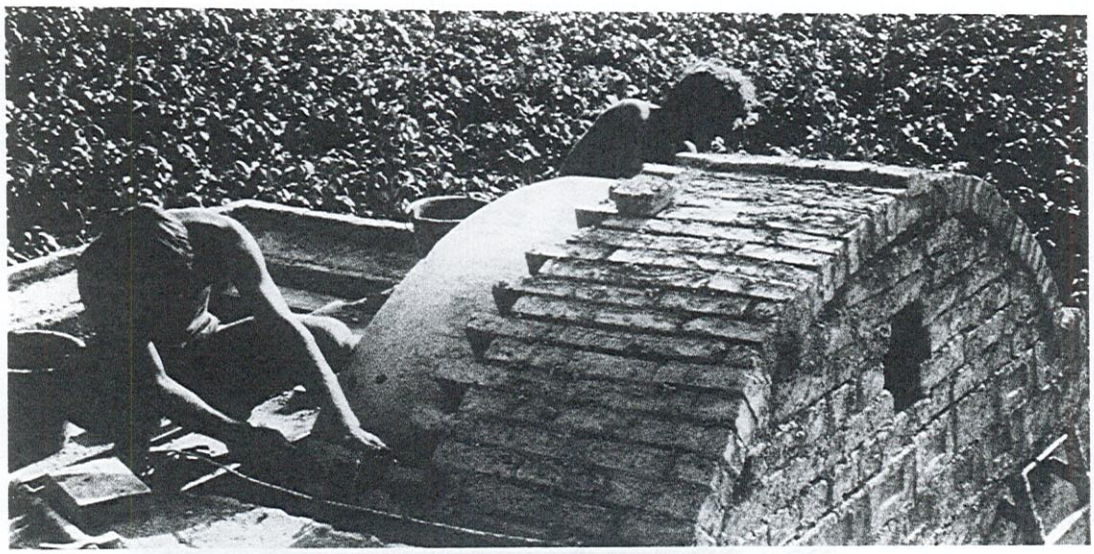
VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

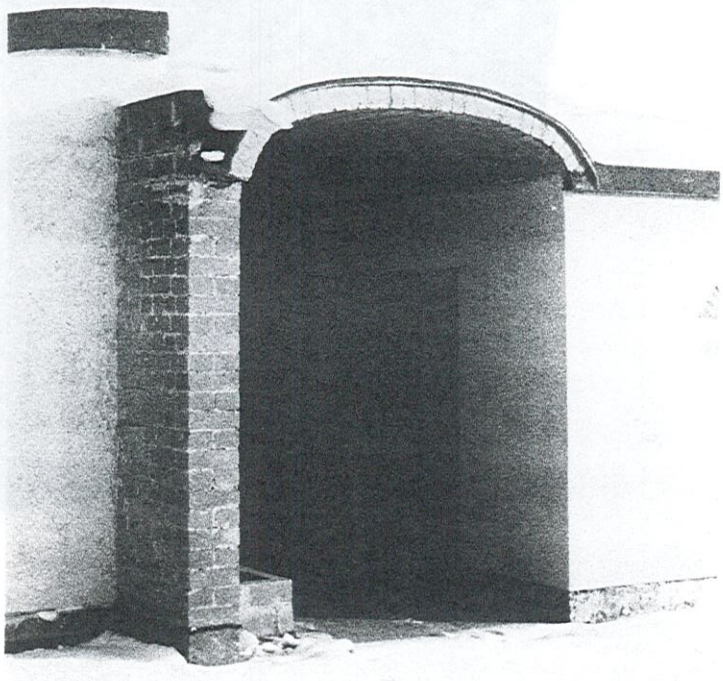
TYPOLOGIE - CONSTRUCTION FRANCE

Réalisation expérimentale d'étudiants du laboratoire terre de l'Ecole d'Architecture de Grenoble, au CSTB de Grenoble, 1983-84.

1 - Berceau en anse de panier ; les poussées sont reprises par un chaînage.

2 - Berceau surbaissé établi sur cintre glissant.





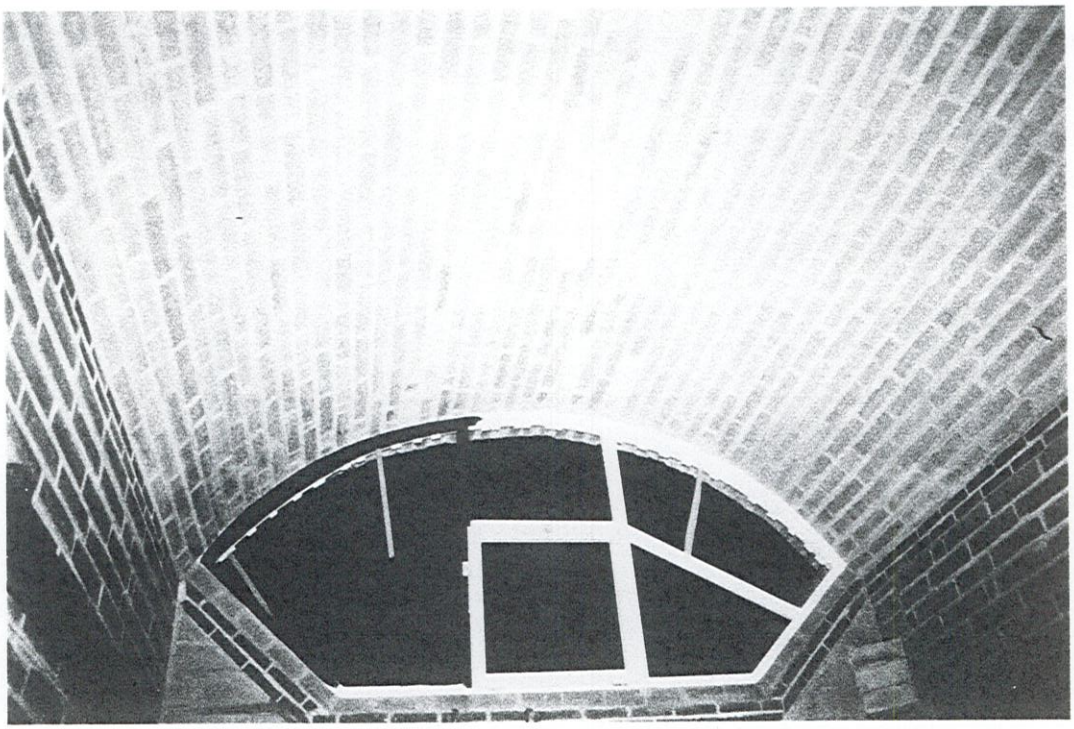
Réf. 1 et 2 : photagraphies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

VOUTES MAÇONNEES EN BERCEAU COFFRE

TYPOLOGIE FRANCE

Berceau à génératrice surbaissée, de 3,50 mètres de portée dont les poussées sont reprises par un chaînage. Centre de Terre de Lavalette (près de Toulouse), architecte Joseph Colzani.



Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU EN ENCORBELLEMENT

La technique de l'encorbellement n'a été que très peu employée pour construire des voûtes maçonnées en berceaux. Les sanctuaires irakiens d'Eridu et de Khafajah attestent de l'emploi de l'encorbellement pour la construction de voûtes de petites portées élevées au-dessus de couloirs ou de tombes. Mais, la faible résistance à la flexion de la terre crue impose une réduction des surplombs des assises de briques et donc, en conséquence, des flèches très importantes. L'encorbellement a surtout été utilisé pour la réalisation des naissances des voûtes en berceaux afin de réduire légèrement leur portée par rapport à la largeur de l'espace couvert.

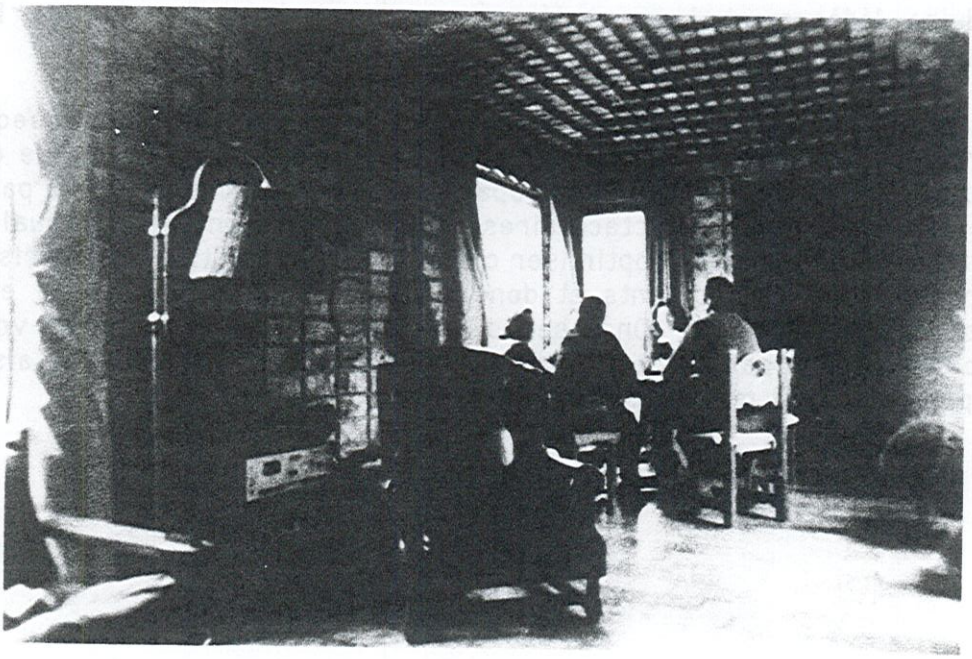
On connaît aussi quelques rares exemples de voûtes en intersection de berceaux en encorbellement. Ce type de structure qui impose de grandes hauteurs pour couvrir de petits espaces est peu économique et n'a pas connu de développements spectaculaires. L'amélioration de la qualité des matériaux permettrait d'optimiser ce type de construction en autorisant des surplombs plus importants et donc une réduction de la flèche et de la quantité de matériaux. On observe aussi que la construction de voûtes en encorbellement par succession d'assises planes carrées est très aisée et à la portée de tout maçon, sans formation particulière.

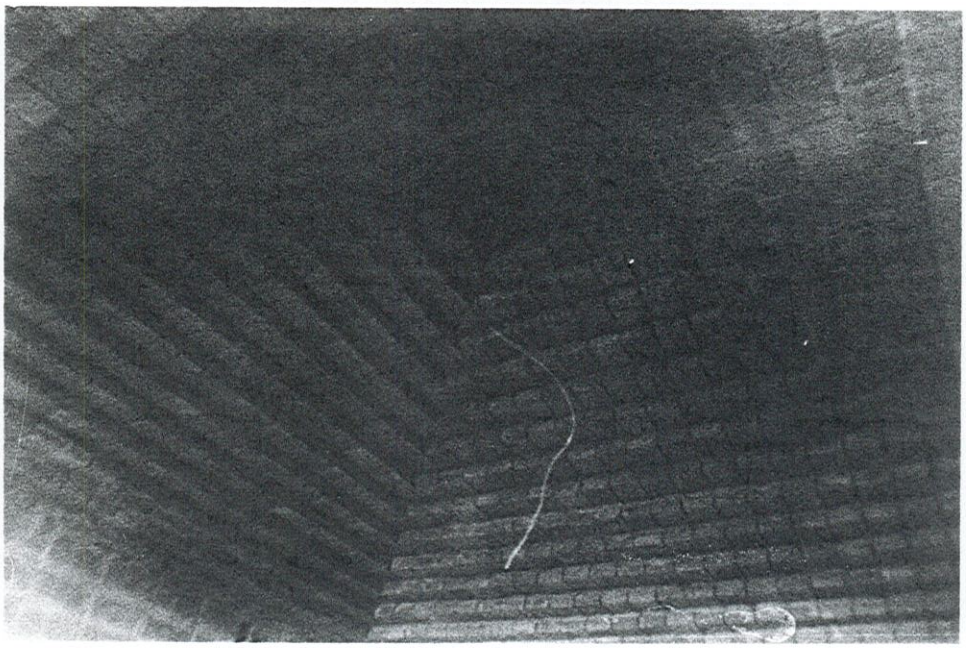
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE HONDURAS

Expérimentation au Honduras, en 1980. Construction de voûtes en encorbellement, en forme de pyramide surbaissée. L'emploi de blocs de terre comprimée et stabilisée de faible épaisseur a permis des surplombs importants qui engendrent cette forme surbaissée. La multiplication de la pyramide de base, supportée par des poutres en béton armé, permet de couvrir de grands espaces.





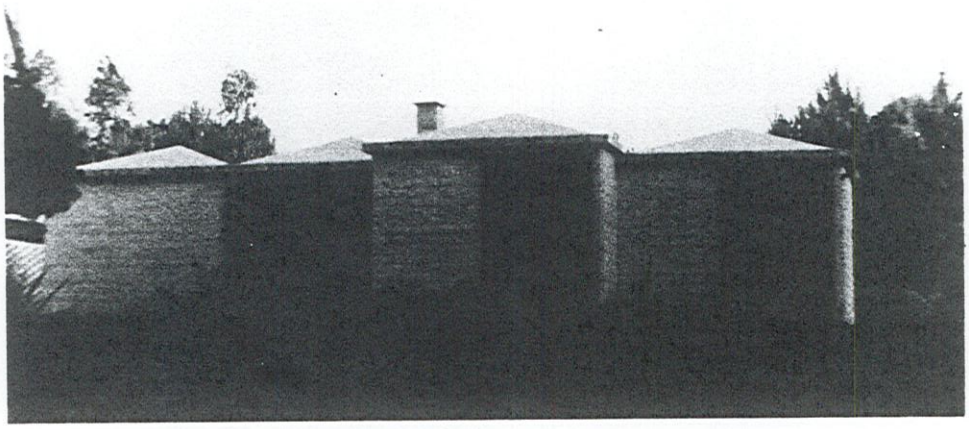
Réf. : Photographie PERRIN, A. ; doc. TECMOR - LUXOR.

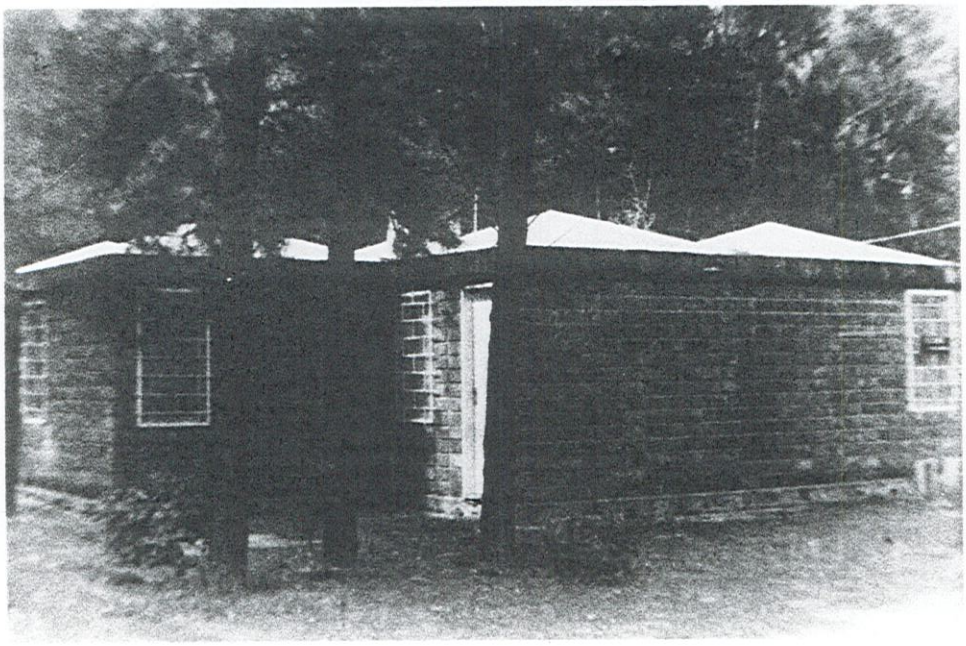
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU
EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE
HONDURAS

Vues extérieures de la réalisation expérimentale du Honduras, 1980. Un chaînage en béton armé, formant acrotère, ceinture les pyramides.





Réf. : Photographie PERRIN, A. ; doc. TECMOR - LUXOR.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

La construction des voûtes en berceau monté par tranches est aujourd'hui située vers la fin du 3ème millénaire dans deux principaux foyers de civilisation, en Egypte, dans la haute vallée du Nil (Nubie), et en Mésopotamie. Cette tradition de construction des voûtes y est toujours pratiquée et a été notamment relancée pour des applications modernes, en Egypte, par l'architecte Hassan Fathy (projets de villas privées et fameux village de "New Gourna"). La technique exploite les propriétés d'adhérence du mortier frais et l'effet de succion qui maintient les briques à la verticale. Les matériaux sont traditionnellement des adobes de faible épaisseur qui offrent un bon rapport poids/surface d'adhérence en faveur de leur "collage" que facilite également un striage de leur surface. Les tranches successives sont réalisées dans des plans parallèles, le plus souvent inclinés, parfois verticaux. Les briques sont soit dans le même plan que la tranche, soit légèrement inclinées formant ainsi des tranches tronconiques. La construction de la première tranche s'appuie sur un mur de tête ou sur un arc-tympan élevé sur les deux murs porteurs latéraux de la voûte. Les tranches successives s'appuient les unes sur les autres. Les formes génératrices des voûtes en berceau par tranches sont généralement des portions de paraboles plus ou moins bien approchées. On connaît aussi quelques rares exemples de forme plein cintre ou légèrement brisée rapportés par la littérature.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION EGYPTE

Construction d'un berceau selon la méthode nubienne, près d'Assouan, Egypte.

Réf. : Photographie HIESCHI, M.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION EGYPTE

Etapes successives de la construction d'un berceau par tranches, à la nubienne.

1 – Traçage de la courbe parabolique sur le mur d'appui, à la main, à l'aide de mortier.

2 – Pose des premières briques, inclinées. Les premières assises ne sont pas complètes et donnent l'inclinaison des tranches.

Réf. 1 et 2 : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre, 1984.

© CRATerre 86

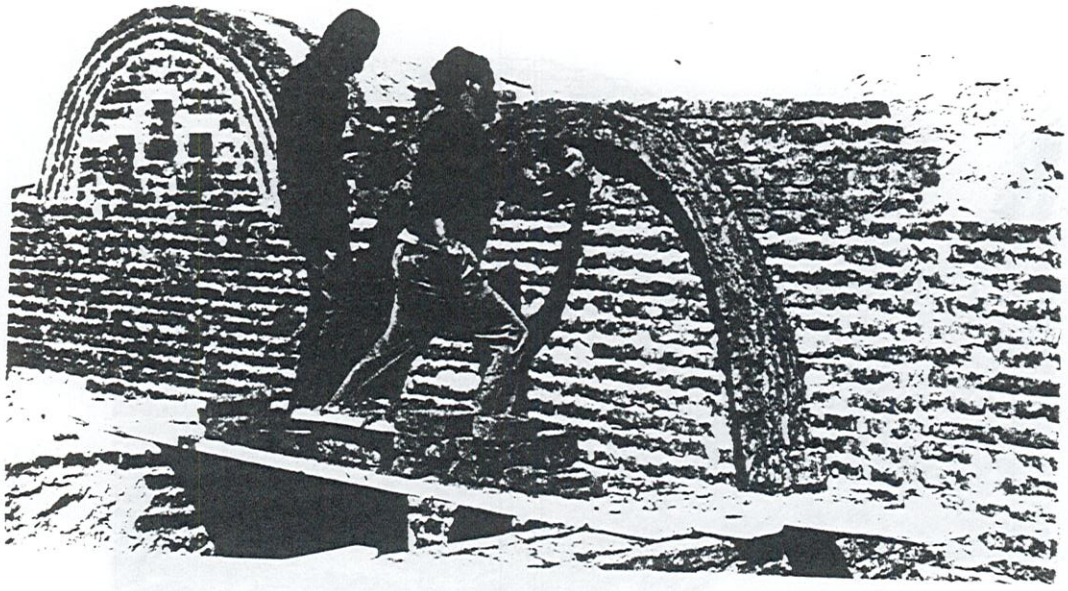
VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION EGYPTE

Etapes successives de la construction d'un berceau par tranches, à la nubienne.

3 - Première assise complète.

4 - Chaque nouvelle assise repose sur la précédente.



Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre, 1984.

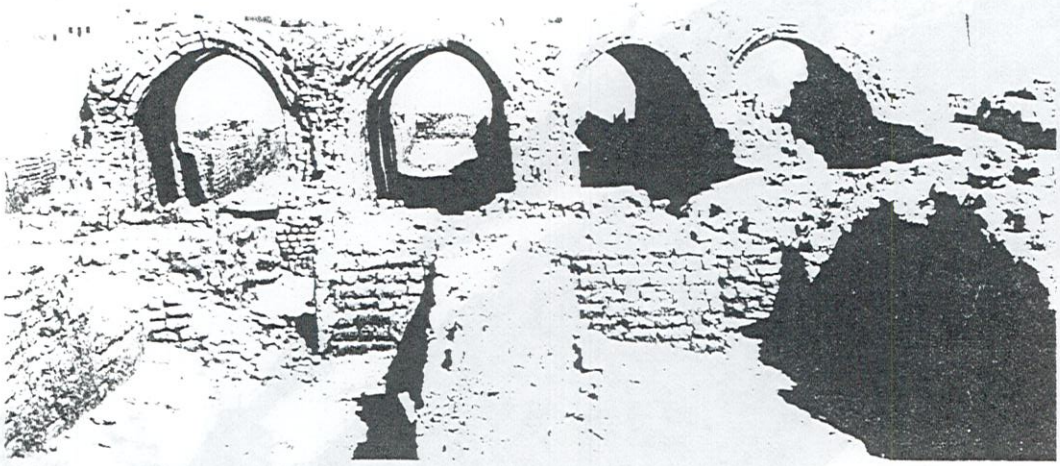
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

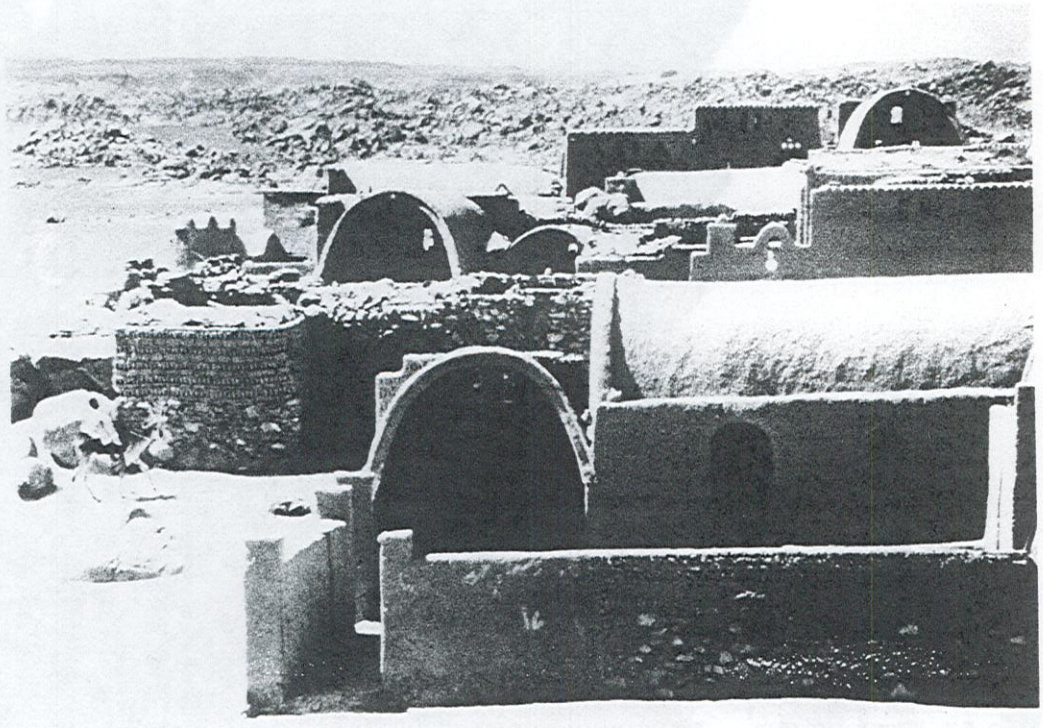
TYPOLOGIE EGYPTE

1 - Greniers du Ramasseum, milieu du 2ème millénaire av. J.C.

2 - Berceaux à extrémités ouvertes, terminés par des tranches relevées en arcs doubleaux, observés à Kenuzi, en Nubie.



3 4



Réf. 1 : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre, 1984.
Réf. 2 : FERNEA, R A. ; GESTER, G. ; Nubians in Egypt, University of Texas Press, Ausin, 1973.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE EGYPTE

Greniers du Ramasseum, 2ème millénaire av. J.C. La voûte en berceau est constituée de deux rouleaux de tranches inclinées en sens contraire. Le deuxième rouleau peut aussi se faire en briques rayonnantes. On observe les naissances en encorbellement de la voûte.

Réf. : Photographie CRATerre.

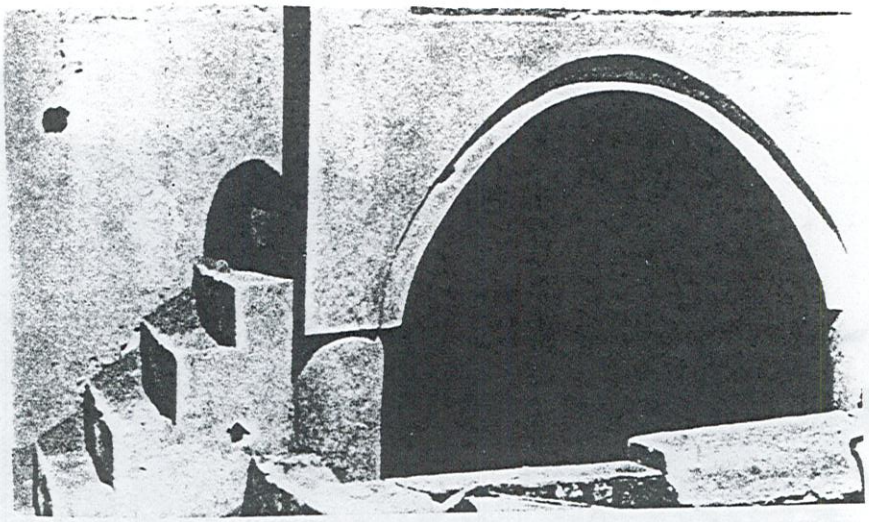
© CRATerre 86

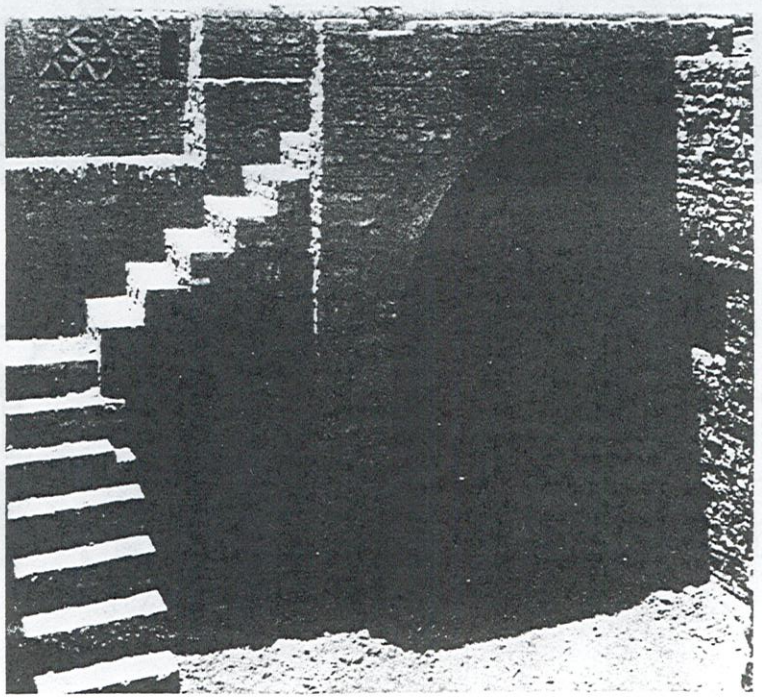
VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE EGYPTE

1 - Voûte en berceau par tranche supportant un escalier. Touna el-Gebel, Nubie, Egypte.

2 - Première construction de Hassan Fathy à Bathim, édifiée par des maçons nubiens de la région d'Assouan. Berceau par tranches supportant un escalier.





Réf. 1 et 2 : FATHY, H. ; Construire avec le peuple, Ed. Sindbad, Paris, 1970.

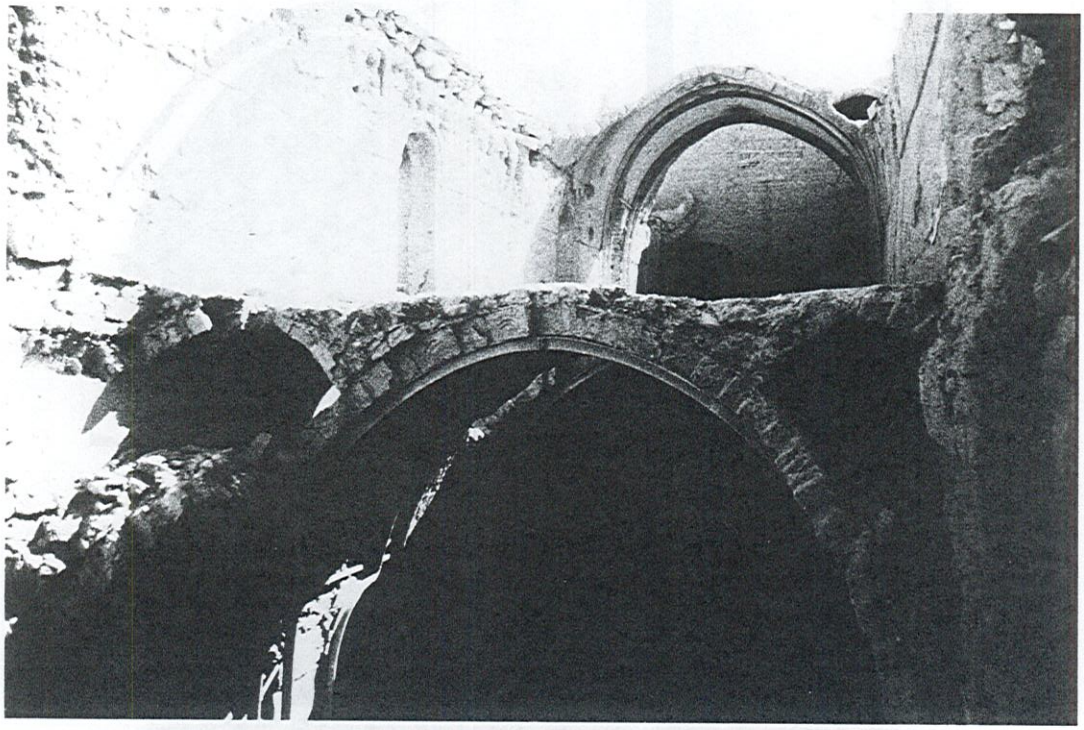
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE EGYPTE

1 - Système constructif permettant de passer du berceau au plan horizontal par la réalisation de deux petites voûtes latérales et un remplissage. Exemple observé au monastère de Saint Siméon, à Assouan, 10ème siècle ap. J.C.

2 - Coupe sur le monastère de Saint Siméon d'Assouan (d'après Clark, 1912).



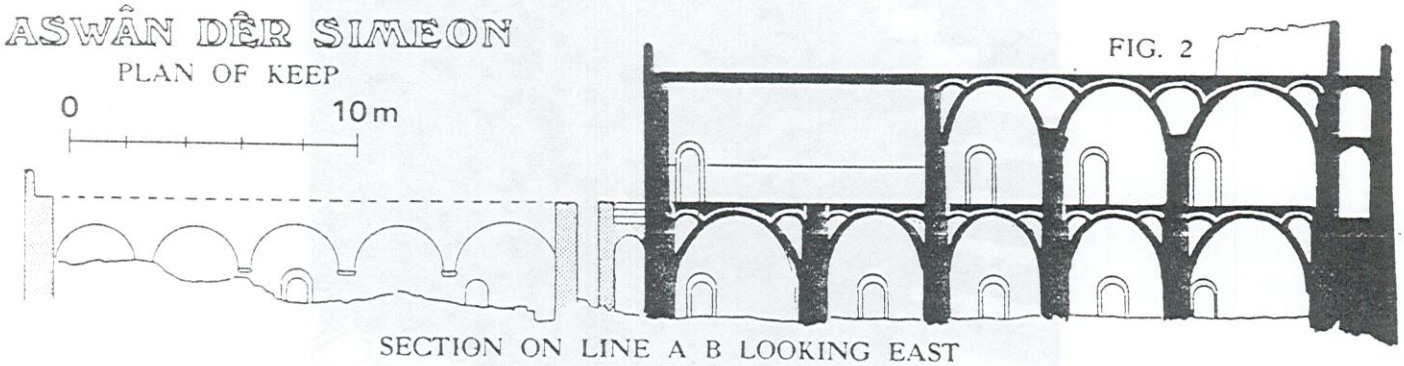


FIG. 2

Réf. 1 : Photographie CRATerre.

Réf. 2 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

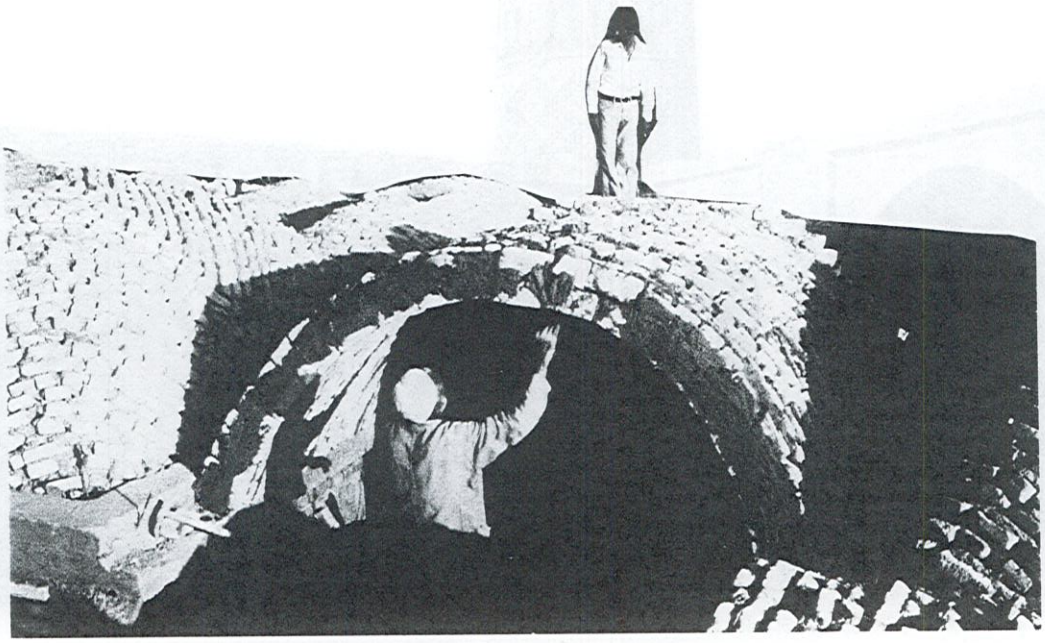
© CRATerre 86

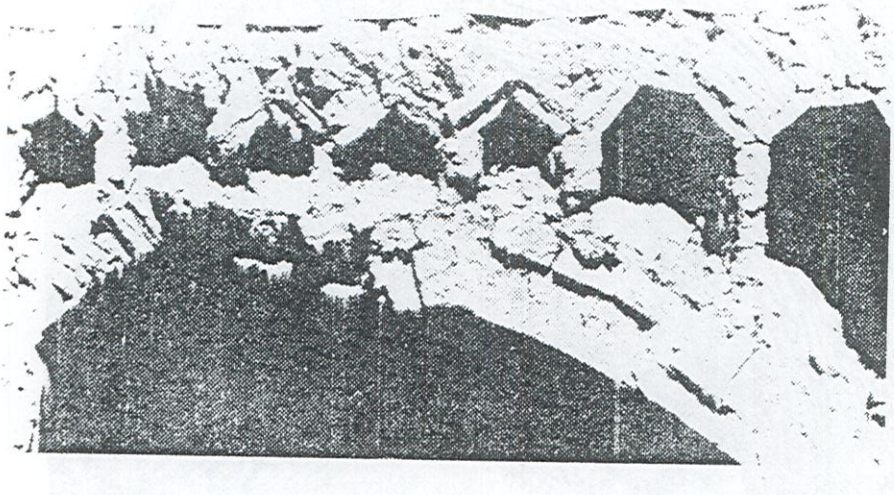
VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE - CONSTRUCTION IRAN

1 - Construction d'une voûte en berceau par tranches verticales, à deux rouleaux, région de Tabas, Iran.

2 - Système constructif permettant le passage d'un berceau à un plan horizontal de toiture-terrasse, par le moyen de voûtains générés par des arcs en mitres ou à segments de droite. Iran.





Réf. 1 : Photographie ABEDINI RAD.
Réf. 2 : WULFF, The Traditional crafts of Persia, Ed. MIT Press, Cambridge, 1966.

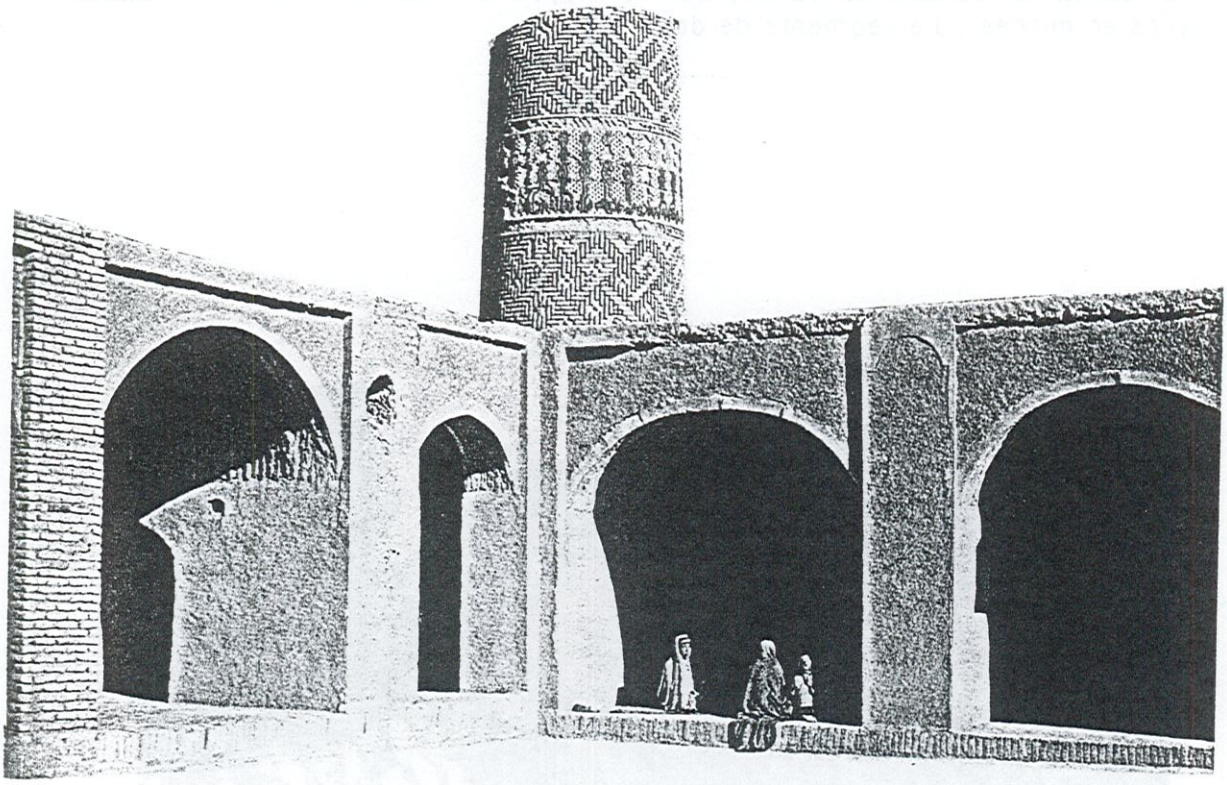
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE IRAN

1 - Galerie formée par une succession de voûtes en berceau par tranches verticales. Mosquée de Jami à Nigar, Iran.

2 - Extrémité d'un berceau fermé par une demi-coupole en pendentifs, Bam, Iran.



Réf. 1 : HUTT, A. ; HARROW, L. ; Iran 1, Scorpios publications limited, Londres, 1977.
Réf. 2 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE URSS

Voûte en berceau torique, fractionnée en sept portions, entourant une coupole en encorbellement. Ouvrage situé à Balandy, Kazakhstan (URSS) et daté du IV au IIème siècles av. J.C.

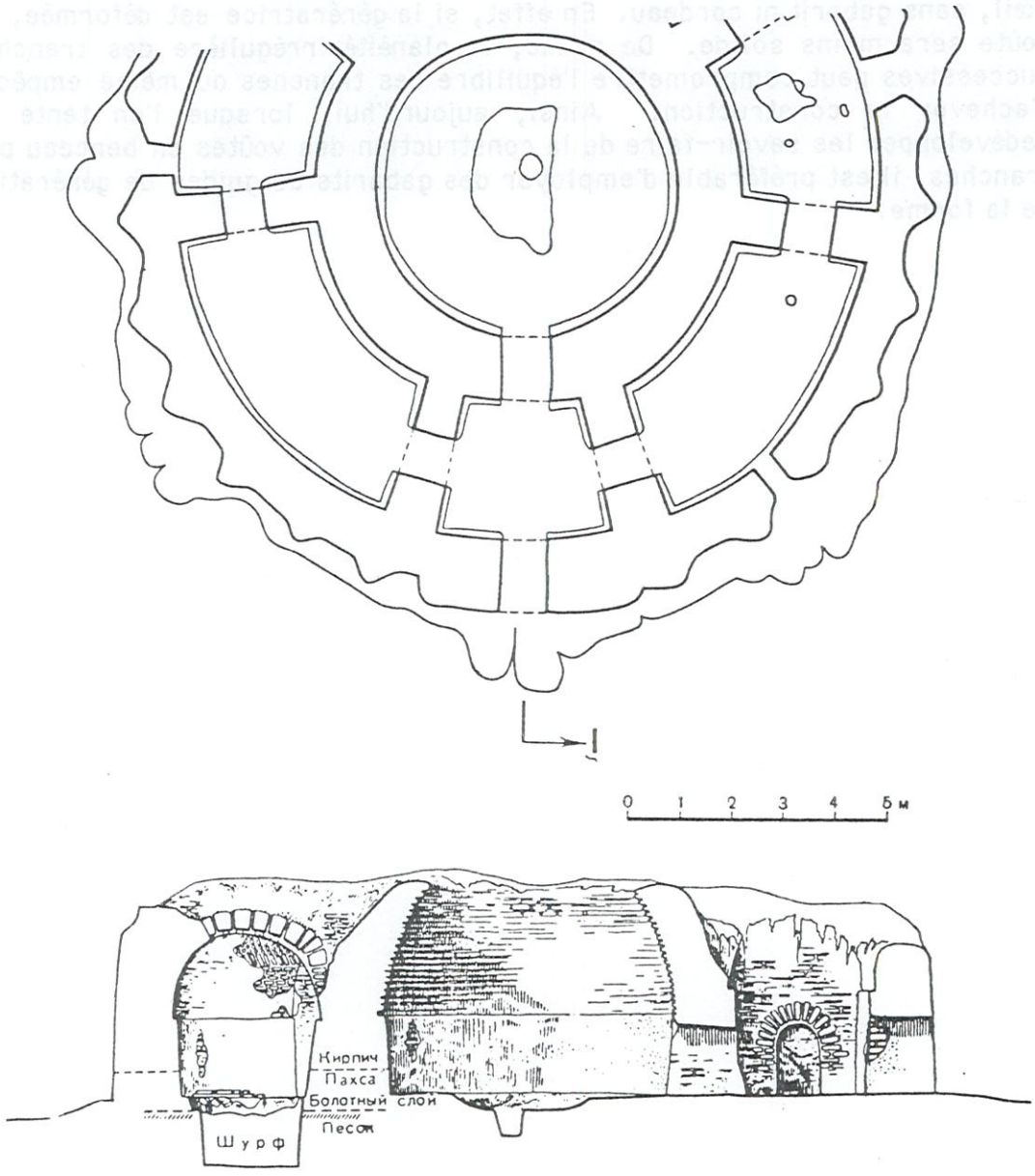


Рис. 101. Купольный мавзолей Баланды 2. План и разрез.

BALANDY

(D'après Tolstov 1962).

Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

REALISATIONS RECENTES.

Dans la construction traditionnelle iranienne ou égyptienne, les maîtres-maçons sont habitués à réaliser des voûtes en berceau par tranches et savent maintenir une régularité de la forme génératrice de la voûte, à l'œil, sans gabarit ni cordeau. En effet, si la génératrice est déformée, la voûte sera moins solide. De même, la planéité irrégulière des tranches successives peut compromettre l'équilibre des tranches ou même empêche d'achever la construction. Ainsi, aujourd'hui, lorsque l'on tente de redévelopper les savoir-faire de la construction des voûtes en berceau par tranches, il est préférable d'employer des gabarits ou guides de génération de la forme.

© CRATerre 86

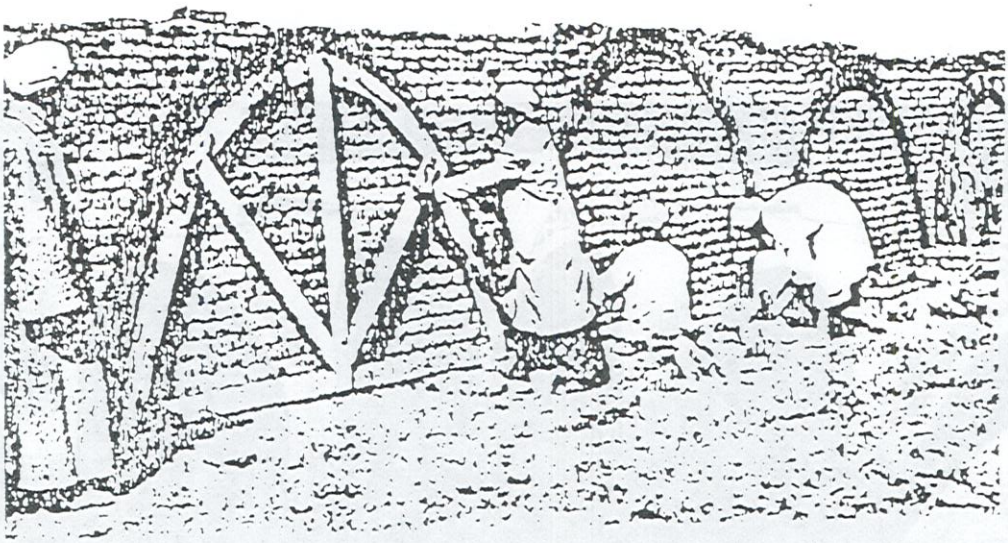
VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION - TYPOLOGIE EGYPTE

REALISATIONS RECENTE.

1 - Ecole de Hassan Fathy, formation de maçons à la construction de voûtes en tranches. Utilisation d'un gabarit en bois pour le traçage de la parabole génératrice contre le mur de départ.

2 - Berceaux par tranches du Marché de Gourna.

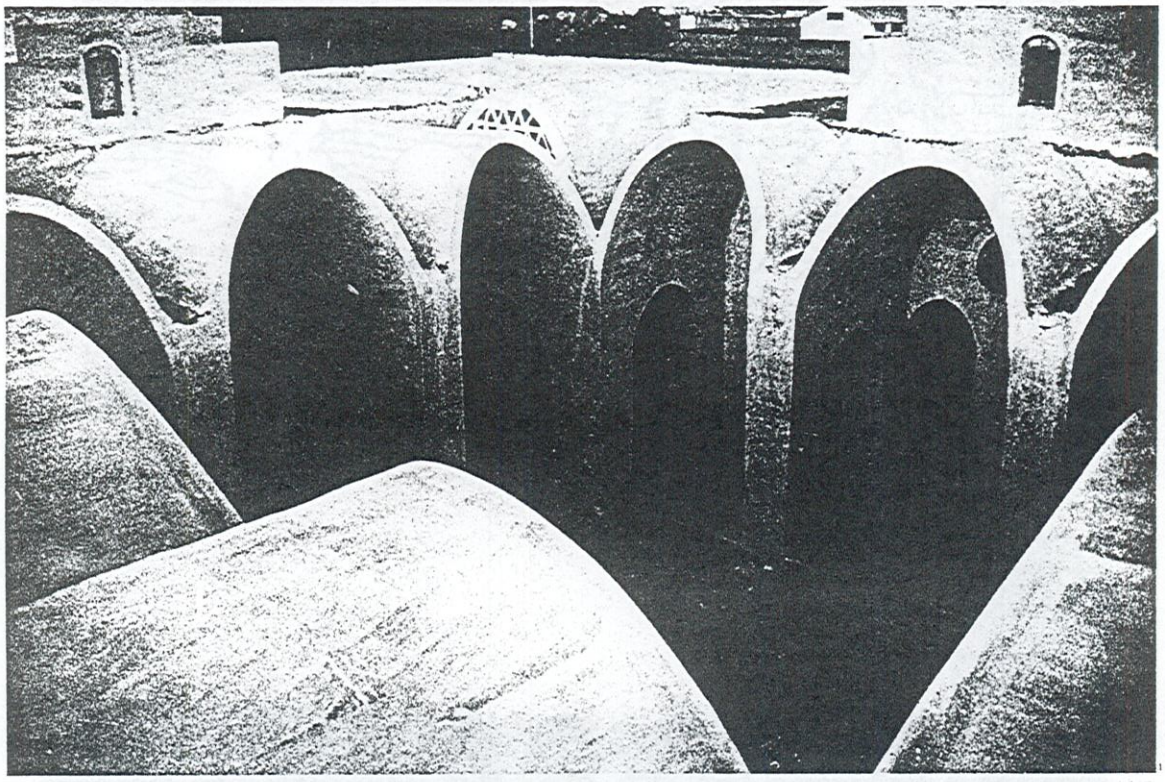


Réf. 1 : FATHY, H. ; Rapport pour la République Arabe Unie.
Réf. 2 : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

REALISATIONS RECENTES.

1 - Projet de Hassan Fathy à Bariz.



Réf. 1 : Architecture d'aujourd'hui n°195, Février 1978.
Réf. 2 : HOLMES, Mudbricks roofs.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION

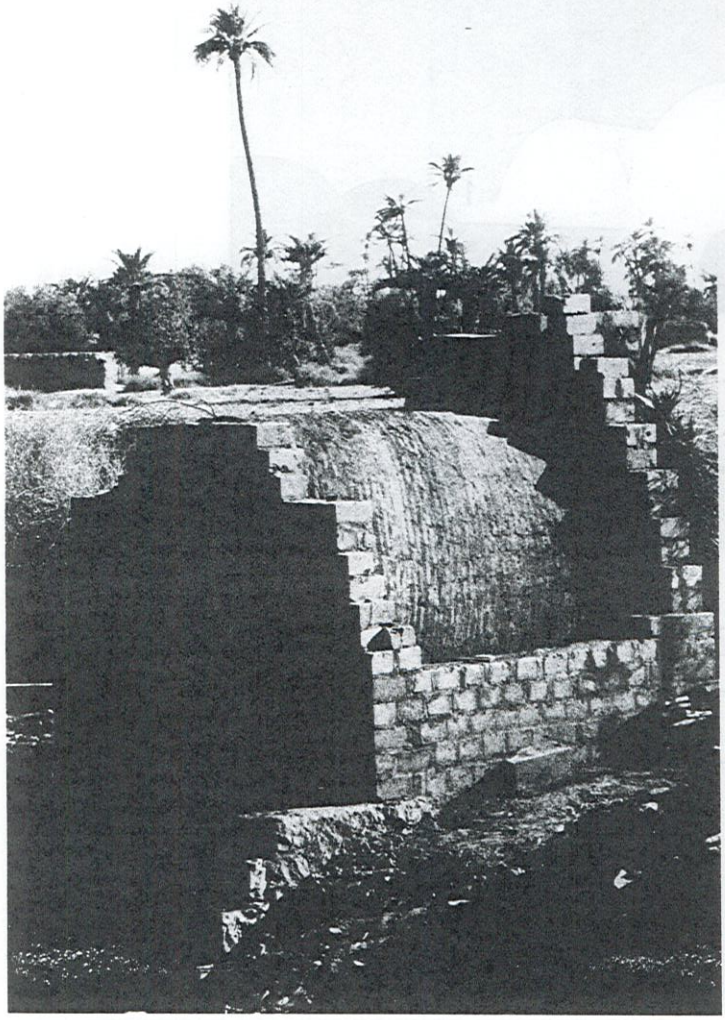
REALISATIONS RECENTES.

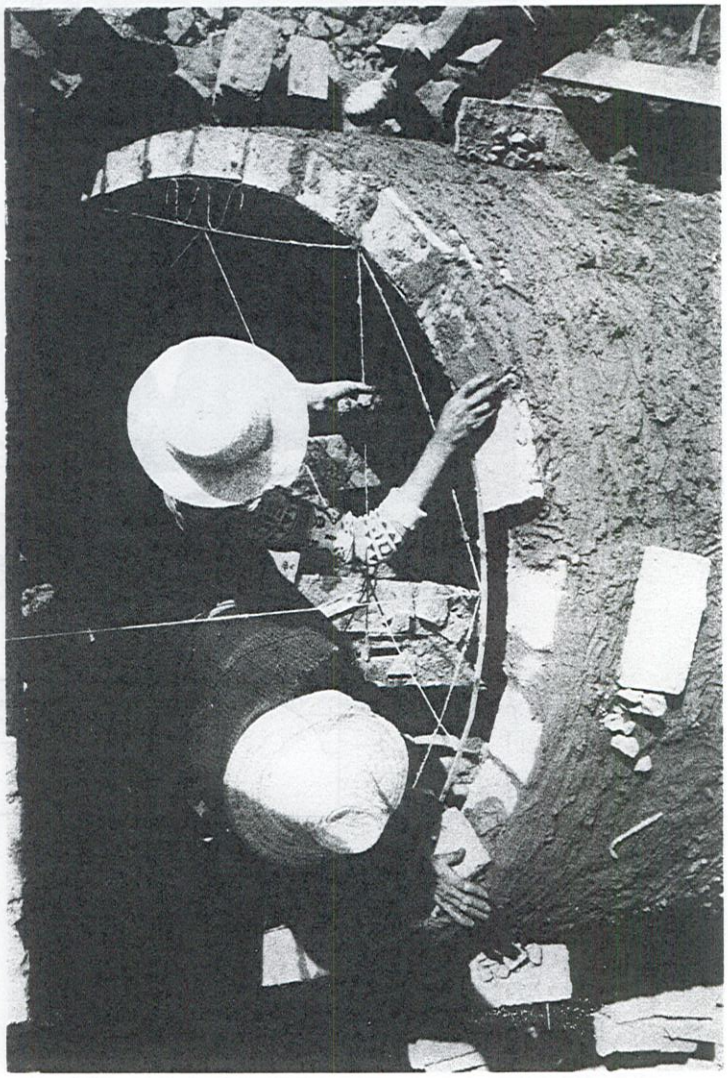
Maison Dana, Marrakech :

1 - Construction d'un four à briques cuites couvert par un berceau construit par tranches inclinées. Utilisation d'un guide métallique facilitant la construction.

2 - Four terminé.

Réalisation Elie Mouyal et Thierry Joffroy.





Réf. 1 et 2 : Photographies JOFFROY, Th.

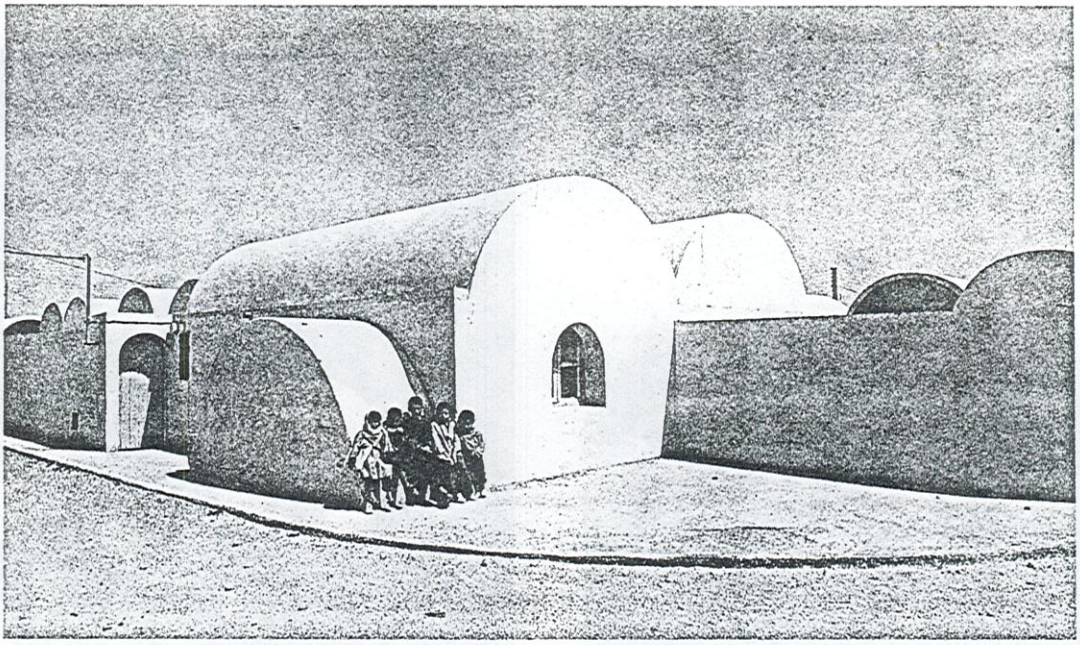
© CRATerre 86

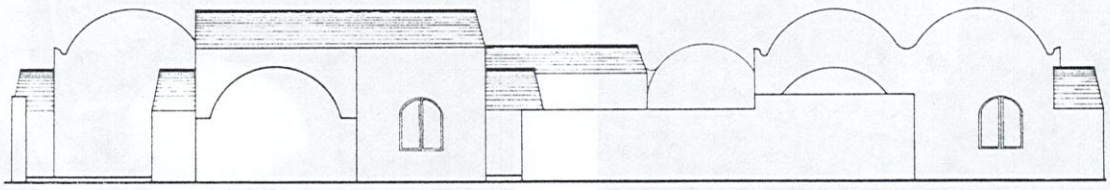
VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE ALGERIE

REALISATIONS RECENTES.

Projet d'un village rural à M'Sila, Algérie. Photographie, plans et coupes d'habitations couvertes par des voûtes en berceau par tranches construites en blocs de terre comprimée stabilisée. Réalisation du Groupe d'Etude de l'Habitat de Biskra, Algérie.





Réf. : Photographie et documents graphique de la revue MIMAR 8.

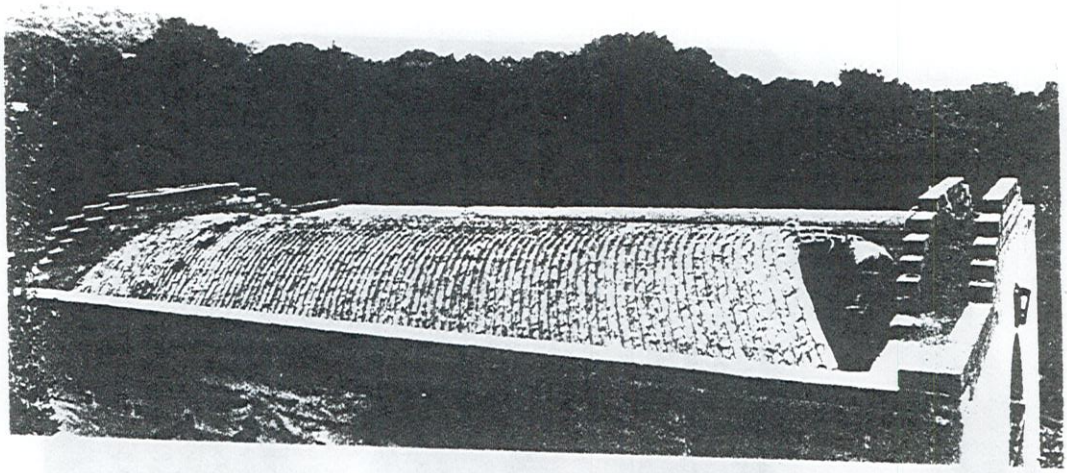
© CRATerre 86

REALISATIONS RECENTES.

Maison-atelier de Christian Moretti à Lumio, petit village près de Calvi, en Corse.

1 - Construction d'une voûte en berceau par tranches inclinées, d'une portée de 5,60 mètres et longue de 10 mètres. Utilisation de cordeaux pour la génération de la voûte.

2 - Intérieur de la maison-atelier. Conception-réalisation Ch. Moretti.

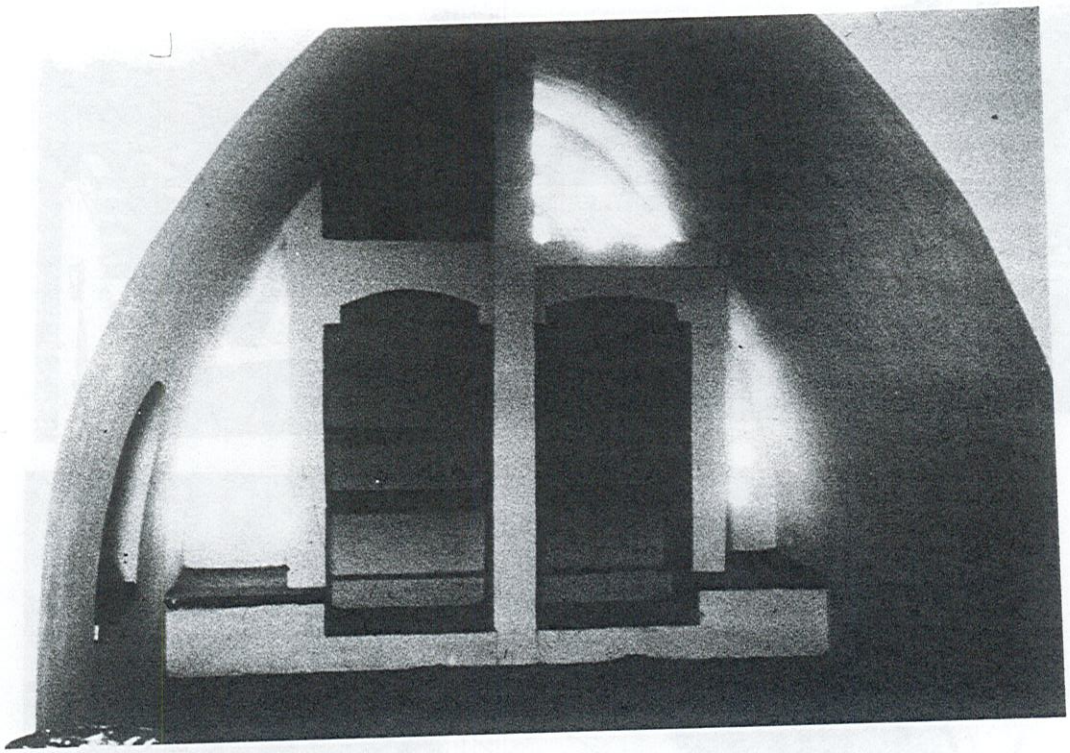


Réf. 1 : Photographie MORETTI, Ch.
Réf. 2 : Photographie JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

REALISATIONS RECENTES.

Premières réalisations de l'ADAUA à Rosso, en Mauritanie.
Intérieur d'un logement prototype.



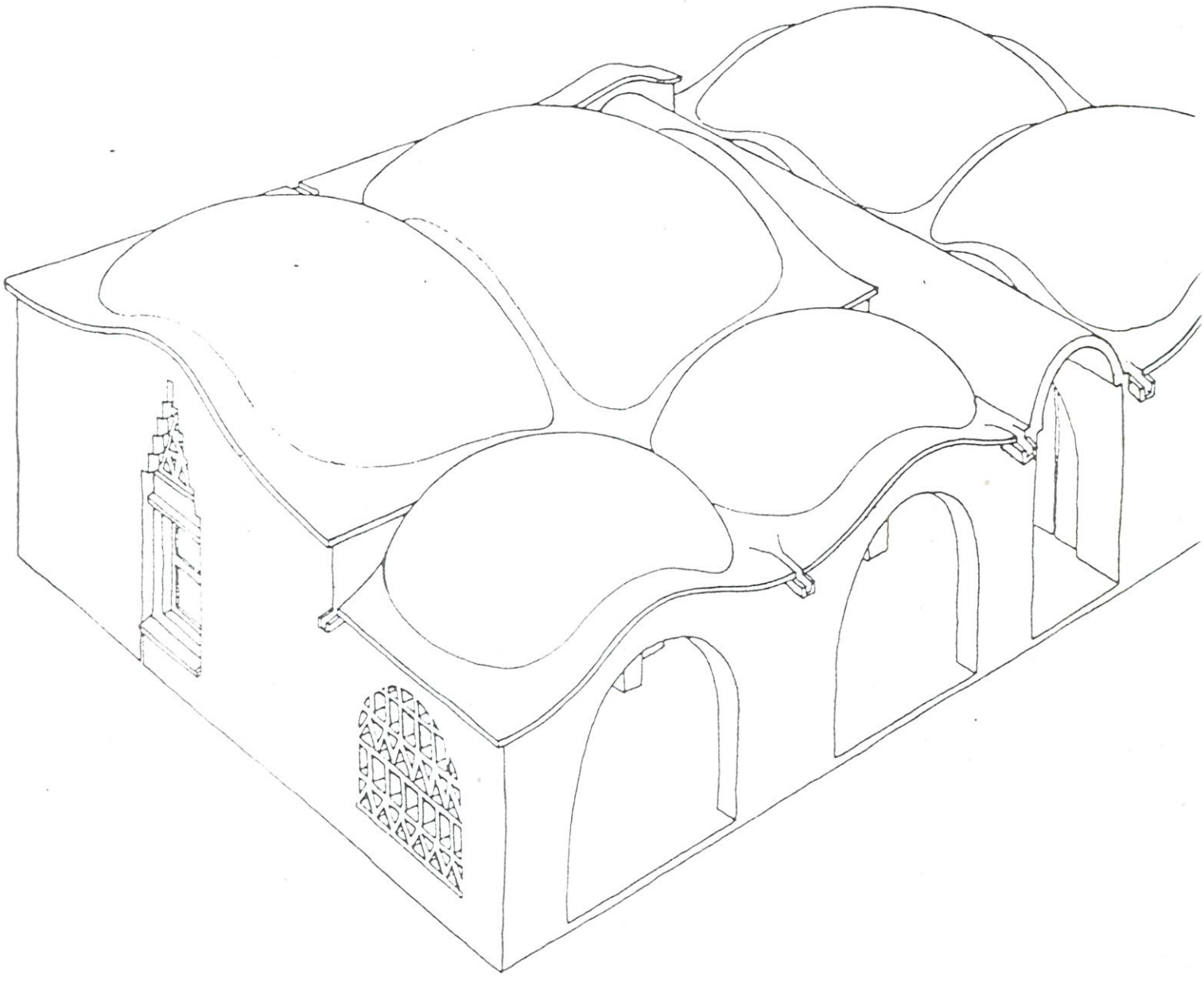
Réf. : Photographie ESTEVE, Josep ; ADAUA.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE MAURITANIE

Le berceau est particulièrement bien adapté à la couverture d'espaces en longueur. Ici, couverture du couloir d'un des 12 logements prototypes de Rosso réalisé par l'ADAUA.



Réf. : Dessin original de Josep ESTEVE, architecte.

© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU, EN STRUTS

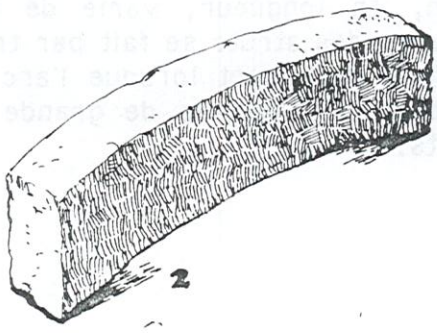
Les voûtes en "struts" ont été découvertes par des fouilles archéologiques réalisées sur le plateau iranien. Les vestiges sont datés du 1er millénaire av. J.C. au début de notre ère. L'architecture traditionnelle en terre, actuelle, a délaissé cette technologie. Les "struts" sont des éléments légèrement coudés réalisés par moulage. Ils peuvent être armés de roseaux et leur dimension, en longueur, varie de 80 centimètres à 1,40 mètre. La mise en œuvre des struts se fait par tranches de trois à quatre éléments, parfois deux seulement lorsque l'arc générateur de la voûte est en forme de mitre. Les voûtes de grande portée en struts utilisent davantage d'éléments.

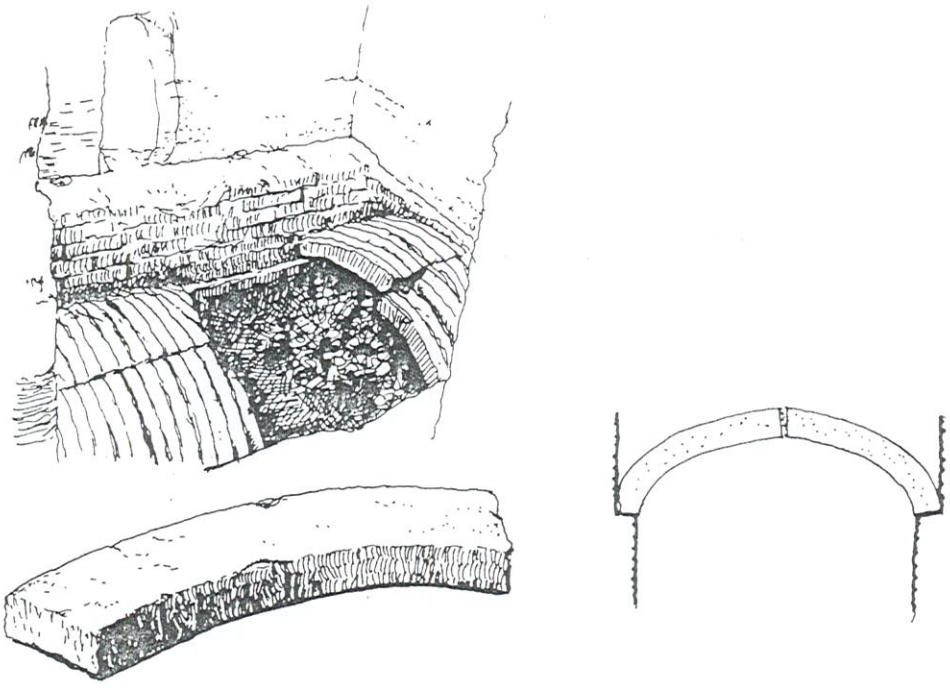
© CRATerre 86

VOUTES EN BERCEAU, EN STRUTS

TYPOLOGIE IRAN

1 - Représentation d'un "strut", coupe sur un berceau à deux éléments et croquis d'une voûte en struts du site de Nush-i jan, Iran, datée du 7ème au 6 ème siècles av. J.C.





Réf. 1 : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.

© CRATerre 86

2 - Temple central du site de Nush-i jan : berceau en struts d'une portée de 2,50 m et d'une flèche de 40 centimètres. Les struts sont longs de 1,40 mètre (d'après Roaf, Stronach, 1973).

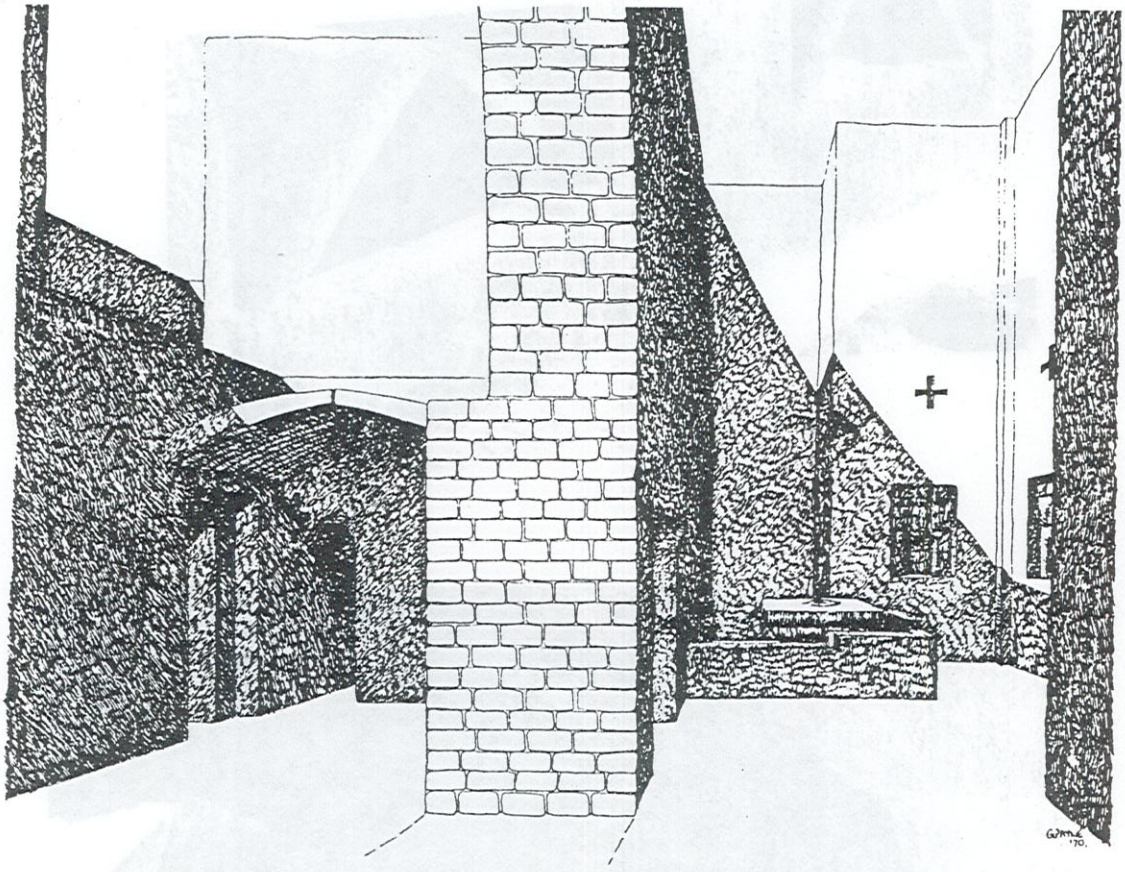


Fig. 3. The Fire Temple. A sectional view of Rooms 1 and 2A, looking west (with part of the floor of room 2 removed).

b. Nush-i Jan : le temple central.
(D'après Roaf, Stronach 1973).

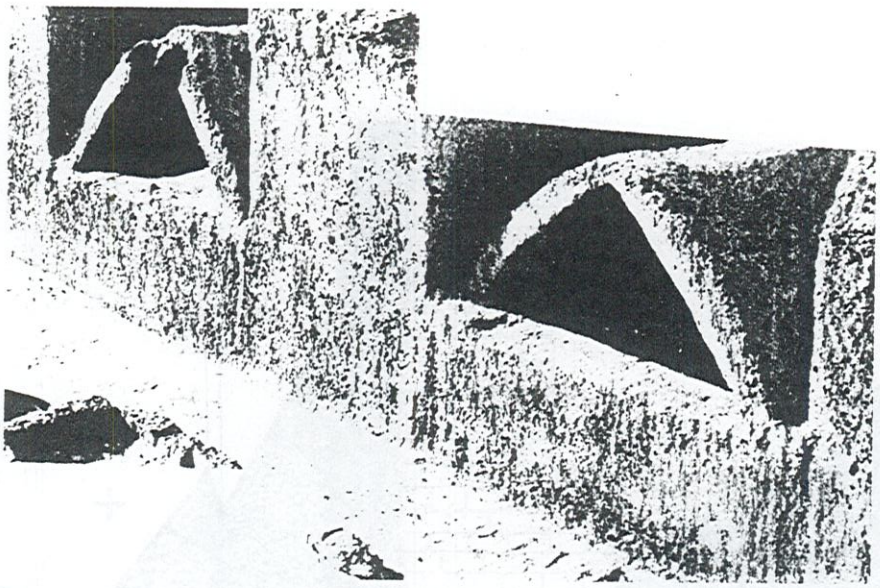
Réf. 2 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

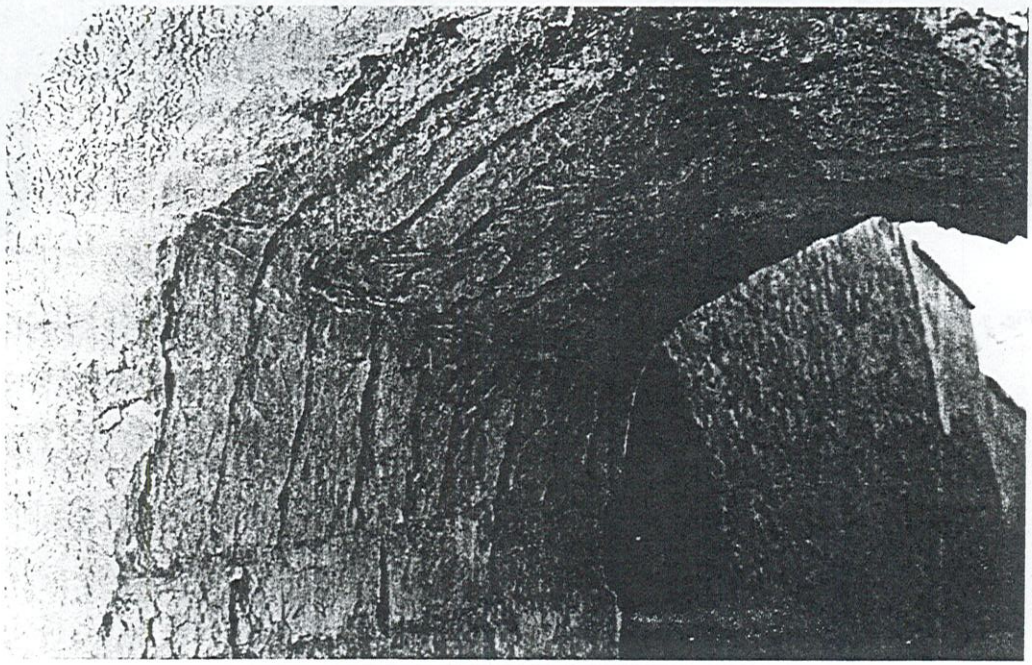
VOUTES EN BERCEAU, EN STRUTS

TYPOLOGIE IRAN

- Daman I Ghulaman : Couverture des "pyraca" en struts (d'après Scerrato, 1966).

- Passage couvert par un berceau en "struts" coudés à Persépolis.





Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

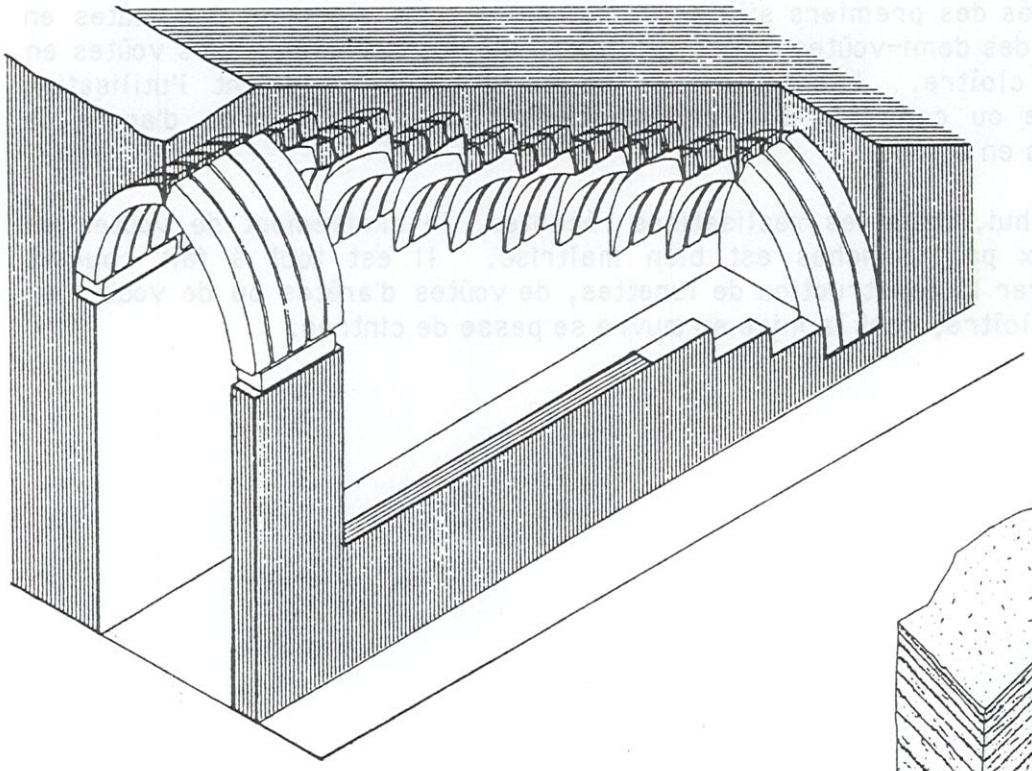
© CRATerre 86

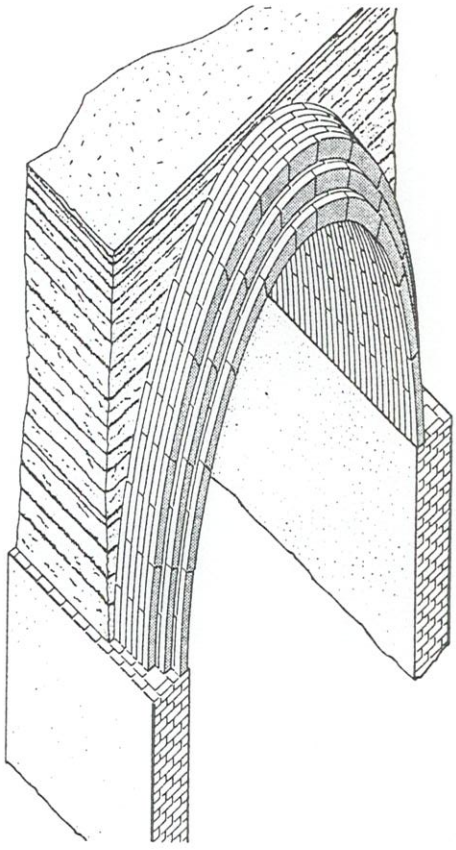
VOUTES EN BERCEAU, EN STRUTS

TYPOLOGIE IRAN

1 - Berceau en tranches, à éléments courbes du type strut dont la portée est de 8 mètres. Kuh-i Khwaja - Ghaga Shahr (d'après Gullini, 1964).

2 - Berceau a décrochement supportant un escalier, réalisé en struts - Shahr-I Qumis, site IV, couverture de la pièce 1 (d'après Hansman, 1970).





Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

® CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

L'intersection de voûtes en berceau construites par tranches est un cas de figure que les bâtisseurs traditionnels ont généralement évité. En effet, pour couvrir une pièce en "L" par des berceaux et pour résoudre ce problème du croisement des deux voûtes, on préférait construire un arc dans le prolongement de l'une des deux voûtes supportant son sommier, côté intérieur ; l'autre voûte s'arrêtant alors à l'aplomb de ce sommier.

Les plus anciens exemples de croisement de berceaux montés par tranches sont datés des premiers siècles de notre ère. Ils décrivent des voûtes en "L" puis des demi-voûtes en arc de cloître et plus récemment des voûtes en arc de cloître. Les techniques de construction associent l'utilisation partielle ou complète de l'encorbellement ou de la trompe d'angle de tranches en ogive.

Aujourd'hui, dans les réalisations récentes, le croisement de voûtes en berceaux par tranches est bien maîtrisé. Il est tout à fait courant d'observer la construction de lunettes, de voûtes d'arêtes ou de voûtes en arc de cloître, dont la mise en œuvre se passe de cintres.

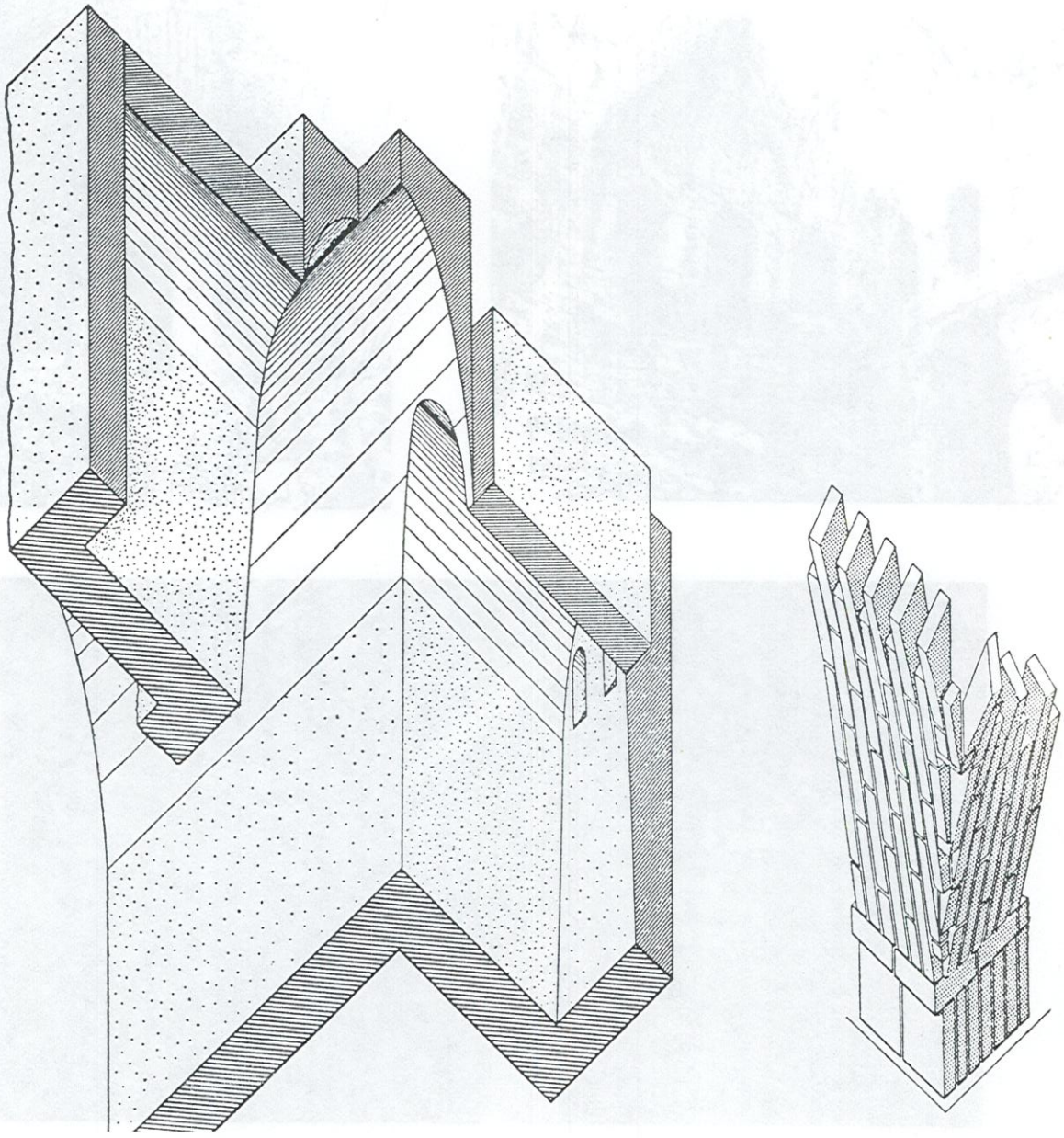
© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE - CONSTRUCTION
IRAN

KUH-I KHWAJA :

Chaga Shahr, Seistan, Iran. Dans la partie Est de l'Iwan oriental, l'appareillage de l'intersection entre deux berceaux orthogonaux montés par tranches a été conservé. Il montre un découpage de chaque brique se trouvant à la croisée des berceaux, devant permettre un bon appui de chaque nouvelle tranche (d'après Gullini, 1964).



Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

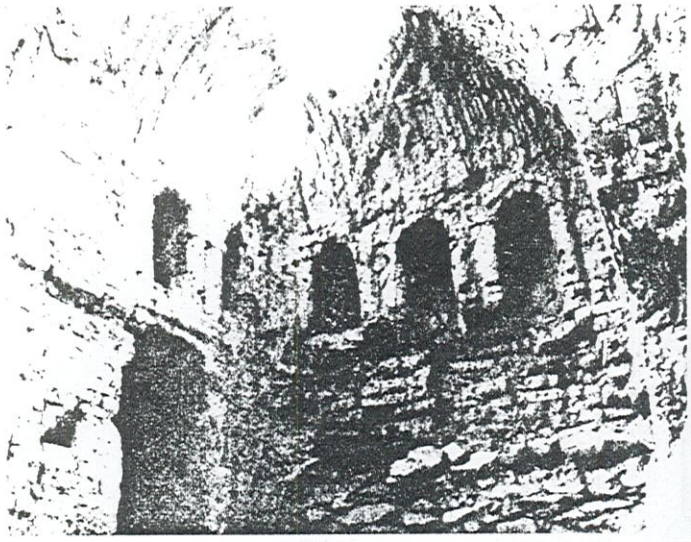
© CRATerre 86

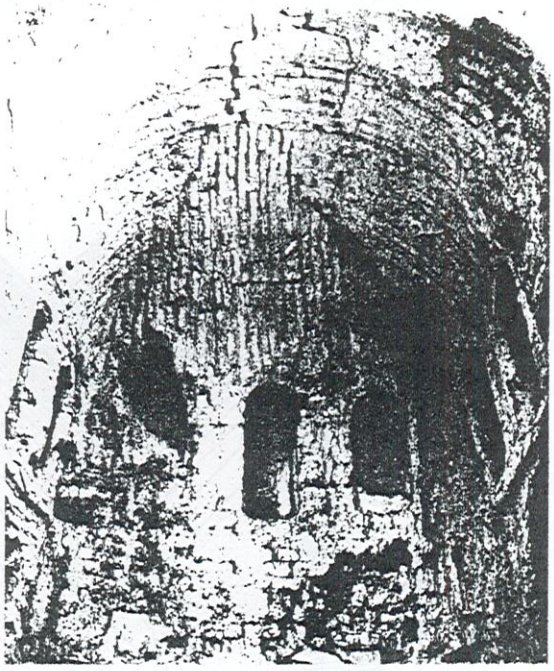
INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

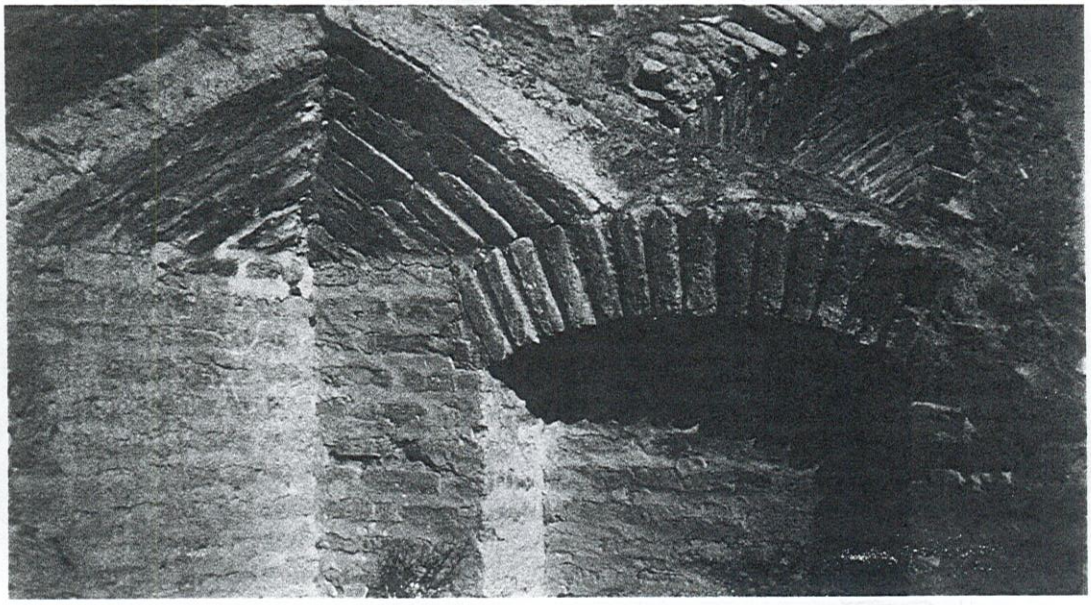
TYPOLOGIE IRAN

1 et 2 - Kuh-I Kwaja : Ghaga Shahr, Seistan, Iran. Les deux ailes d'entrée de l'Iwan oriental sont couvertes par des demi-voûtes en arcs de cloître réalisées par intersection de tranches (d'après Gullini, 1964).

3 - Vestige de voûtes en arc de cloître, en Iran. L'utilisation des trompes d'angles de tranches en ogive permet de se passer complètement de cintre.







Réf. 1 et 2 BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

Réf. 3 : Photographie ABEDINI RAD, mission CRATerre, 1984.

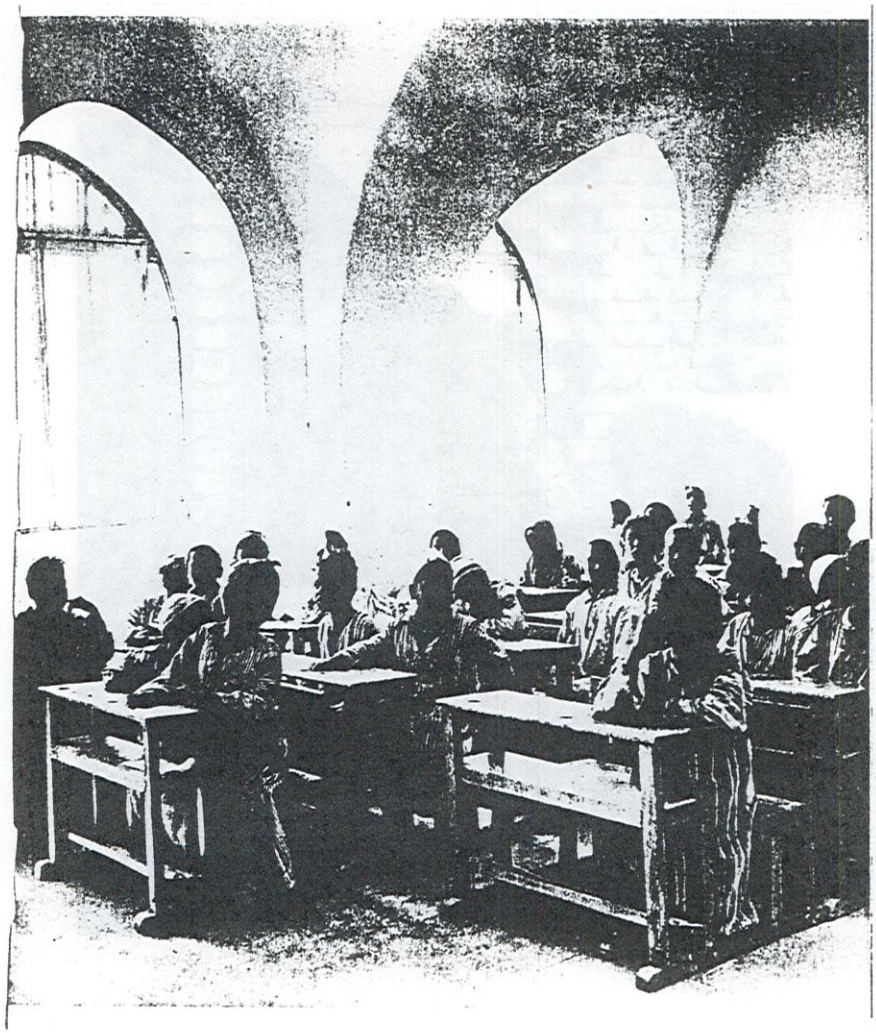
© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

TYPOLOGIE
EGYPTE

REALISATIONS RECENTES.

Salle de classe de l'Ecole de garçons de Gourna, architecte Hassan Fathy : Lunette en berceau dans voûte en berceau.



Réf. : FATHY, H. ; Construire avec le Peuple, Ed. Sindbad, Paris, 1970.

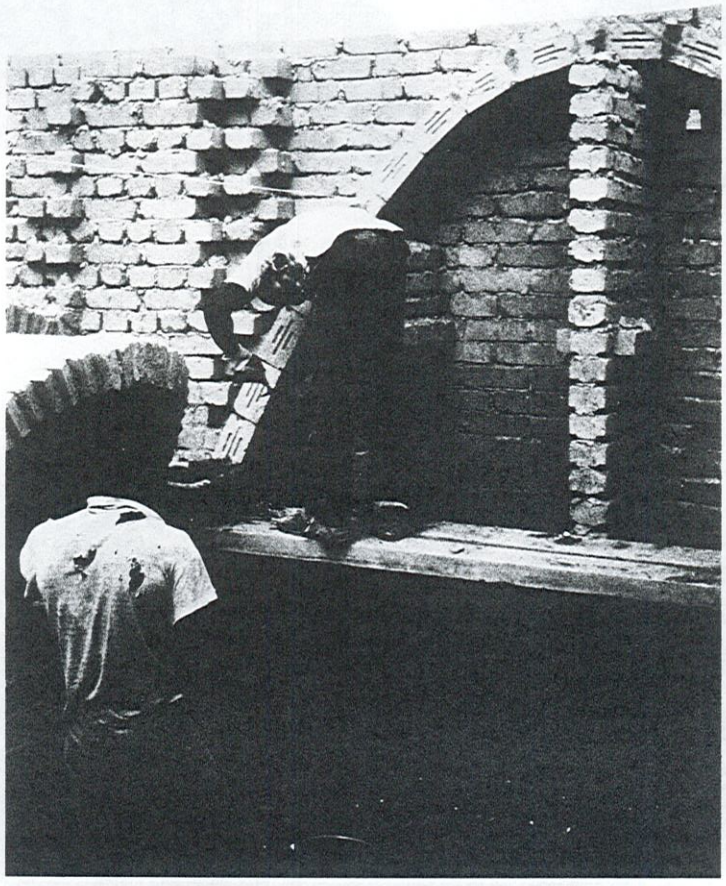
© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION MAURITANIE

REALISATIONS RECENTES.

Programme d'habitat populaire de Rosso, Mauritanie, ADAUA, architecte Josep Esteve. Intersection d'une lunette et d'un berceau. La lunette est composée d'un arc à plusieurs rouleaux en encorbellements successifs, jusqu'à l'intersection avec le berceau.



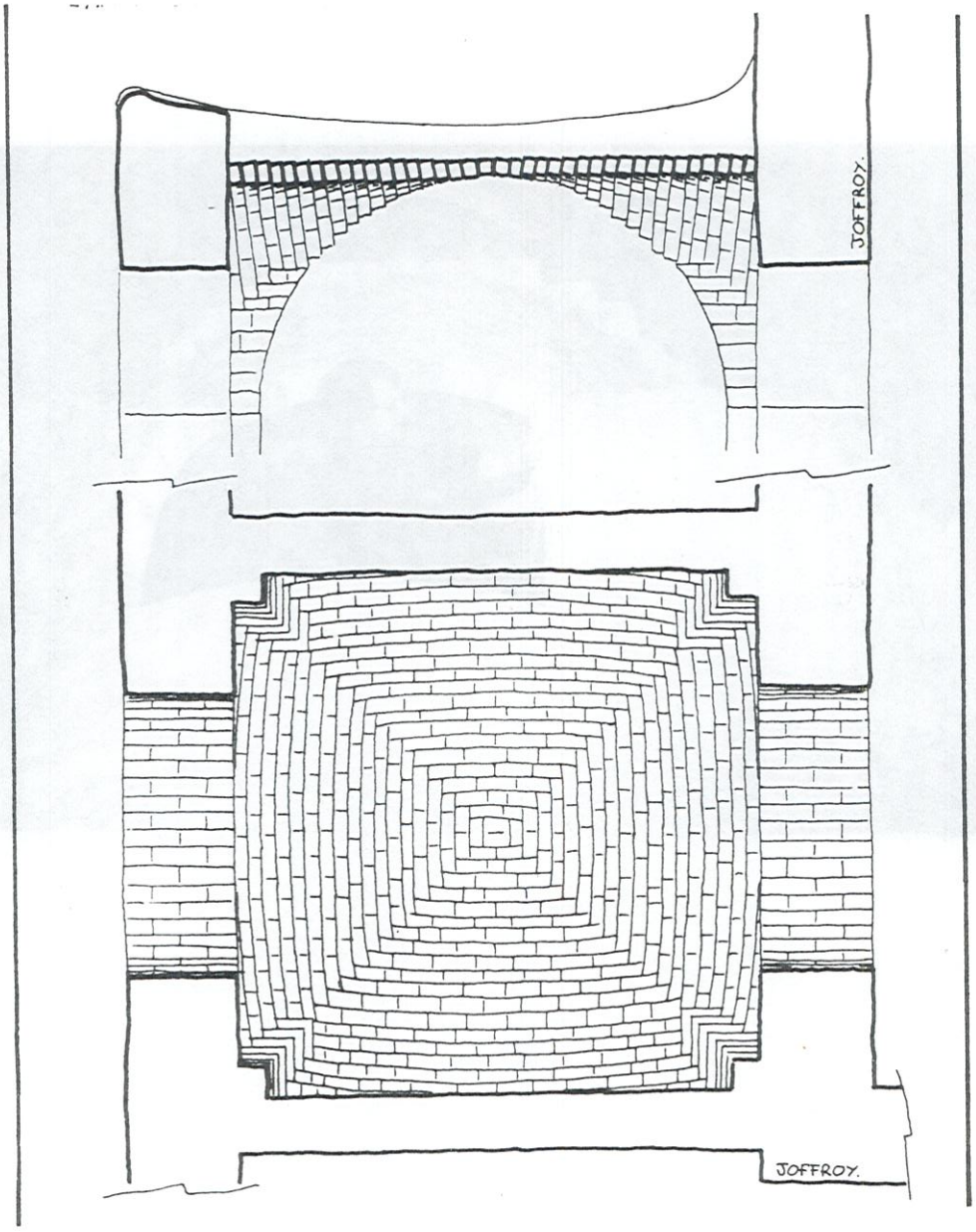
Réf. : Photographie ESTEVE, J.

© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

REALISATIONS RECENTES.

Maison de M. Plantier, Lumio, Corse, Constructeur Christian Moretti, assisté de Thierry Joffroy et Pascal Baeteman pour l'exécution des voûtes. Voûte d'arête de l'entrée. Les arêtes sont réalisées en encorbellement, de la naissance jusqu'à la mi-hauteur de la voûte. La construction se fait ensuite par tranches en progressant à partir des quatres côtés vers le centre.



Réf. : Document JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION FRANCE

REALISATIONS RECENTES.

Maison Plantier à Lumio, Corse, constructeur Christian Moretti.
Construction de la voûte d'arête :
La forme de la génératrice est donnée par un petit gabarit métallique.

Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

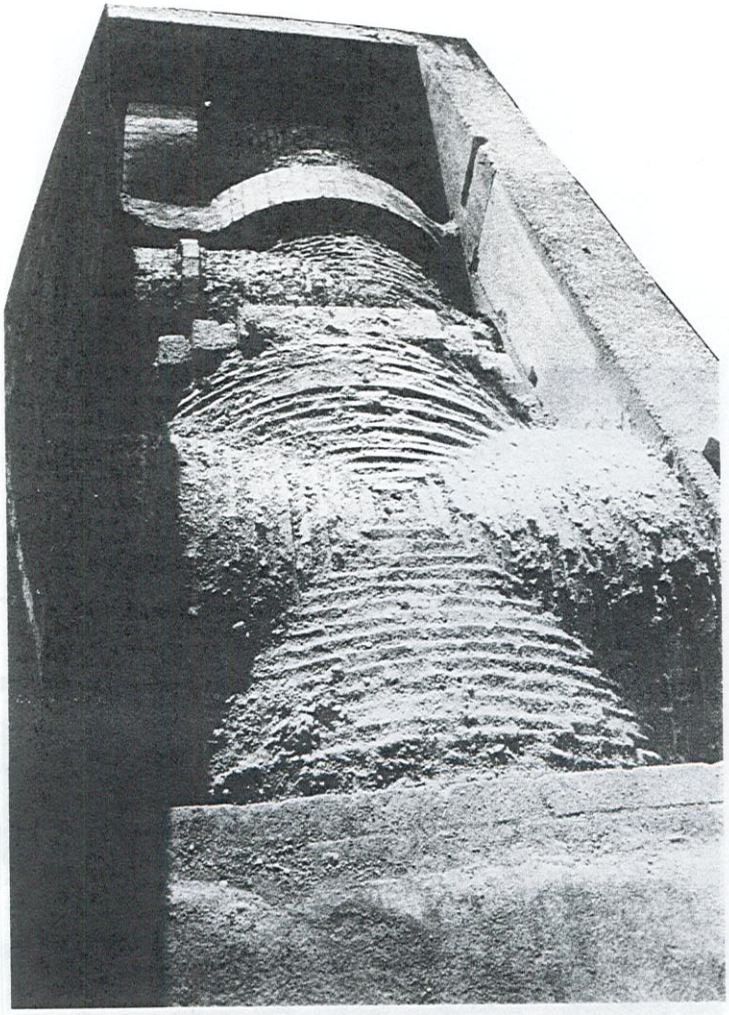
INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

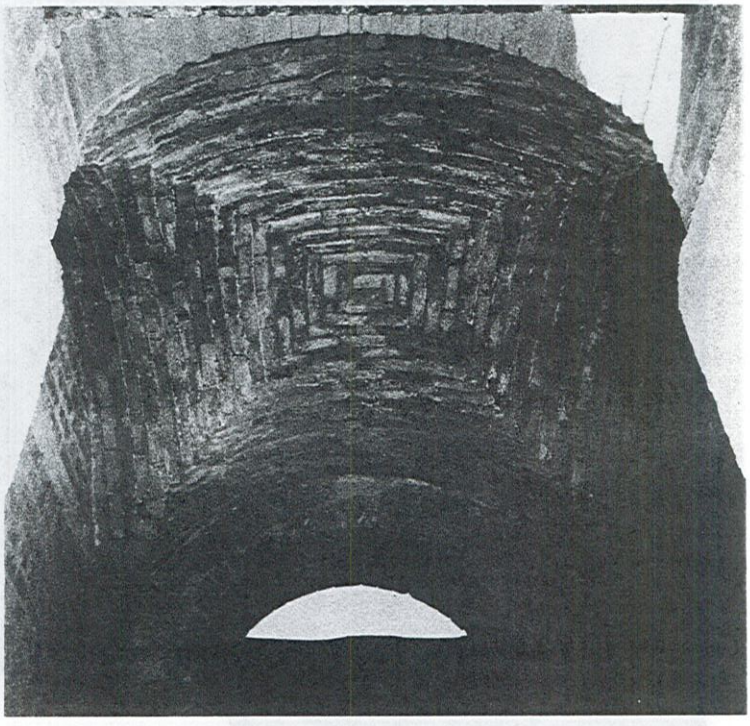
REALISATIONS RECENTES.

Maison Plantier, à Lumio, Corse, constructeur Christian Moretti. Voûte d'arête de l'entrée.

1 - Vue de l'extrados.

2 - Vue de l'intrados.





Réf. : Photographies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

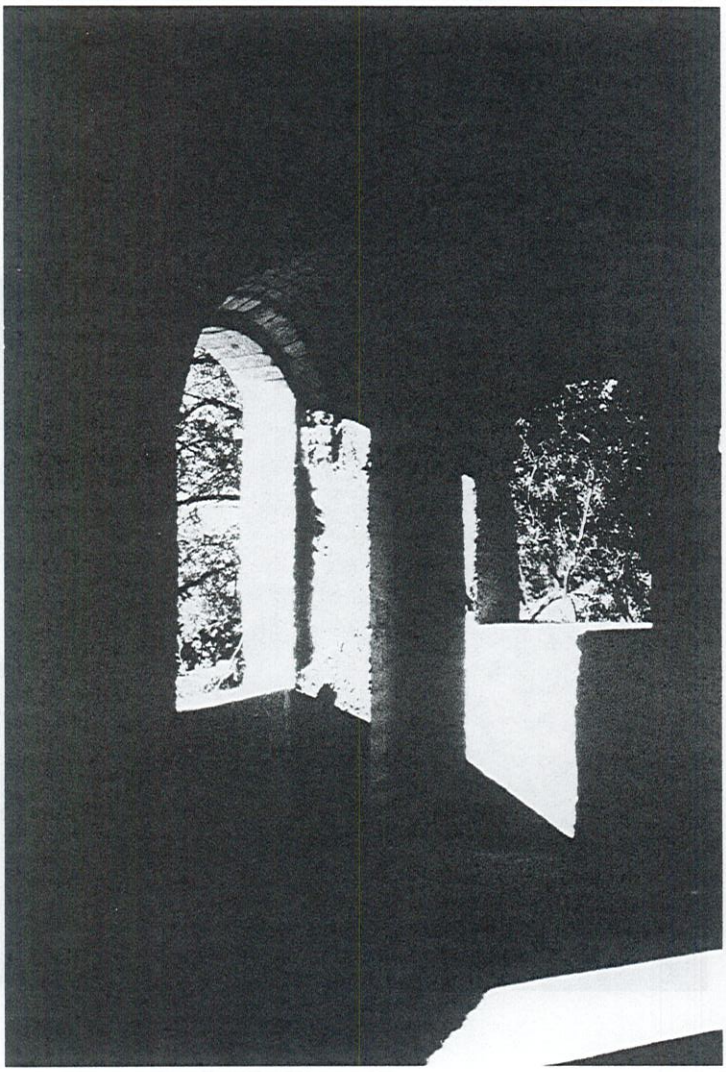
CONSTRUCTION - TYPOLOGIE FRANCE

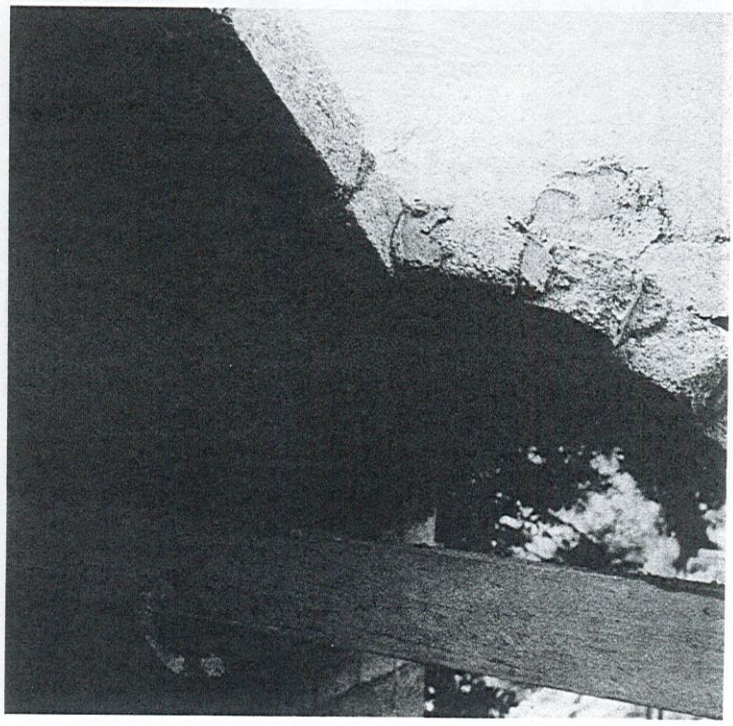
REALISATIONS RECENTES.

Maison Plantier, à Lumio, Corse, constructeur Christian Moretti.

1 - Cuisine : croisée de berceaux en "L" et lunettes au niveau des fenêtres. Ces voûtes à génératrices légèrement surbaissées ont permis une entière réalisation par tranches.

2 - Intersection du berceau principal et de la lunette. Les pénétrations en berceau incliné sont plus faciles à construire et donnent une meilleure résistance à la voûte.





Réf. : Photographies : JOFFROY, Th.

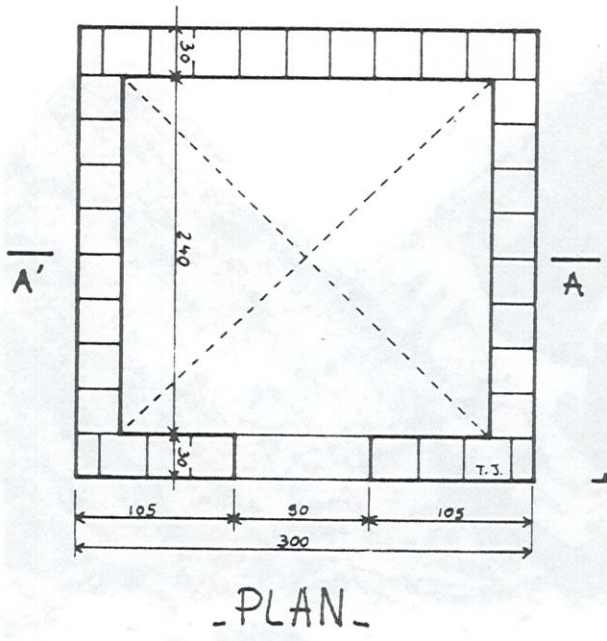
© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

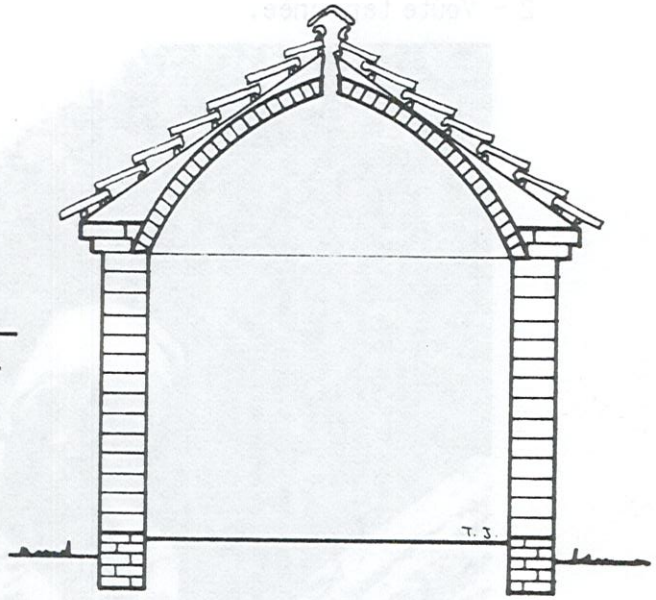
CONSTRUCTION INDE

Mission du GRET au CSV de Wharda, Inde :

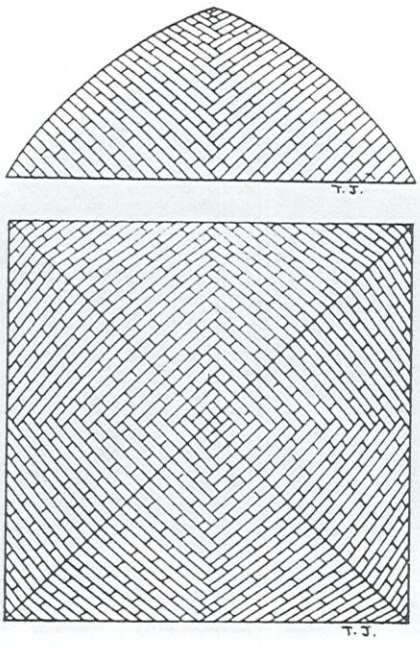
Construction expérimentale, voûte en arc de cloître couverte par des tuiles posées sur "chevrons" en terre ; architecte Thierry Joffroy, 1983-84.



PLAN



COUPE A'A



APPAREILLAGE

Réf. : Dessins : JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

CONSTRUCTION INDE

Construction expérimentale GRET - CSV de Wharda, Inde, architecte Thierry Joffroy, 1983-84.

1 - Construction de la voûte en arc de cloître.

2 - Voûte terminée.

Réf. 1 et 2 : Photographies JOFFROY, Th.

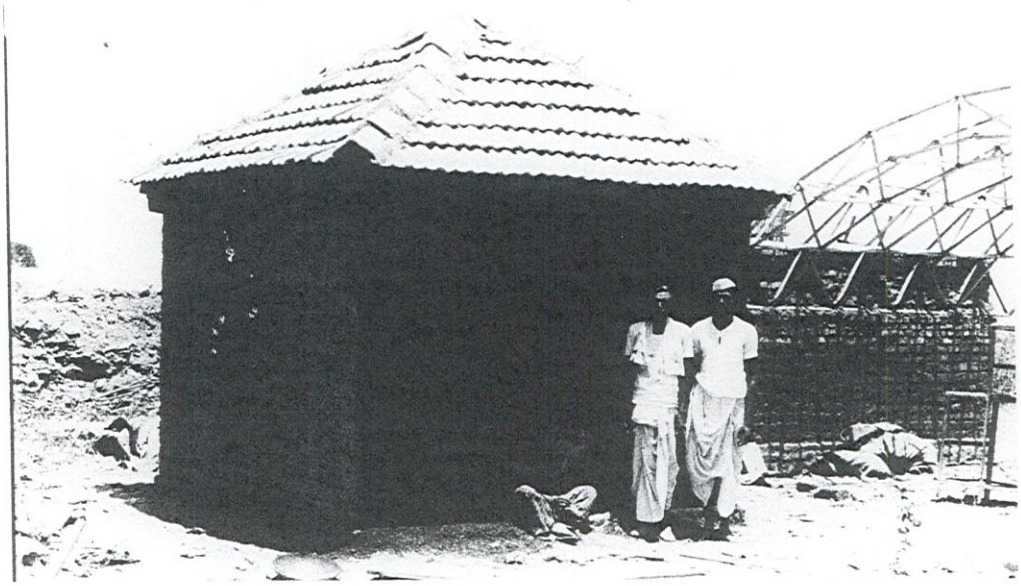
© CRATerre 86

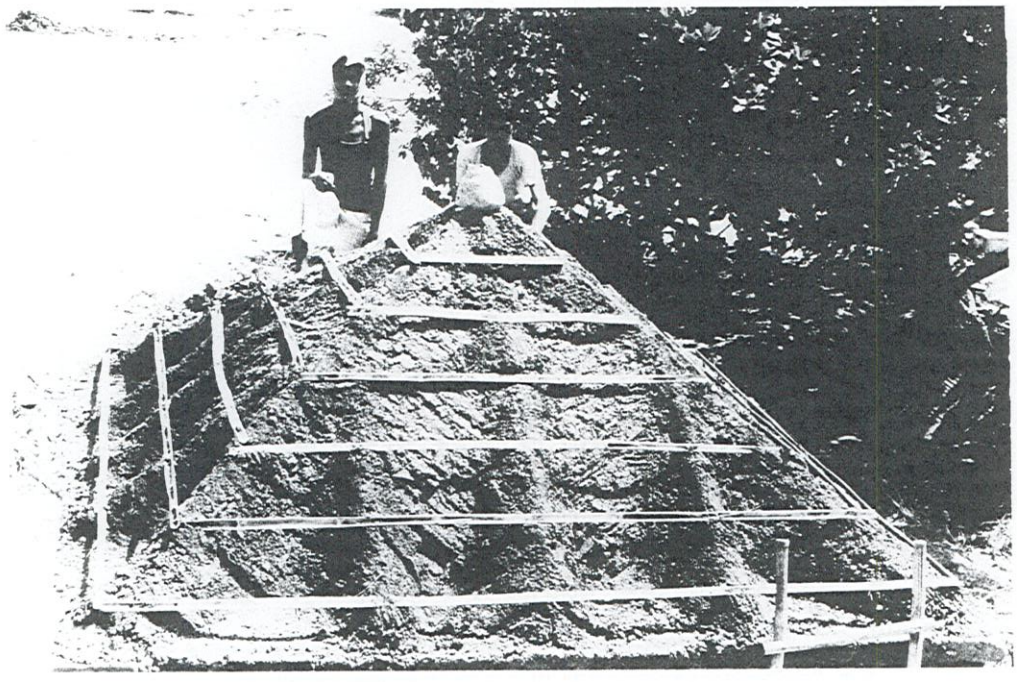
INTERSECTION DE VOUTES EN BERCEAU PAR TRANCHES

Construction expérimentale GRET - CSV de Wharda, Inde, architecte Thierry Joffroy, 1983-84.

1 - De la voûte à la pyramide par des boudins de terre formant chevrons.

2 - Couverture en tuiles terminée.





Réf. 1 et 2 : Photographies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

Nous regroupons sous l'appellation de "voûtes partiellement gauches" les voûtes qui ne peuvent se définir par leur seule géométrie. L'architecture vernaculaire et populaire des régions arides du Moyen-Orient rassemble de très nombreux exemples de ce type de voûtes. Les techniques de constructions sont similaire à celles des voûtes en berceau mais le dessin des tranches est défini par des génératrices variables. On peut aussi observer une association des techniques de construction par tranches, assises rayonnantes et tronconiques. Les supports de ces voûtes sont le plus souvent horizontaux mais peuvent comporter des plans courbes. On compte deux principales catégories de formes de voûtes partiellement gauches :

- Les voûtes en trompes d'angle, de base carrée, qui démarrent depuis chaque angle avec des portions de cônes,

- Les voûtes en navette, de base rectangulaire, qui démarrent en chacune de leurs extrémités par des sortes de "cul-de-four" gauches et dont la partie centrale est en berceau, très souvent bombée.

La construction de ces voûtes réclame un grand savoir-faire. Seul la sûreté de l'œil et de la main de maçons chevronnés permet de les réaliser, de gauchir leur forme, tranche après tranche, sans guides ni gabarit de traçage.

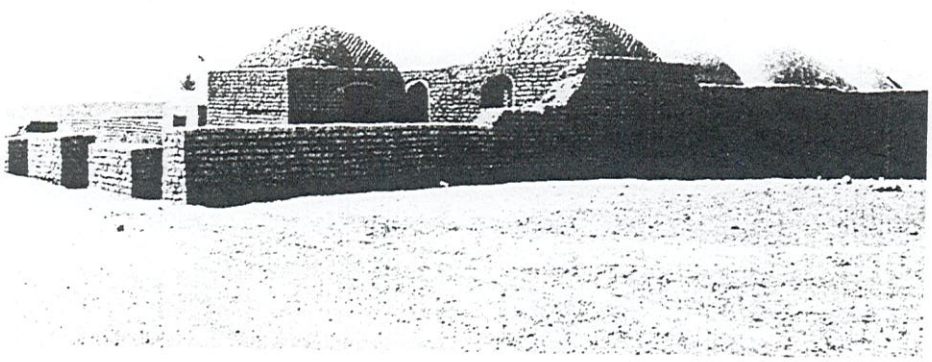
© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

TYPOLOGIE IRAN

1 - Voûtes en trompes d'angle sur plan carré, village en Iran oriental.

2 - Région de Kerman, Iran, voûtes en trompes d'angle sur plan rectangulaire.



Réf. 1 : Archéologie, Ed. Fernand Nathan.
Réf. 2 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

CONSTRUCTION IRAN

Région de Tabas, Iran :

Construction d'une voûte en trompe d'angle.

1 - On observe la double inclinaison des tranches.

2 - Jonction entre les quatre trompes.

Réf. : Photographie ABEDINI-RAD, mission CRATerre en Iran, 1984-85.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

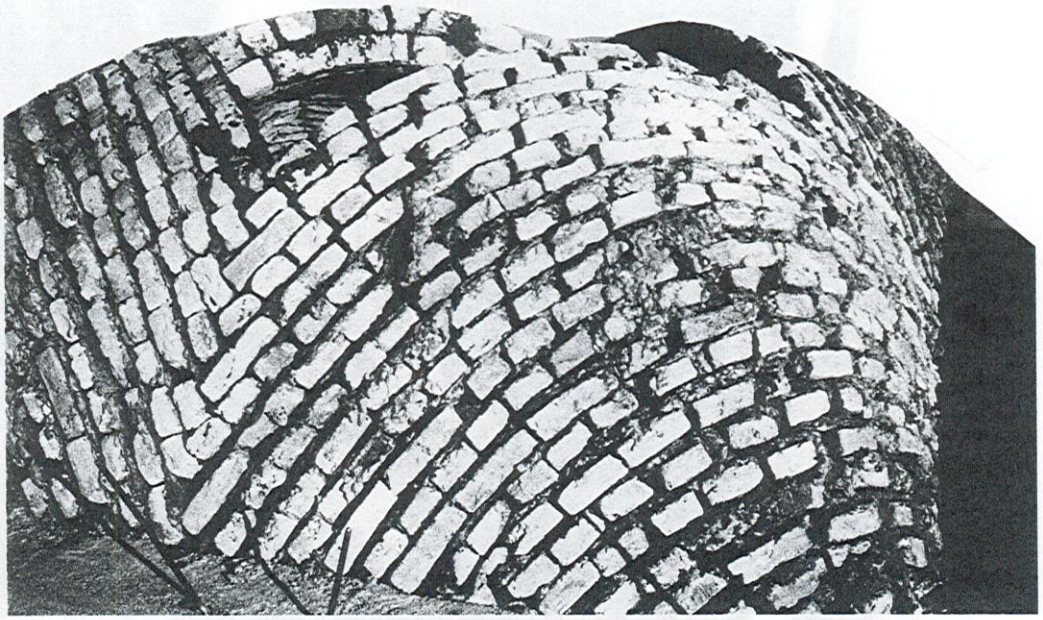
CONSTRUCTION IRAN

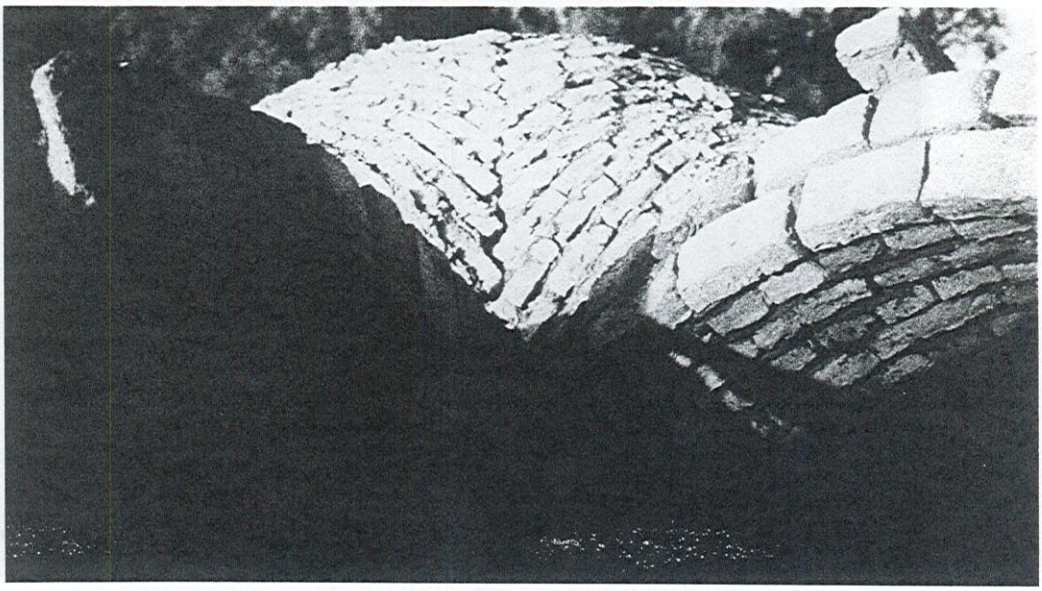
Région de Tabas, Iran :

Construction d'une voûte en trompes d'angles.

3 - La construction se poursuit avec le même appareillage des briques d'adobe.

4 - Les tranches s'emboîtent, une sur deux.





Réf. : Photographies ABEDINI-RAD, mission CRATerre en Iran, 1984-85.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

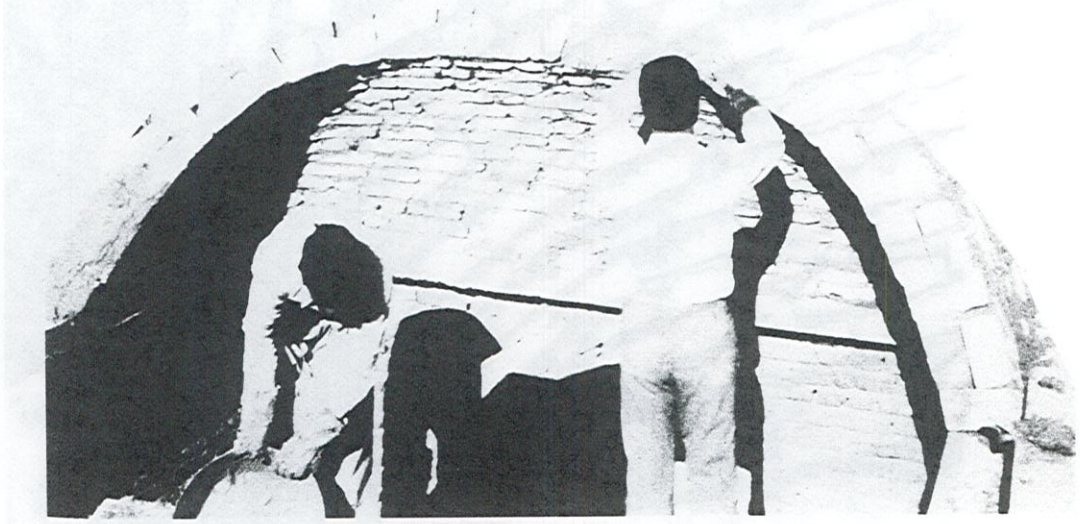
CONSTRUCTION IRAN

Région de Tabas, Iran :

Construction d'une voûte en navette.

1 - Début de la construction en sorte de cul-de-four démarrant sur trois murs à angle droit. Une fois la courbure principale obtenue, la construction se poursuit en tranches parallèles.

2 - Voûtes en navette surmontées de capteurs à vent, proximité de la frontière afghane, en Iran.



Réf. 1 : Photographie ABEDINI-RAD, mission CRATerre en Iran, 1984-85.

Réf. 2 : RAINER, R. ; Anonymes Bauen im Iran, Ed. Akademische Druck-u Verlag sanstadt, Graz, 1977.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

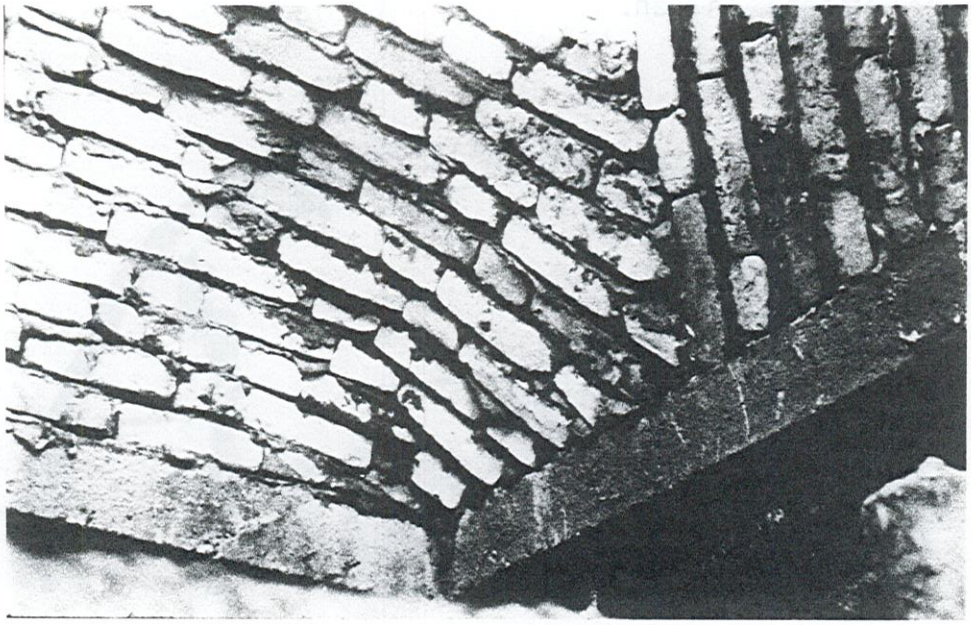
CONSTRUCTION IRAN

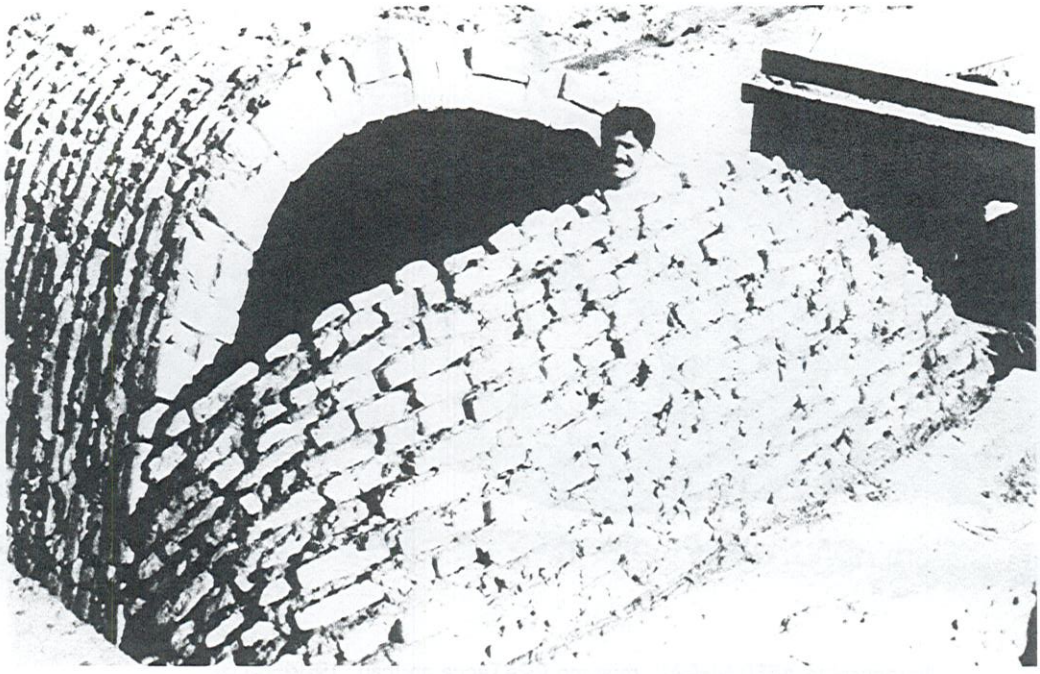
Région de Tabas, Iran :

Construction d'une voûte en navette.

1 - La fermeture peut se faire à l'une des extrémités de la voûte, ou bien en son milieu.

2 - Détail de l'appareillage pour le démarrage et la fermeture de la voûte.





Réf. : Photographies ABEDINI-RAD, mission CRATerre en Iran, 1984-85.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

CONSTRUCTION IRAN

Iran, construction de voûtes en navette.

1 - Variante de la fermeture de voûte.

2 - Variante de technique de construction : Les murs de départ des extrémités sont rehaussés d'un pan de mur courbe.

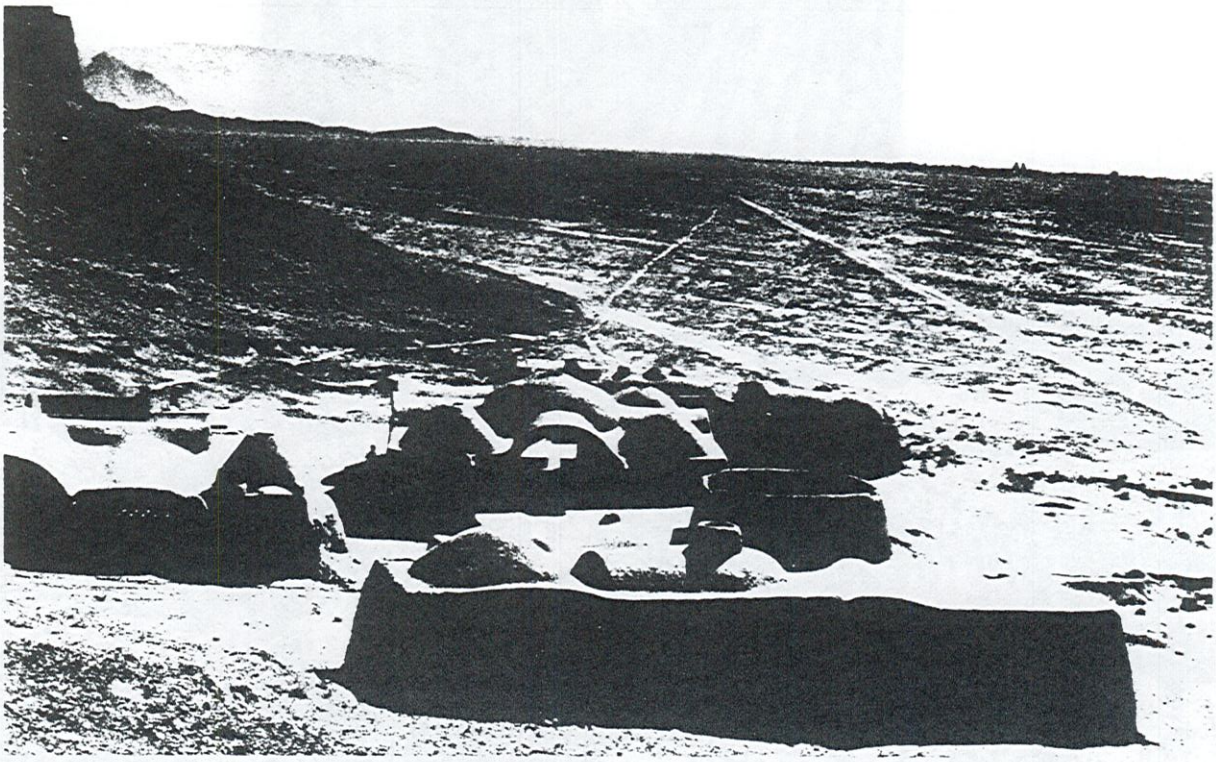
Réf. 1 : Revue MIMAR, n°8.
Réf. 2 : GELTAFTAN, Musée d'art Contemporain de Téhéran, 1980.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

TYPOLOGIE IRAN

Sanctuaire du culte Zoroastrien, près de Yazd, en Iran :
Etonnante variété des formes de voûtes.



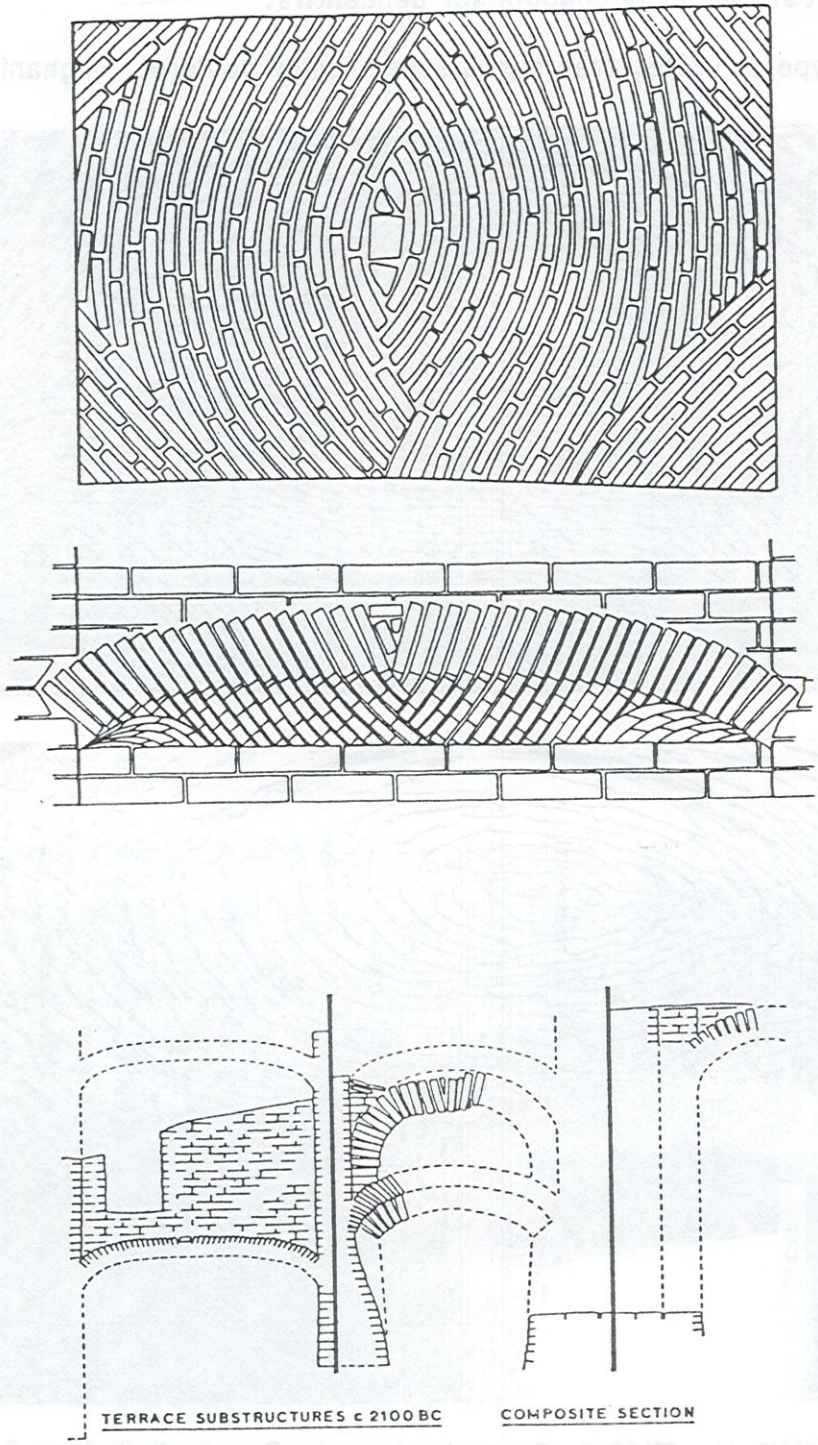
Réf. : DETHIER, J. ; Des Architectures de Terre, catalogue d'exposition du CCI, Paris, 1982.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

TYPOLOGIE IRAQ

Tell Al Rimah, zone AS, détail de voûtes (d'après Oates, 1973).



Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

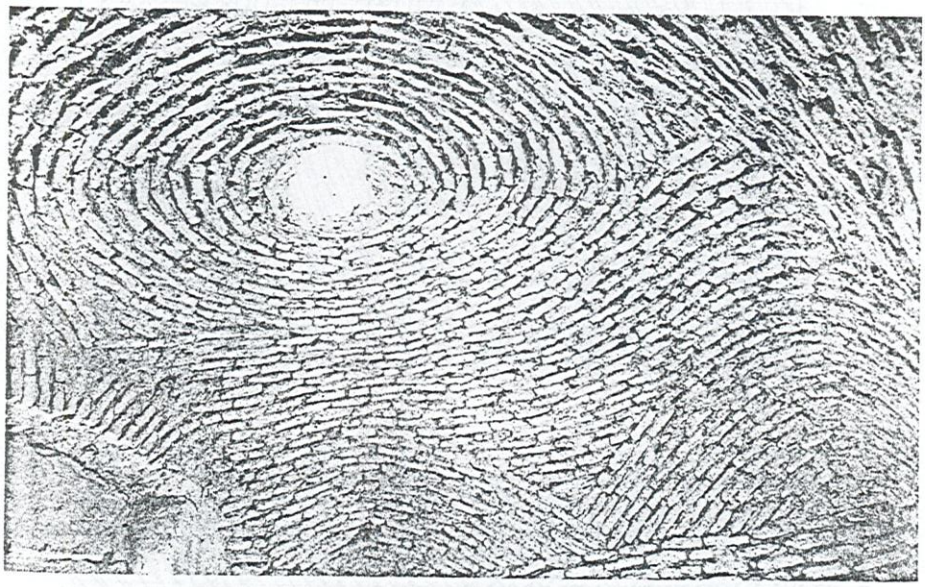
© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

TYPOLOGIE AFGHANISTAN

1 - Voûte appareillée en tranches associant les trompes d'angle aux assises tronconiques vers la partie centrale. La voûte s'appuie sur des murs horizontaux et des arcs-sommiers. Elle est de forme intermédiaire entre la voûte en berceau et la coupole sur pendentifs.

2 - Même type de voûte, très surbaissée, région de Hérat, Afghanistan.



Réf. 1 : BOURGEOIS, J L. ; PELOS, C. ; Spectacular Vernacular, Peregrine Smith Books, Salt Lake City, 1983.

Réf. 2 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

CONSTRUCTION FRANCE

Maison de M. Plantier, Lumio, Corse :

Construction d'une voûte sur plan triangulaire reposant sur deux arcs-sommiers, l'un en plein cintre et l'autre en ogive, et sur un sommier courbe taillé dans un mur de pisé. Constructeur, Christian Moretti, assisté de Thierry Joffroy et Pascal Baeteman, 1984.

Réf. : Photographies BAETEMAN, P.

© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

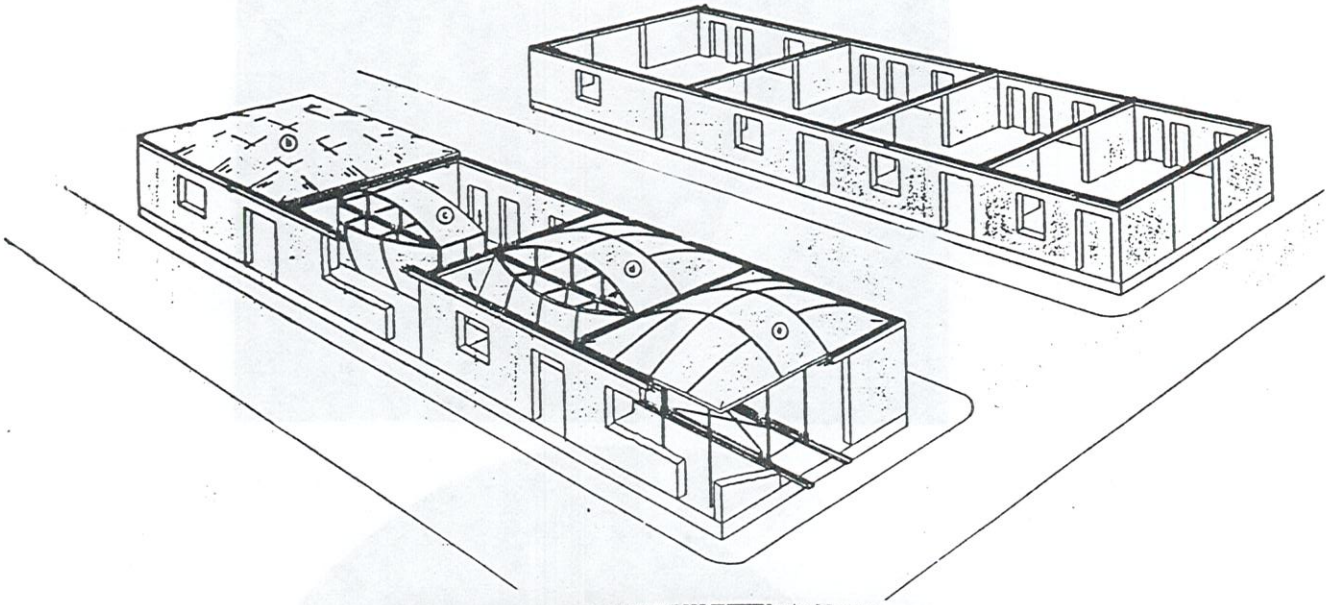
CONSTRUCTION INDE

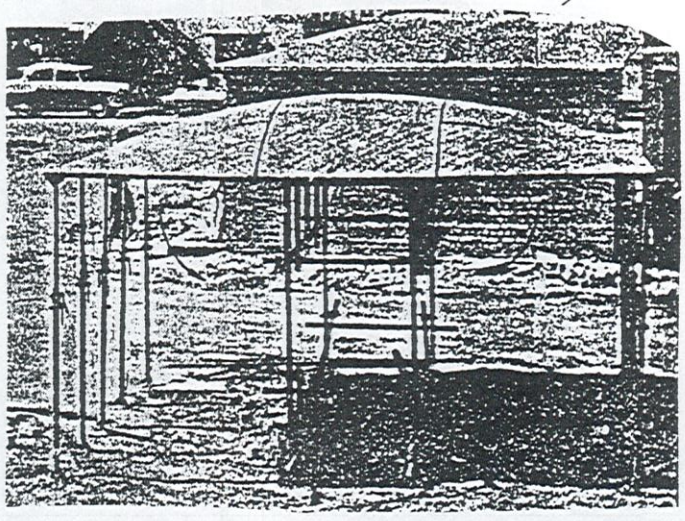
Expérimentation du Structural Engineering Research Center, CSIR de Madras, Inde :

Voûtes funiculaires en blocs de terre comprimée apparentée à la voûte en trompes d'angle surbaissée. Construction sur coffrage métallique et reprise des poussées par un chaînage en B A.

1 - Etapes de la construction.

2 - Coffrage.





Réf. : Dessins et photographies dans "Houses for economically weaker sections, Structural Engineering Research Center, CSIR Campus, Madras, Inde.

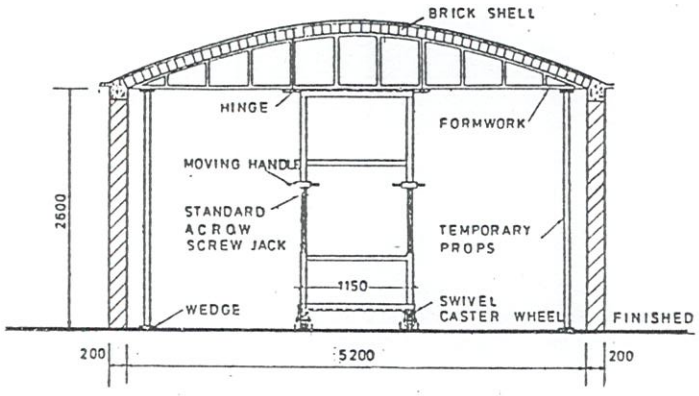
© CRATerre 86

VOUTES PARTIELLEMENT GAUCHES

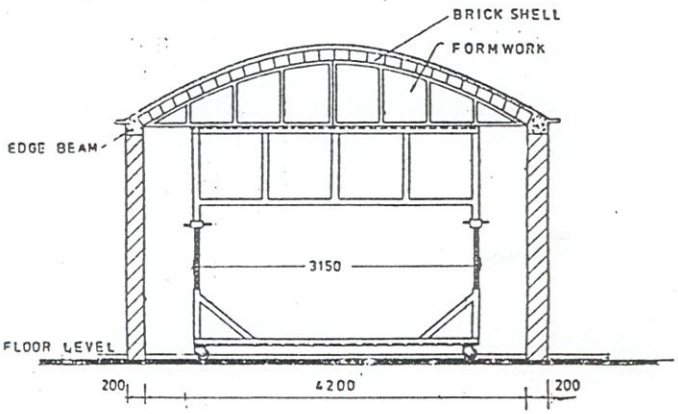
CONSTRUCTION INDE

Expérimentation du Structural Engineering Research Center, CSIR Campus de Madras, Inde.

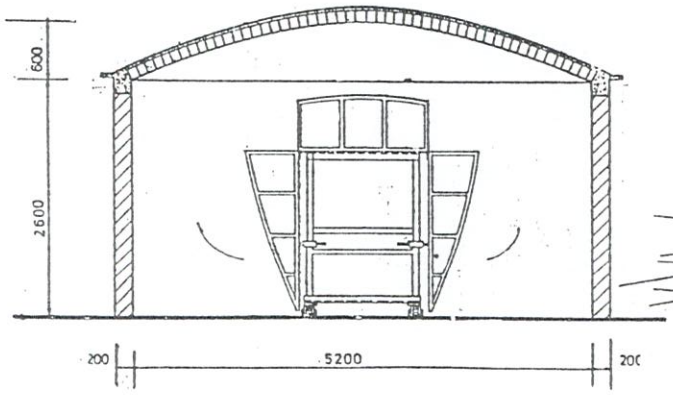
- Détails sur coffrage.



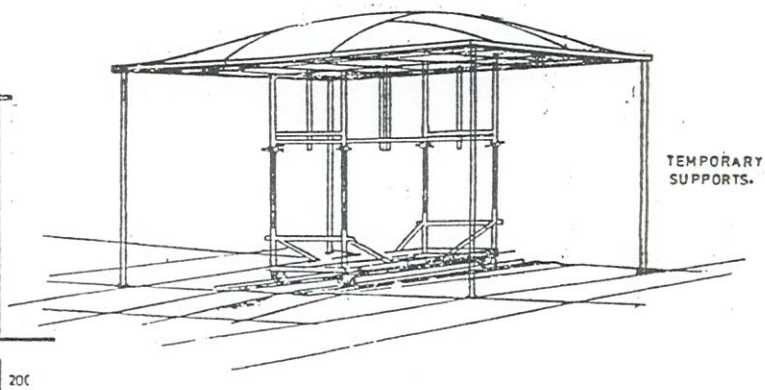
LONGITUDINAL SECTION
FORMWORK IN POSITION



CROSS SECTION
FORMWORK IN POSITION



FORMWORK AFTER DECENTERING



A PERSPECTIVE VIEW

Réf. : Dessins et photographies dans "Houses for economically weaker sections, Structural Engineering Research Center, CSIR Campus de Madras, Inde.

© CRATerre 86

COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

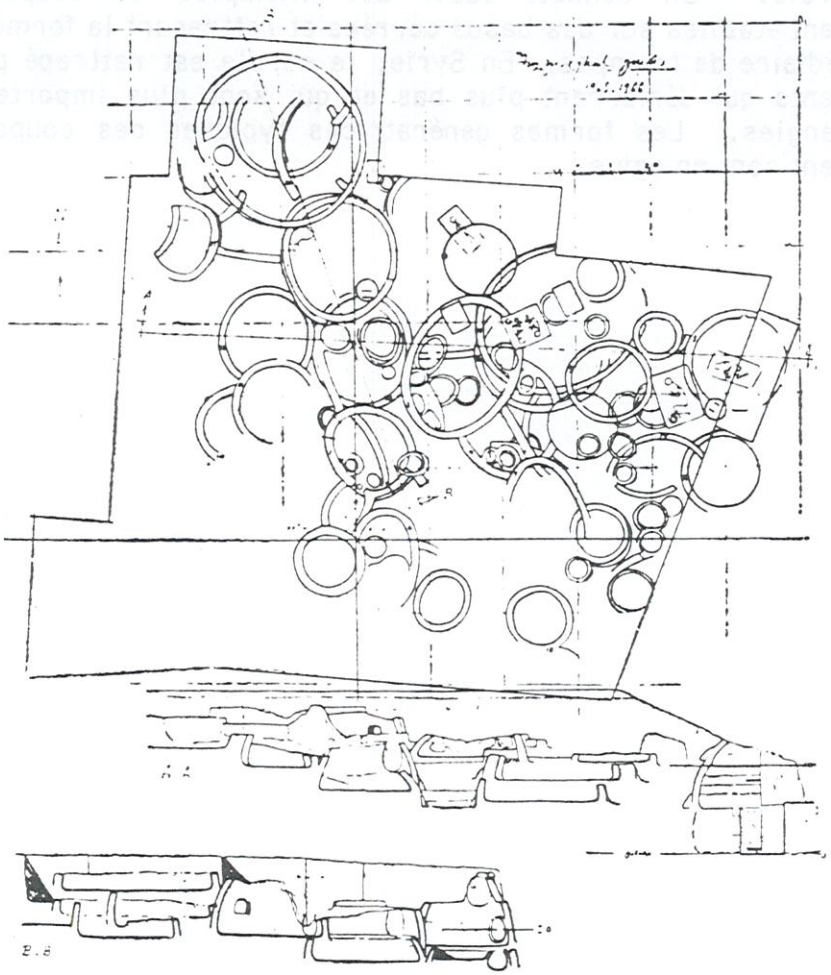
Les exemples les plus anciens de coupoles en encorbellement sont datés des 5ème et 4ème millénaires av. J.C. Il s'agit de la forme la plus lointaine de construction de voûtes en briques. Cette technique de l'encorbellement est encore employée en Syrie ainsi qu'en Iran. Ce sont les voûtes de ce type, en briques de terre qui couvrent les plus grands espaces ; la glacière de l'oasis de Meru, en Iran couvre 280 m2. La technique est simple et consiste en un empilement d'assises horizontales et circulaires, ou légèrement ovales, chaque assise ayant un rayon légèrement inférieur à celui de la précédente. Ce type de coupole est dressé soit à même le sol soit sur l'assise horizontale de murs d'une pièce ronde ou ovale. On connaît aussi des exemples de coupoles en encorbellement établies sur des bases carrées et rattrapant la forme ronde par l'intermédiaire de trompes. En Syrie, le cercle est rattrapé par des encorbellements qui démarrent plus bas et qui sont plus importants au niveau des angles. Les formes génératrices typiques des coupoles en encorbellement sont en ogive.

© CRATerre 86

COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE URSS

Les exemples les plus anciens de coupoles en encorbellement sont datés du 5ème et du 4ème millénaires av. J.C. et ont été observés en Transcaucasie, URSS, sur le Site de Shulaveri. Elles sont établies à même le sol sur des bases circulaires ou ovales (d'après Académie des Sciences de la R.S.S. de Georgie, 1975).



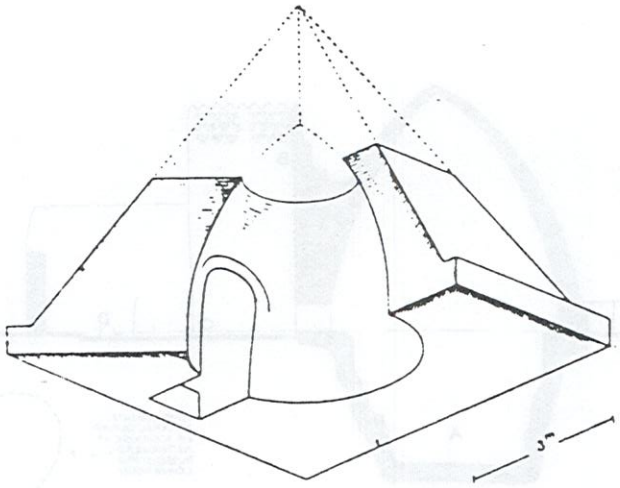
Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

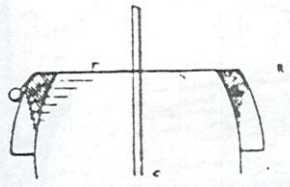
CONSTRUCTION EGYPTE

Tombes d'Abydos et de Deïr el Bahri. Auguste Choisy évoque un mode de construction à l'aide d'un guide fait d'une corde tournant autour d'une perche verticale.



On se guide (fig. 44) par un jeu de simbleaux analogue à celui qui servait pour les berceaux :

44



Un fil r tournant autour d'une perche.

Réf. : CHOISY, A. ; L'Art de bâtir chez les Egyptiens, Paris, 1904.

© CRATerre 86

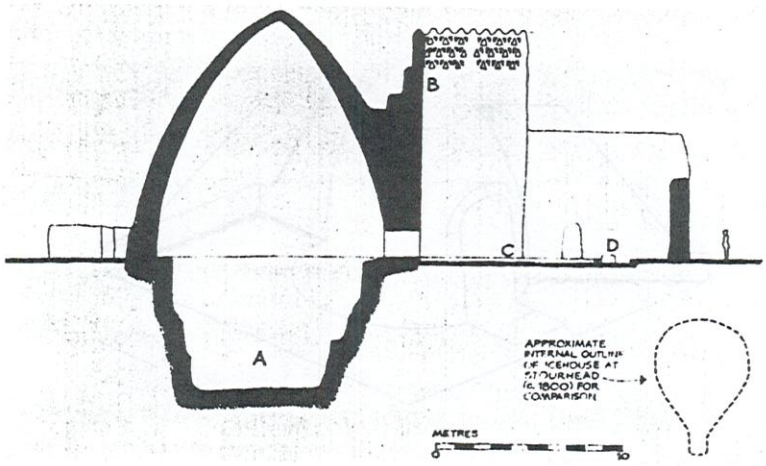
COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

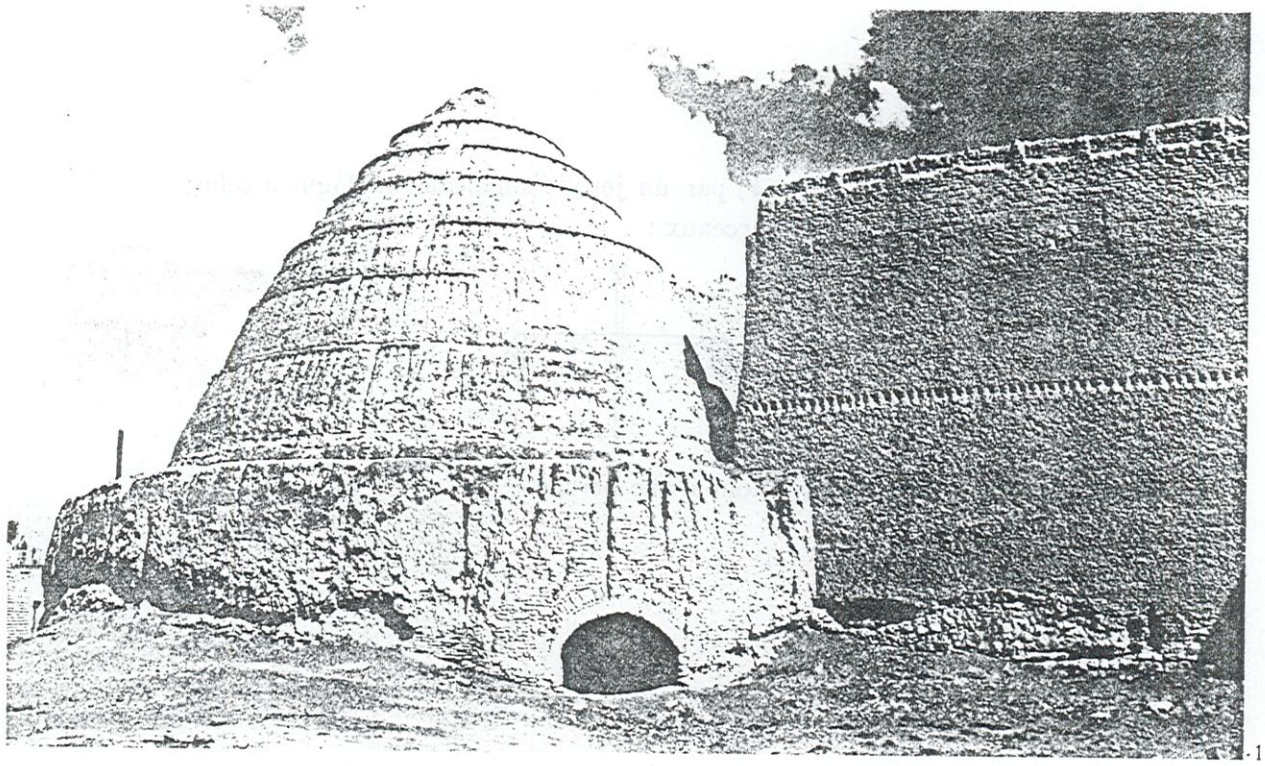
TYPOLOGIE IRAN

Exemples de glacières iraniennes :

1 - Coupe, d'après Beazley, 1977.

2 - Glacière dans la région de Kermann, Iran.





1

Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

Réf. : DETHIER, J. ; Des Architectures de Terre, catalogue d'exposition du CCI, Paris, 1982.

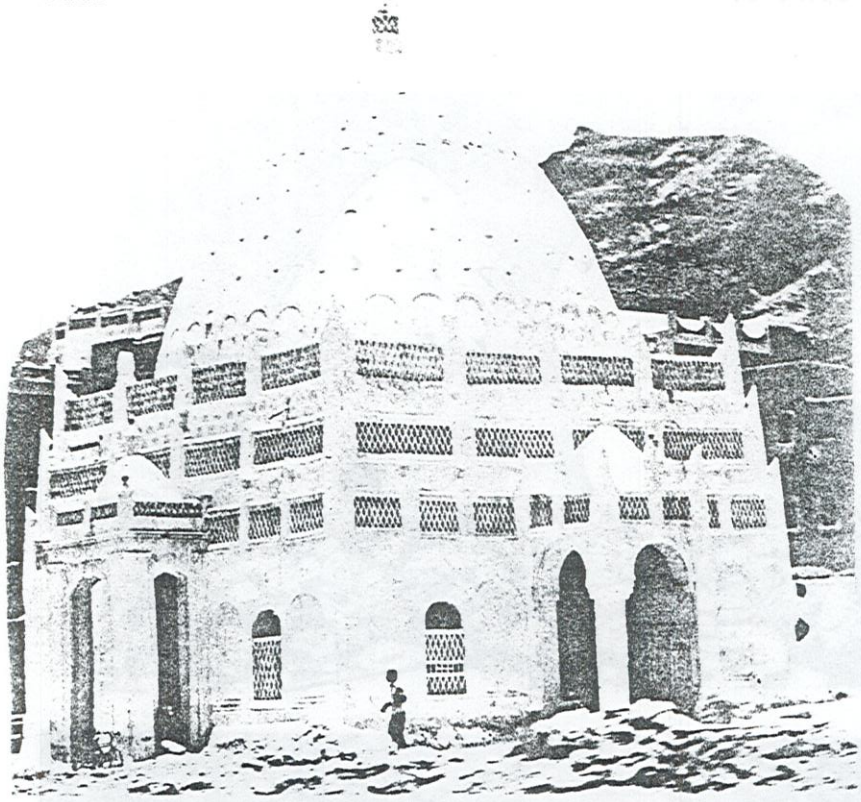
© CRATerre 86

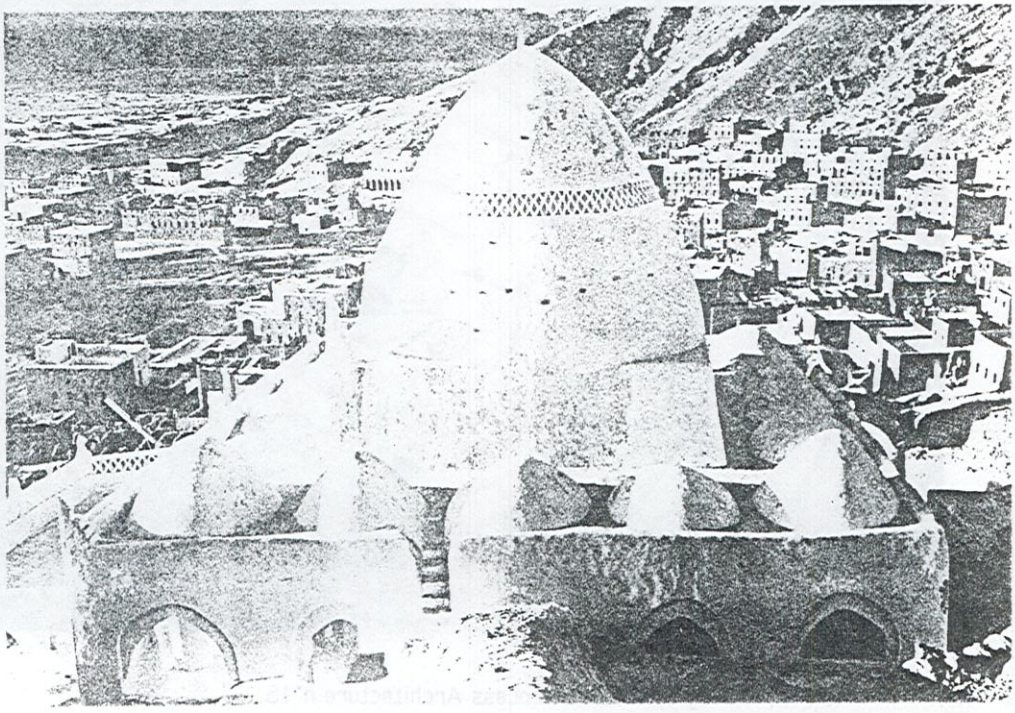
COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE YEMEN DU SUD

1 - Mausolée du prophète Hüd à Quahr Hüd, Yémen du Sud.

2 - Mausolée du village de Ghuraf, région de Wâdi Hamadraout, Yémen du Sud.





Réf. 1 et 2 : DETHIER, Jean ; Des Architectures de Terre, catalogue d'exposition du CCI, Paris, 1982.

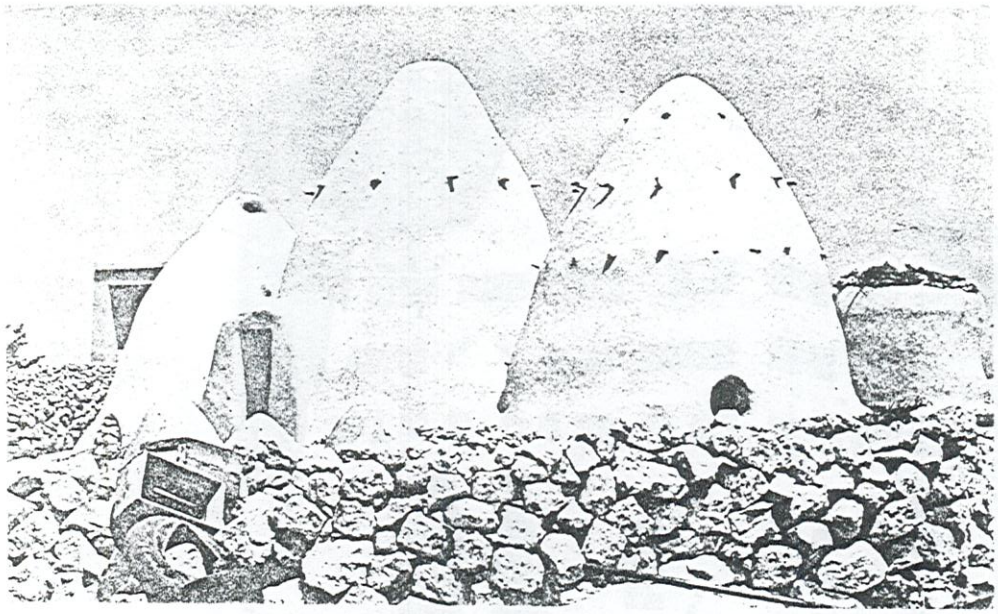
© CRATerre 86

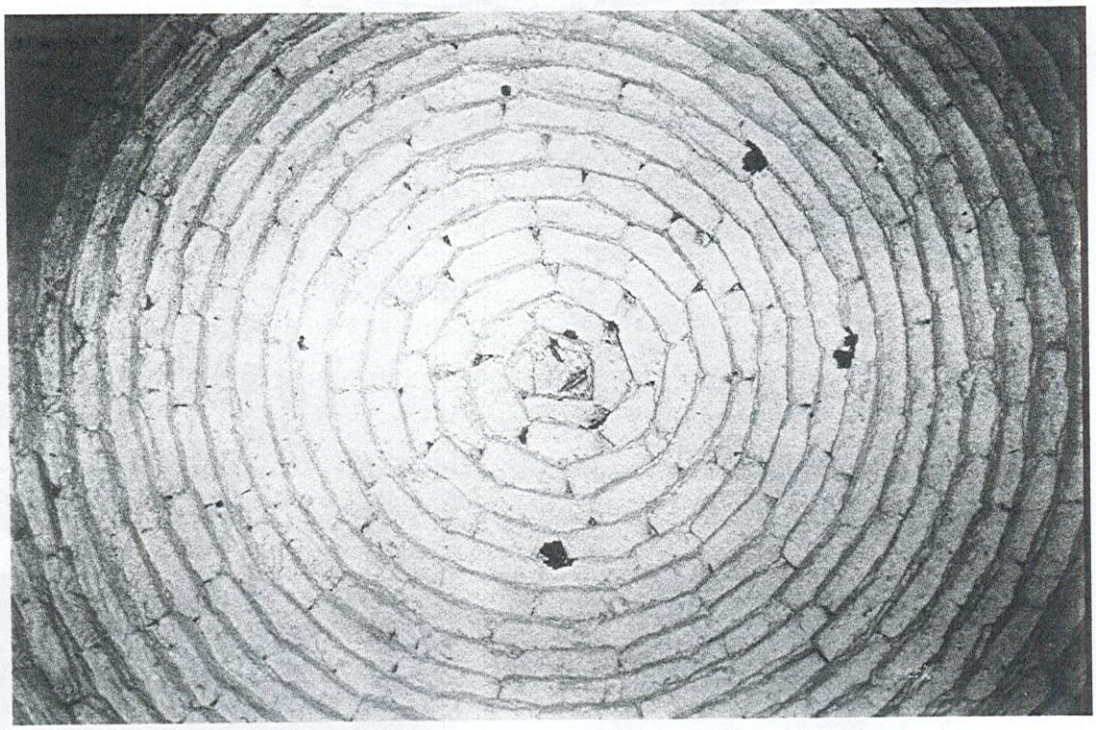
COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE SYRIE

1 - Maisons-coupoles en Syrie sur base circulaire. Les bois saillants servent d'échaffaudage.

2 - Appareillage en spirale.





Réf. 1 : YAGI, K ; Photographie dans Process Architecture n°15.

Réf. 2 : Photographie CRATerre.

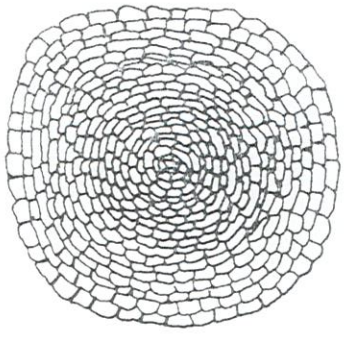
© CRATerre 86

COUPOLES EN ENCORBELLEMENT

TYPOLOGIE SYRIE

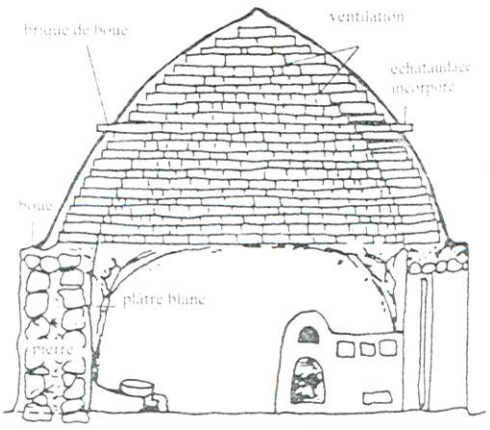
1 - Ensemble d'habitations de plan carré couvertes de coupoles en encorbellement, région de Damas, Syrie.

2 - Détails : le plan circulaire est rattrapé par un encorbellement de briques dans les angles ou par des corbeaux en pierre ou en bois.



Vue de la surface intérieure d'un toit en dôme.

Source: Yagi 1980, fig. 26.



Coupe d'une maison à coupole.

Source: Yagi 1980, fig. 26.

Réf. 1 : Photographie CRATerre.
Réf. 2 : Croquis YAGI, 1980 ; Transformation de l'habitat rural, Vol. II, Prix Agakhan d'architecture.

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

Bien qu'utilisée aux époques romaines puis byzantines, la coupole en maçonnerie clavée en pendentifs, généralement élevée sur un plan carré, fut réservée pour l'essentiel à l'architecture monumentale, civile ou religieuse. L'architecture populaire ne l'a que très peu employée et son apparition dans l'architecture en terre n'est pas très ancienne. Le renouveau actuel de la construction des coupoles en pendentifs est en grande partie dû à l'influence des travaux de l'architecte égyptien Hassan Fathy.

D'autres plans que le seul plan carré peuvent supporter des coupoles en pendentifs, pourvu que leurs sommets soient circonscrits. Les génératrices de ces coupoles sont le plus souvent pleins cintres mais peuvent varier, influençant en conséquence la forme des arcs ou des murs-sommiers courbes. Leur construction se fait par assises annulaires tronconiques, en exploitant les propriétés d'adhérence du mortier de pose des briques.

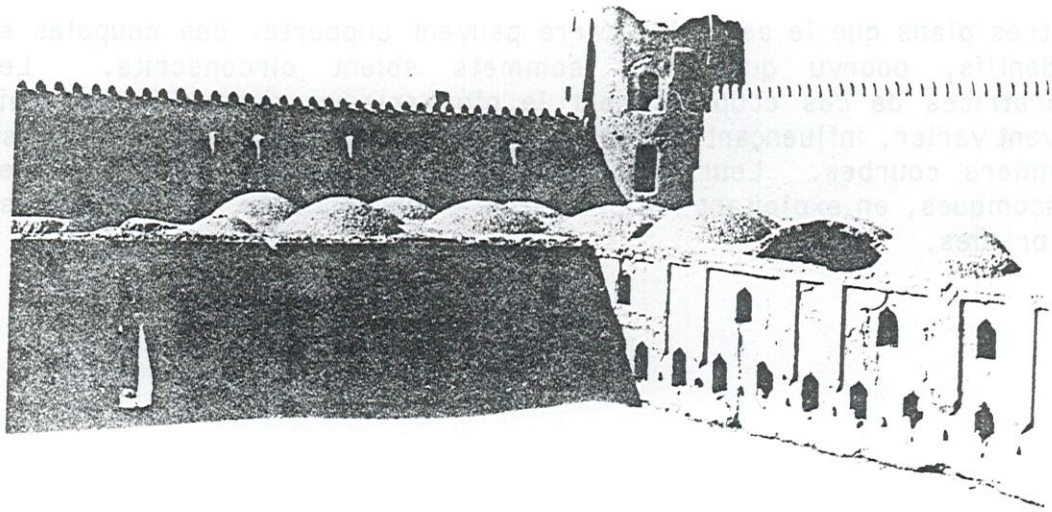
© CRATerre 86

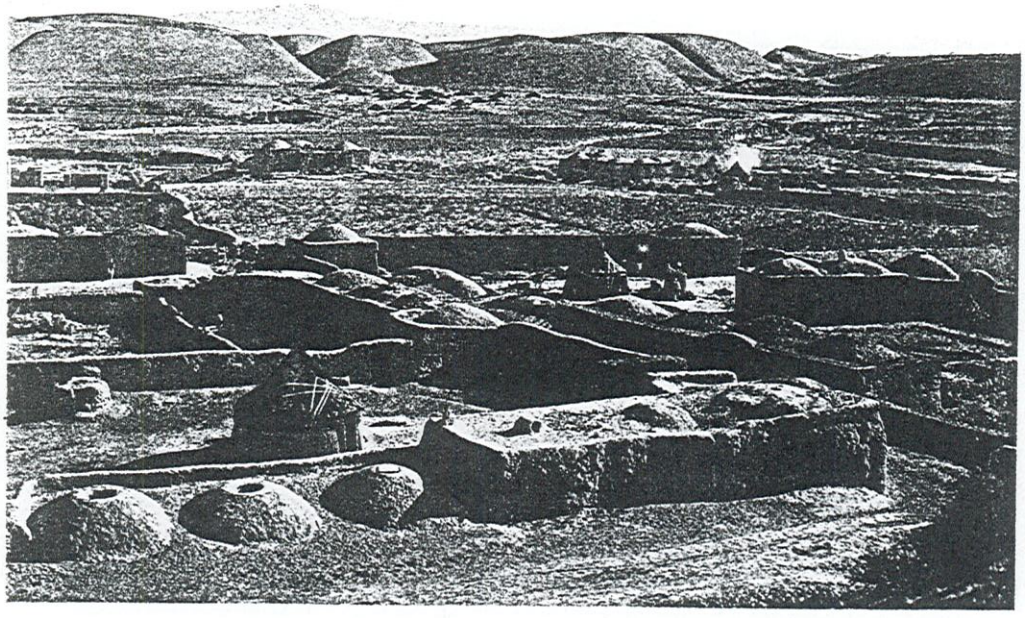
COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE IRAN ET AFGHANISTAN

1 - Iran, citadelle de Bam, 16ème siècle : Galerie couverte par une double rangée de coupoles en pendentifs autour d'une des plus grandes cours intérieures de la place forte.

2 - Village d'Afghanistan, coupoles en pendentifs, en adobe.





Réf. 1 : GALDIERI, E ; Le Meraviglie dell'Architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.
Réf. 2 : MICHELL, G ; Architecture of the islamic world, Ed. Thames and Hudson, Londres, 1978.

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION EGYPTE

Construction de coupoles en pendentifs sur un chantier de Hassan Fathy, en Egypte. Les briques sont positionnées grâce à un guide-bâton ou pige dont l'extrémité inférieure est fixée au centre de la coupole. Le support de la coupole est constitué d'arcs et de murs-sommiers courbes.

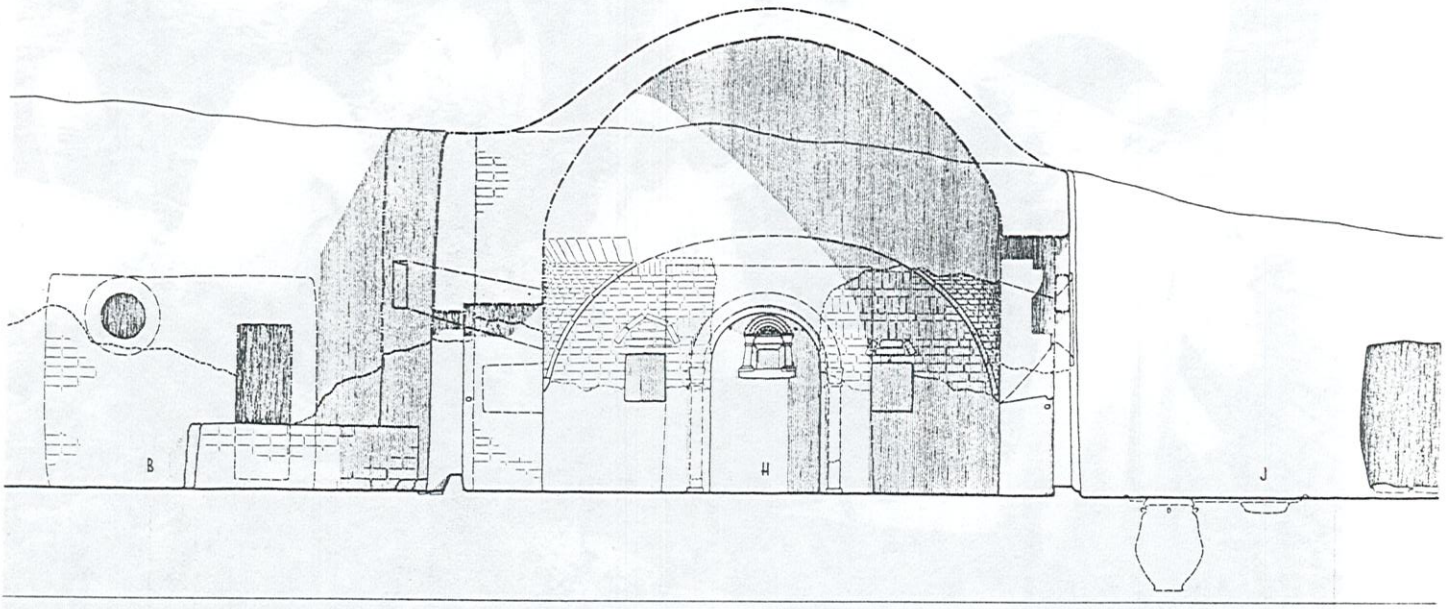
Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE EGYPTE

· Egypte, ermitages du désert d'ESNA, 6ème et 7ème siècles ap.J.C. Coupole en pendentifs construite en remplacement d'une voûte troglodytique plate qui s'est effondrée. Les sommiers courbes ont une forme en anse de panier en vue de réduire la hauteur de la coupole.



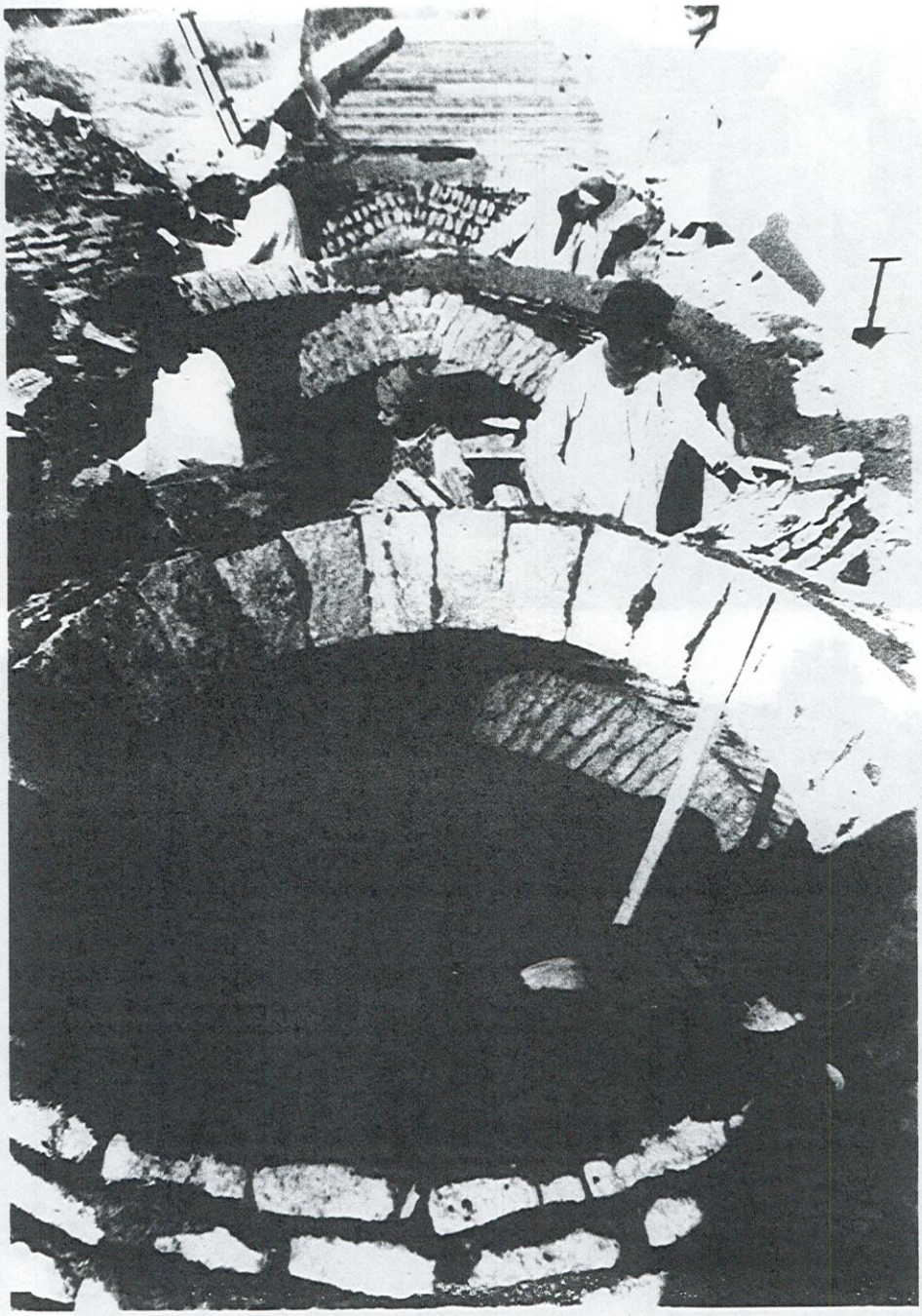
Réf. 1 et 2 : SAUNERON, S ; JACQUET, J ; Les ermitages chrétiens du désert d'ESNA, Publications de l'Institut français d'archéologie du Caire, Paris, 1972.

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION EGYPTE

Construction d'une coupole en pendentifs sur un chantier de Hassan Fathy, en Egypte.



Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

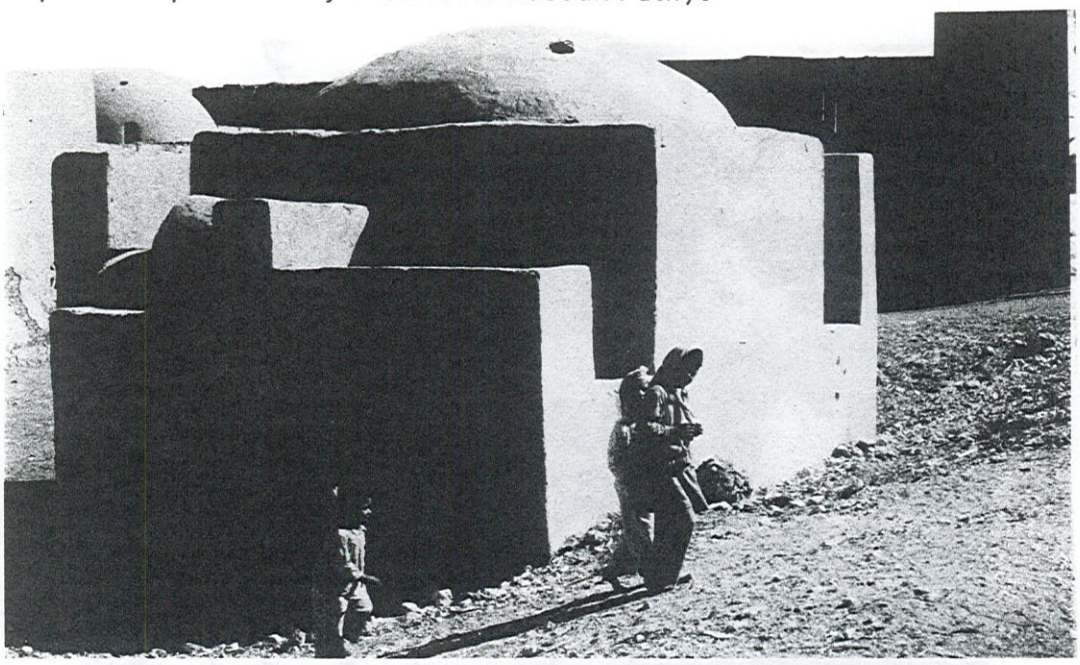
© CRATerre 86

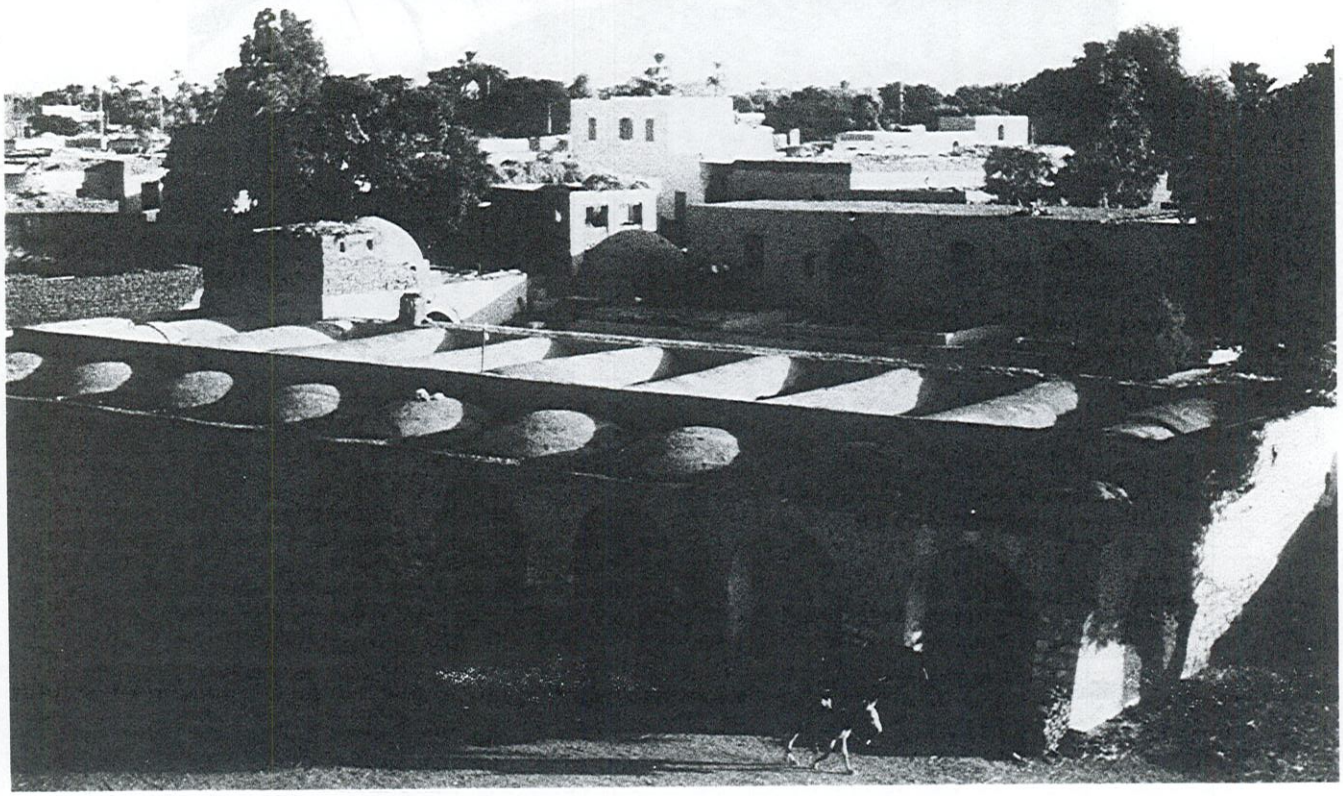
COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE EGYPTE

1 - Maison expérimentale réalisée par development Workshop à New Gourna, Egypte.

2 - Galerie du Marché de New Gourna couverte par une succession de coupoles en pendentifs, architecte Hassan Fathy.





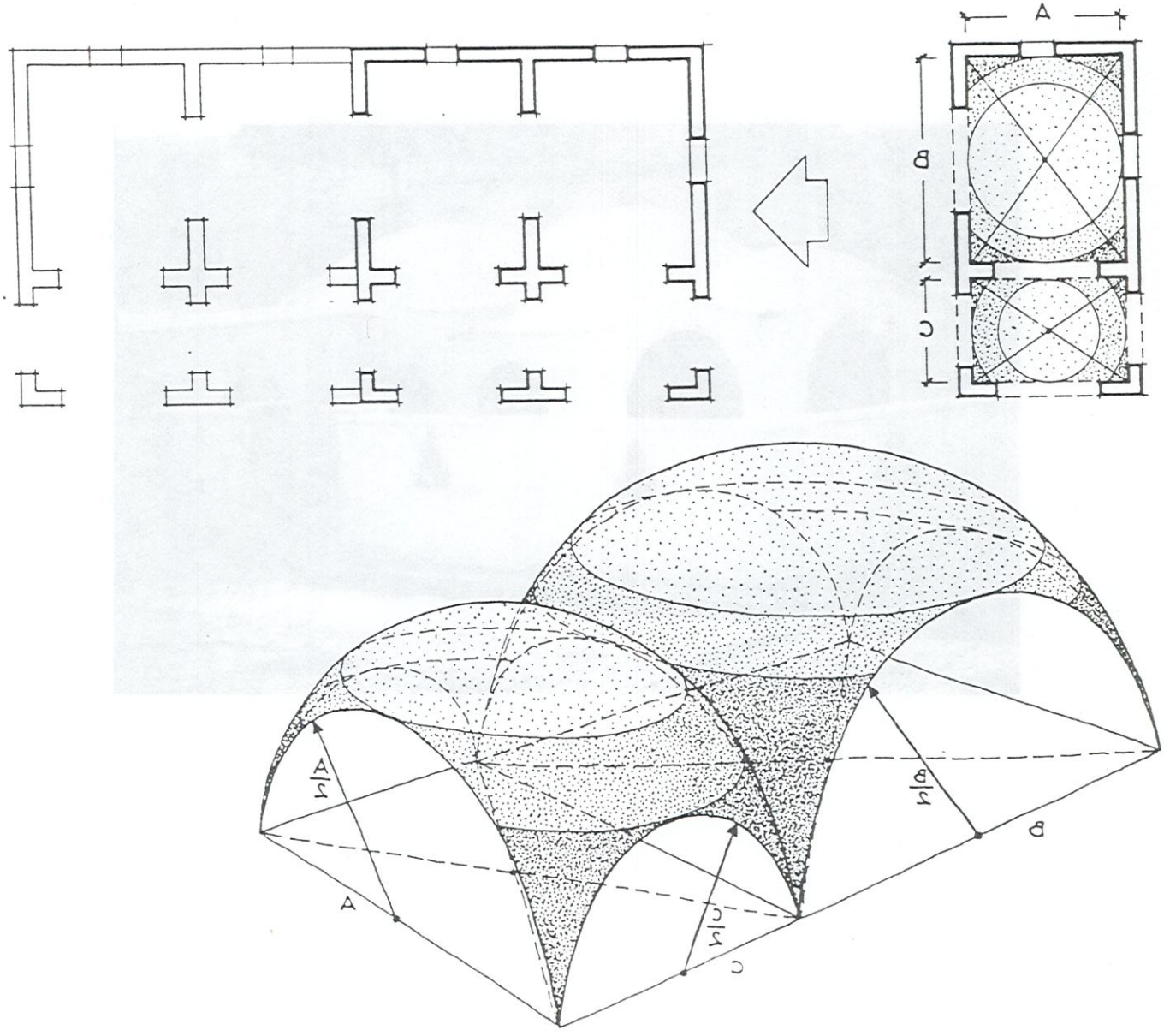
Réf. : Photographies CRATerre.

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Principe de l'emploi de la coupole en pendentifs sur plan rectangulaire. Projet de Rosso (ADAUA), Mauritanie, architecte Josep Esteve.



Réf. : Dessin de ESTEVE, Josep ,

© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE MAURITANIE

Utilisation de la coupole en pendentifs sur plan rectangulaire, projet de Rosso, (ADAUA), Mauritanie, Architecte Josep Esteve.

Réf. : Photographie DAVID, Th.

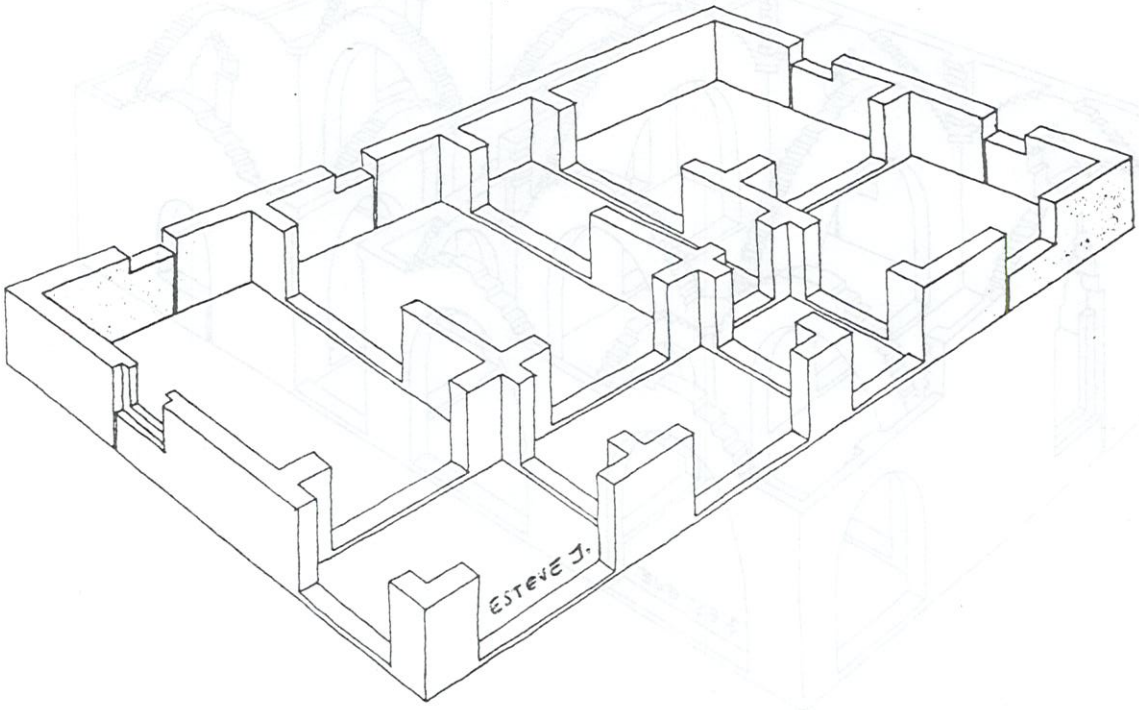
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Etapes de la construction d'un logement à Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA.

1 – Elévation des murs en blocs de terre.



Réf. : Dessin de l'architecte Josep ESTEVE.

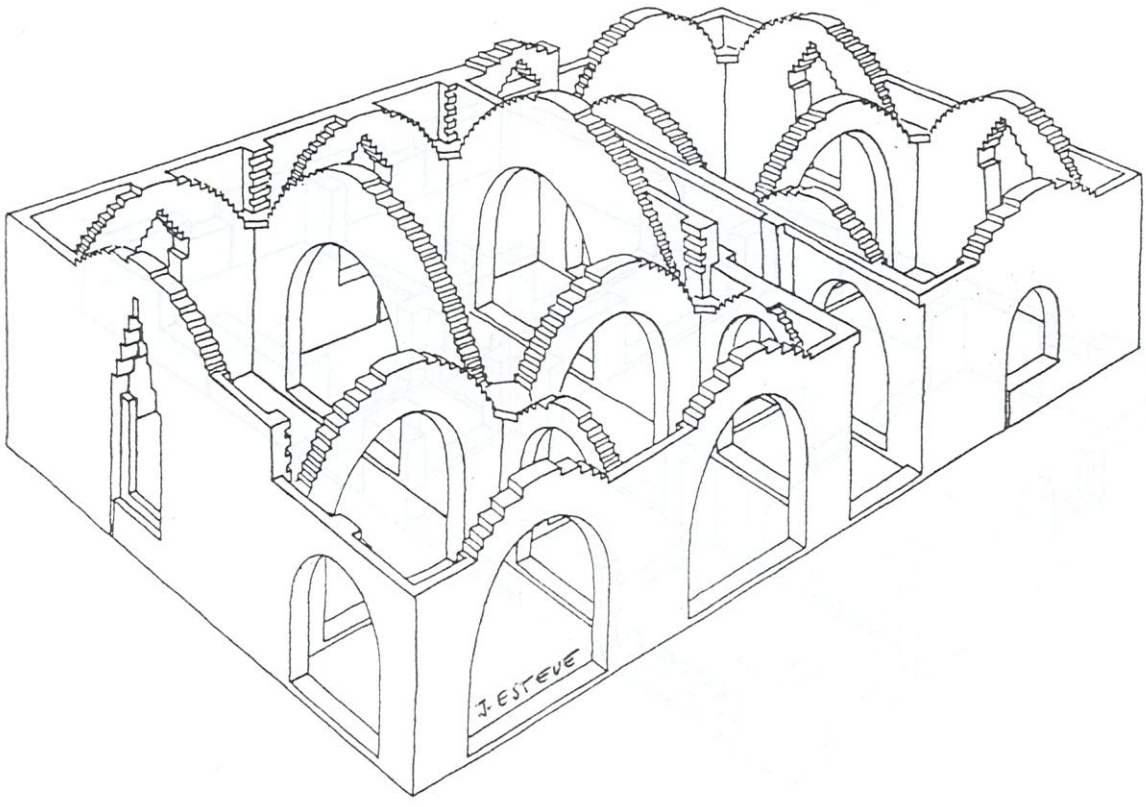
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Etapes de la construction d'un logement à Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA.

2 - Construction des arcs et des murs-sommiers.



Réf. : Dessin de l'architecte Josep ESTEVE,

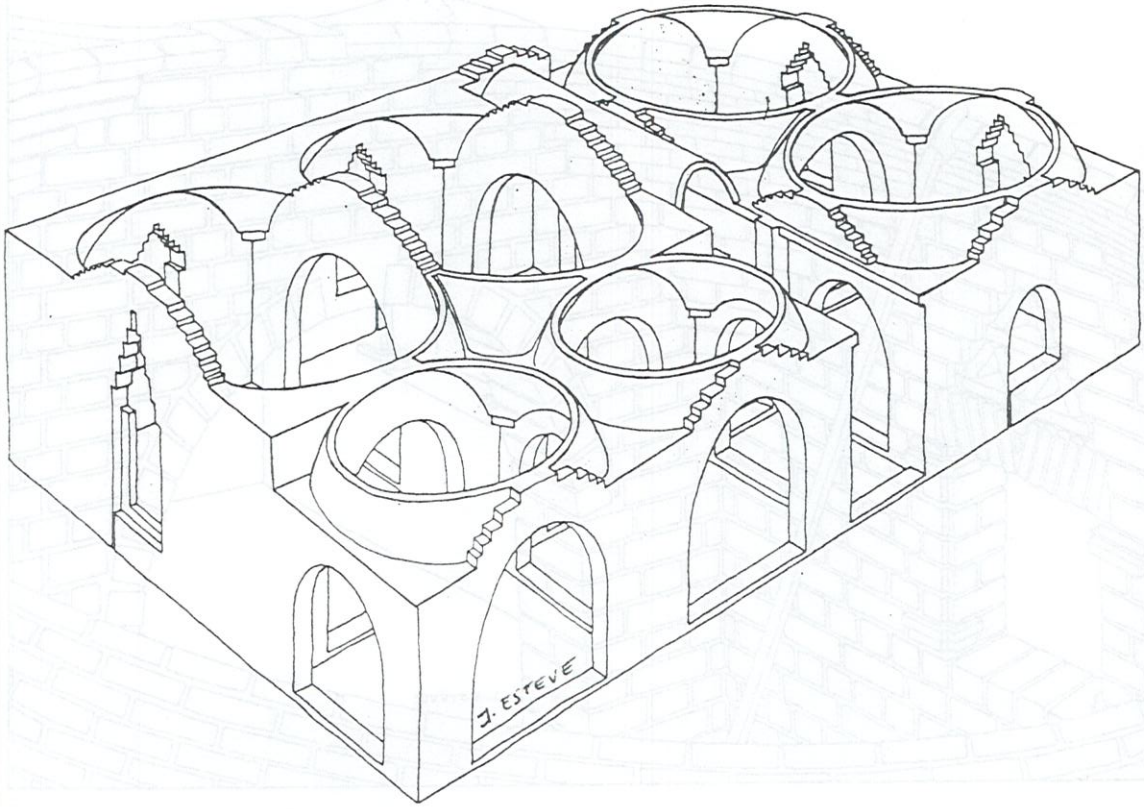
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Etapes de la construction d'un logement à Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA.

3 – Réalisation des pendentifs et élévation des calottes.



Réf. : Dessin de l'architecte Josep ESTEVE.

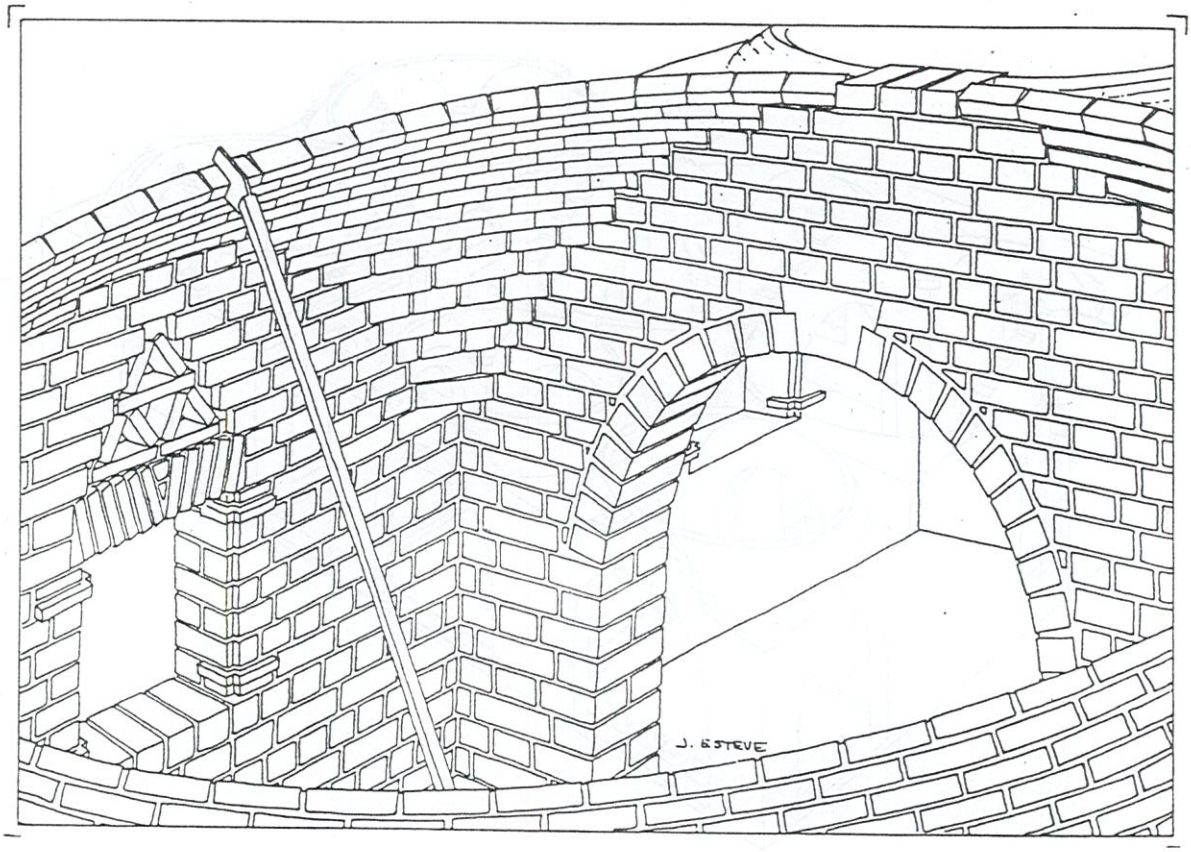
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Construction d'un logement à Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA :

Le pendentif est construit en encorbellement dans ses premières assises afin de mieux liaisonner les murs et améliorer la résistance de la structure.



Réf. : Dessin de l'architecte Josep ESTEVE.

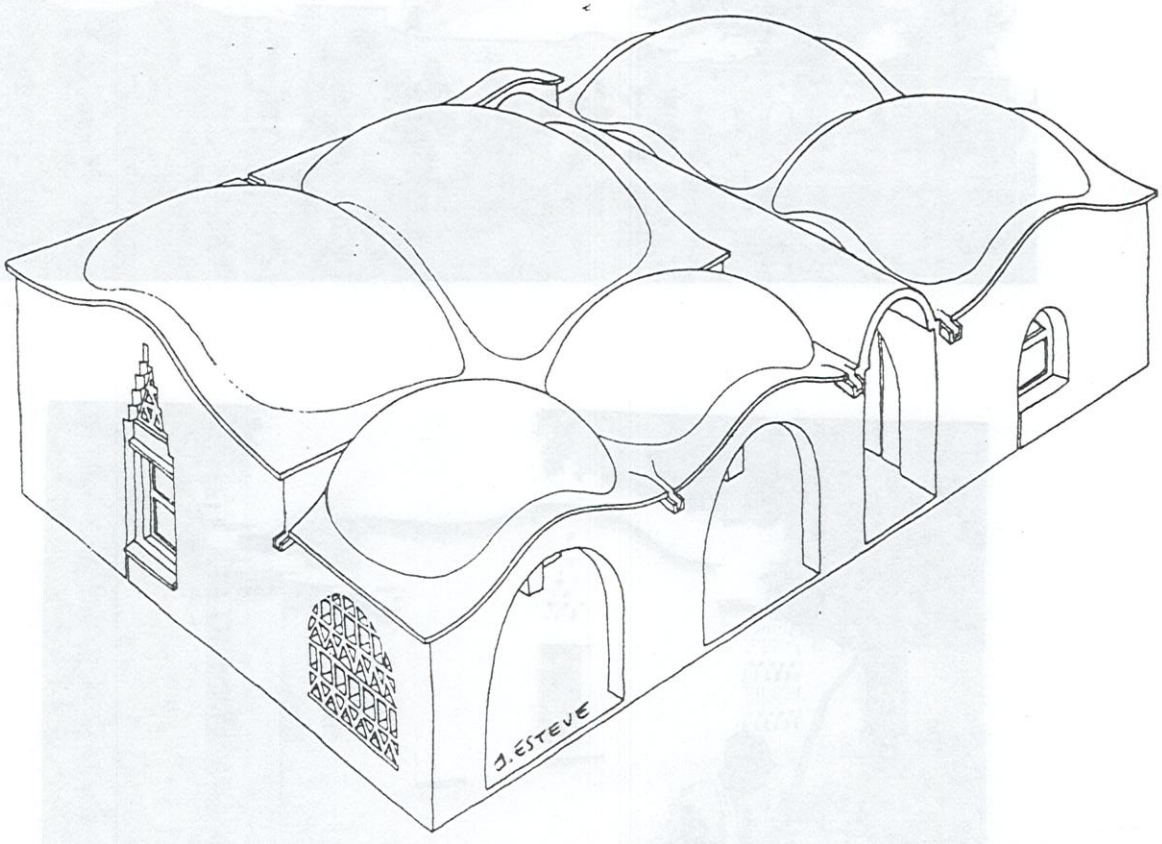
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION MAURITANIE

Etapes de la construction d'un logement à Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA.

4 - Logement entièrement couvert par les coupoles en pendentifs sur plan carré et rectangulaire.



Réf. : Dessin de l'architecte Josep ESTEVE.

© CRATerre 86

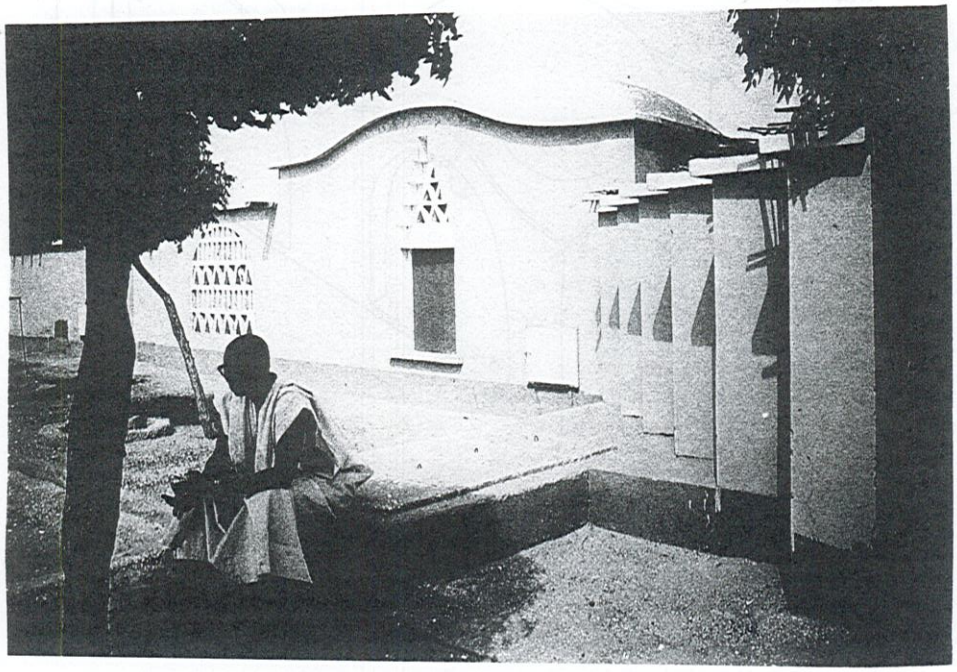
COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE MAURITANIE

Projet des 12 logements prototypes de Rosso, Mauritanie, architecte Josep Esteve, ADAUA.

1 - Vue générale.

2 - Détail d'une façade.



Réf. : Photographie ESTEVE, J.

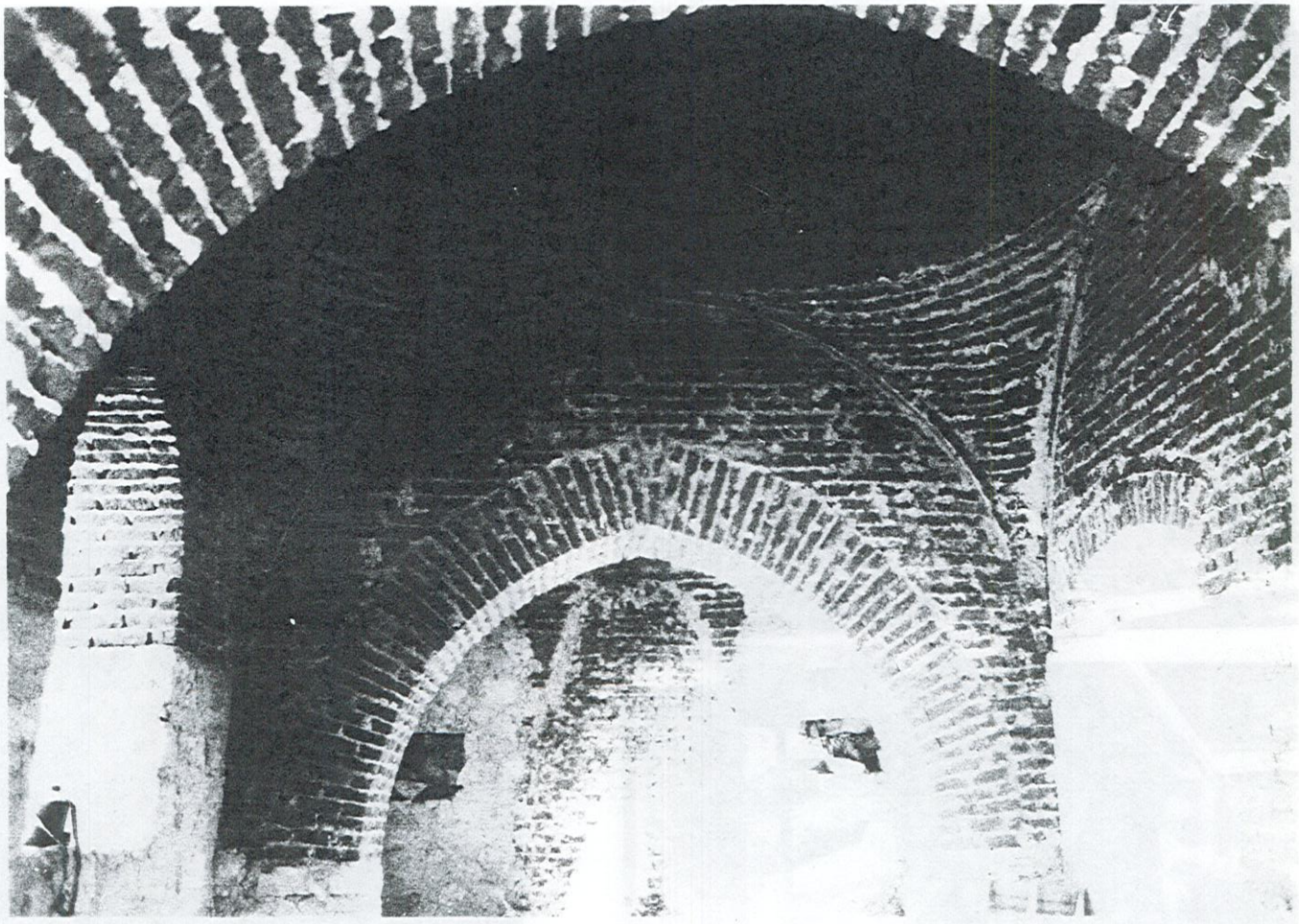
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE EGYPTE

Egypte, chantier récent de l'architecte Hassan Fathy :

Les arcs sont rehaussés de murs-sommiers soulignés par une rangée de brique en demi-cercle.



Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

© CRATerre 86

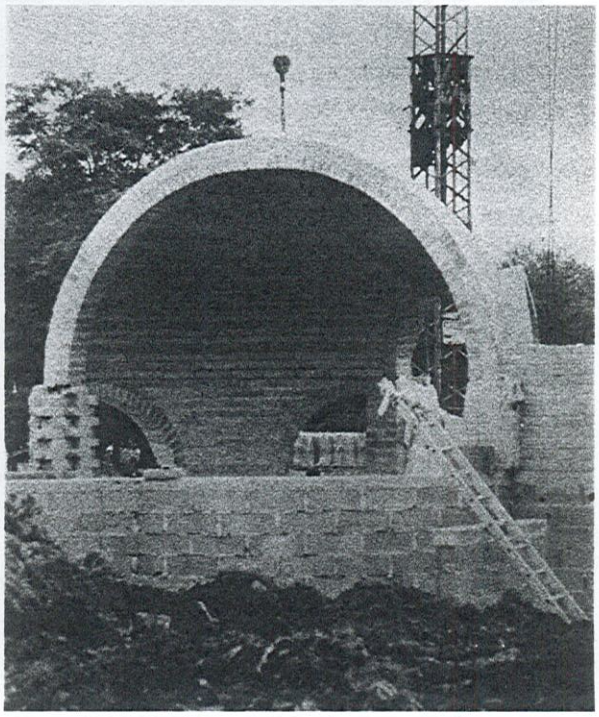
COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION FRANCE

Maison de l'architecte Joseph Colzani à Lavalette (Toulouse) : Construction d'une demi-coupole en partie élevée sur plan circulaire et sur pendentif ; utilisation d'un guide-bâton. Réalisation Joseph Colzani avec l'assistance technique de Thierry Joffroy, 1984.

1 - Coupole en construction.

2 - Coupole achevée.



Réf. 1 : Photographie JOFFROY, Th.
Réf. 2 : Photographie CRATerre.

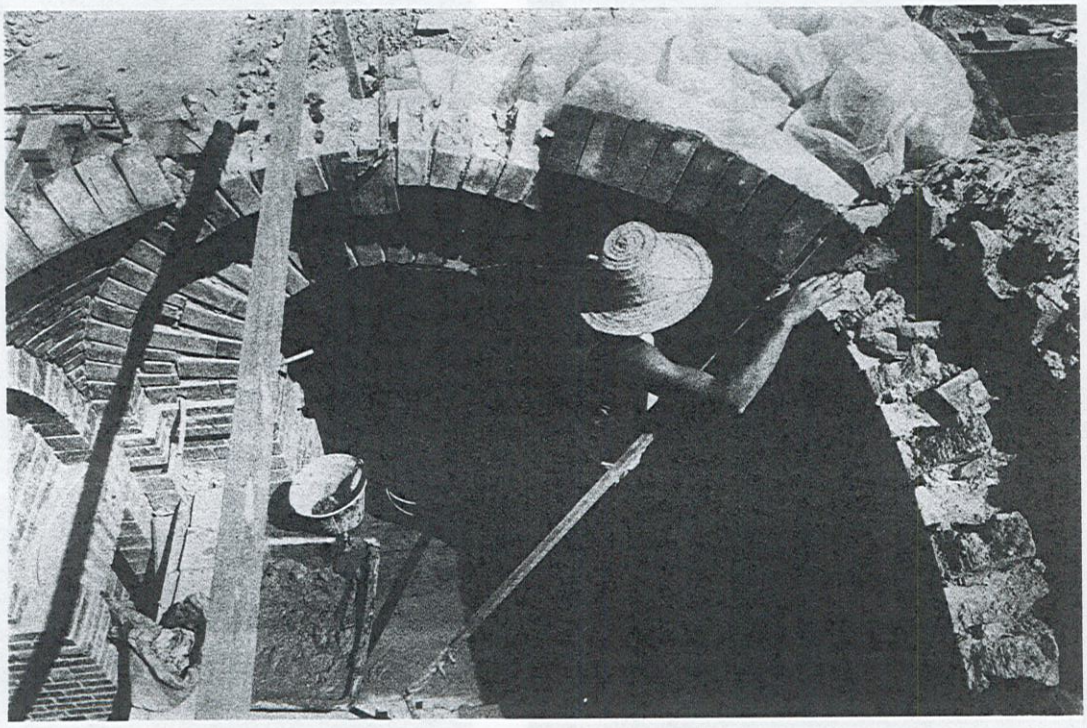
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

CONSTRUCTION FRANCE

Construction d'un ermitage à l'abbaye du Thoronet, Var, architectes Elie Mouyal et Nicolas Widmer, 1984-85 :

Utilisation d'un fil accroché à la verticale du centre de la coupole et relié au bâton-guide, permettant de réaliser des assises parfaitement planes. Construction par les stagiaires de l'ITAC.



Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

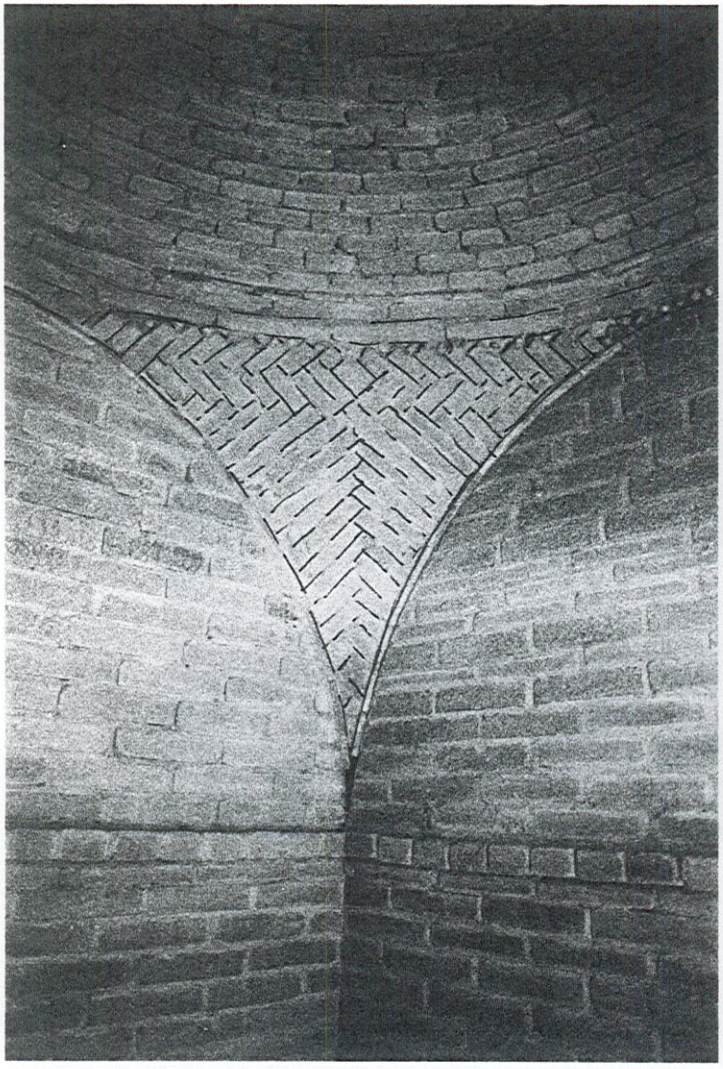
© CRATerre 86

COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE FRANCE

Logement des stagiaires du Centre de Terre de Lavalette, architecte Joseph Colzani, 1985 :

Deux façons originales d'appareiller les pendentifs.



Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

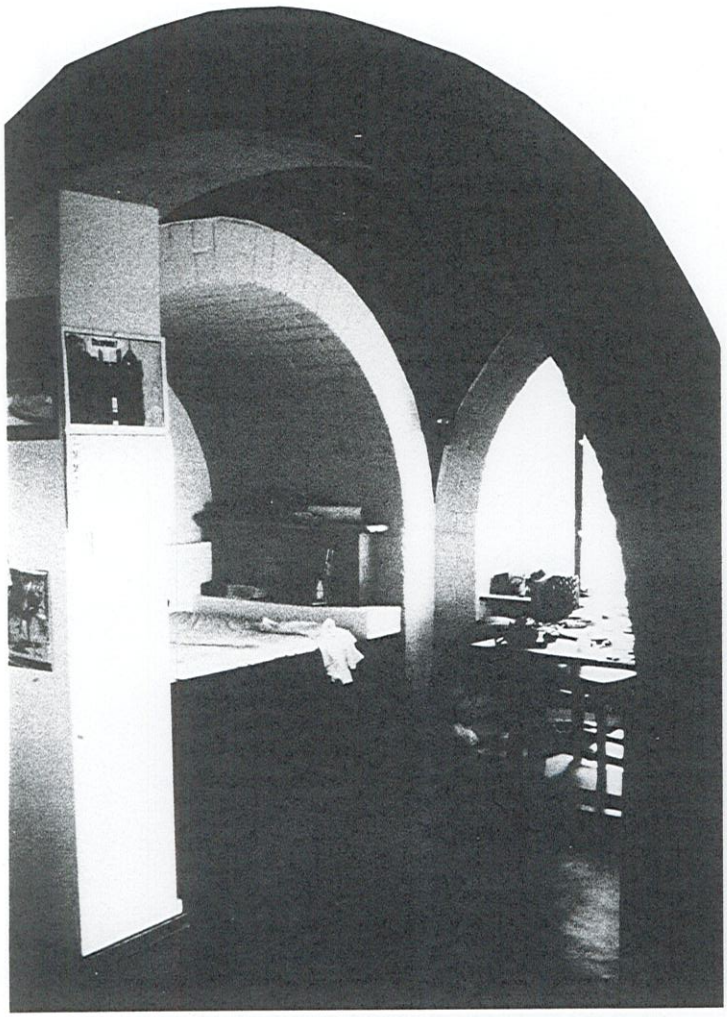
© CRATerre 86

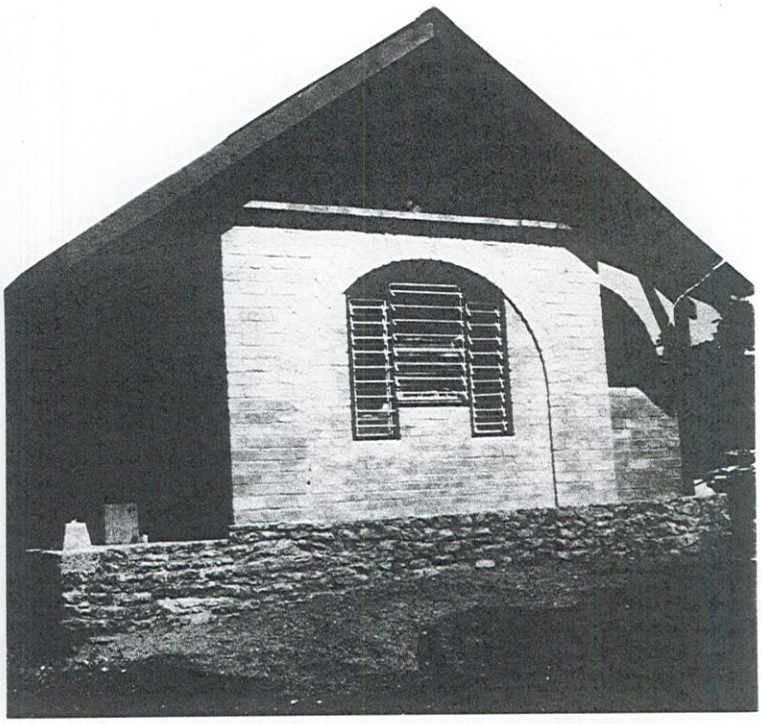
COUPOLES EN PENDENTIFS

TYPOLOGIE MAYOTTE

Logement expérimental à Mayotte, architecte Vincent Liétar :

Structure à base de voûtes pleins cintres et de coupoles en pendentifs, couverture en charpente bois et bac acier.





Réf. : Photographie ROLLET, P.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

La trompe est un élément de construction qui permet de passer d'un plan carré à un plan octogonal pour approcher le plan circulaire servant de base à l'élévation d'une coupole. L'utilisation de la trompe, sous forme de trompe d'angle, apparaît dès le début de notre ère (voir voûtes en trompes d'angles). Les formes de trompes sont très variées :

Trompe d'angle conique montée par tranches ou par encorbellement successifs d'arcs (archivolte), trompe en demi-coupole en pendentifs, en demi-voûte en arc de cloître, en demi-voûte d'arête, arc-trompe, corbeau, etc. Le cas particulier de la trompe en pendentif permet de retrouver un plan parfaitement circulaire qui engendre une coupole sur pendentifs, dénommée aussi coupole byzantine. Toutes les formes de coupoles tracées à partir de tous les types de génératrices peuvent être élevées sur des trompes. Le passage du plan carré au plan octogonal par l'intermédiaire de trompes permet notamment la construction de voûtes-coupoles en arc de cloître à huit pans. Le couple trompes-coupole permet une très grande variété de formes.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

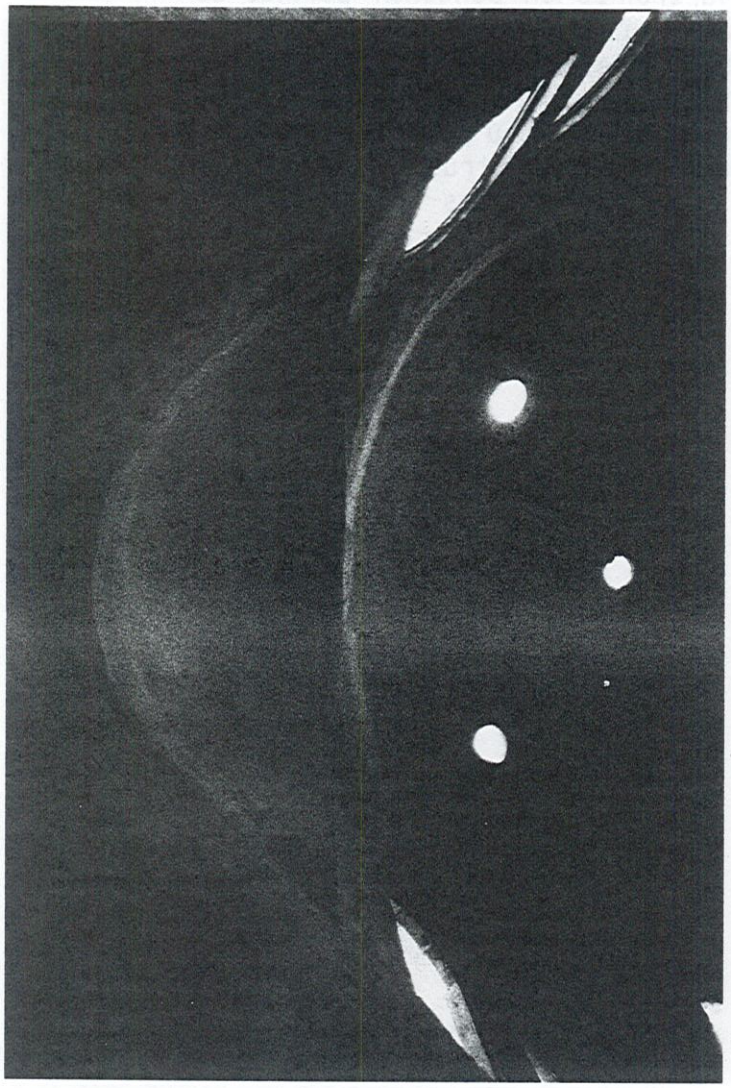
TYPOLOGIE
EGYPTE

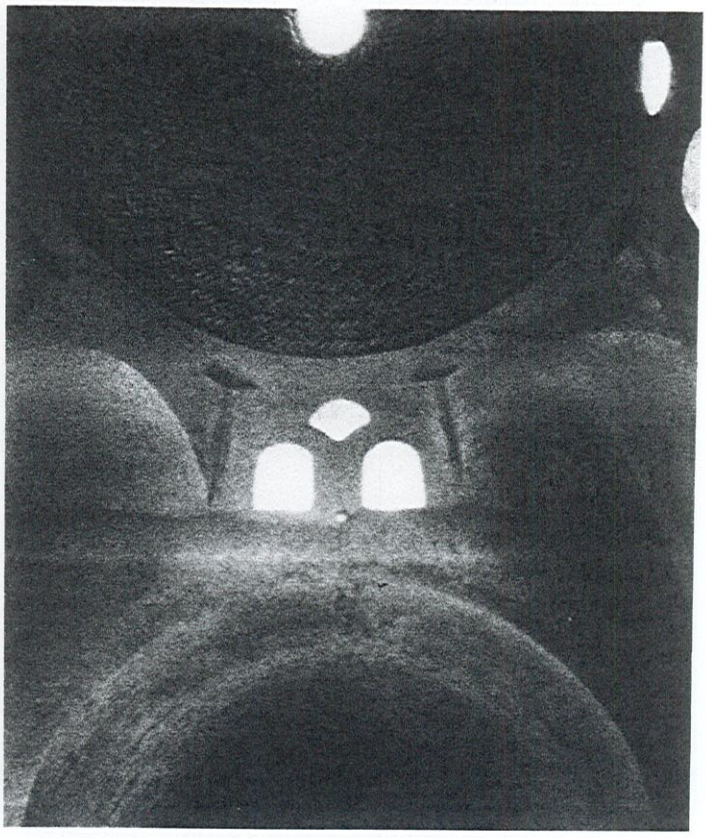
DIFFERENTES FORMES DE TROMPES.

Gourna, Egypte, architecte Hassan Fathy :

1 - Trompe en demi-cul-de-four.

2 - Trompe en demi-voûte en arc de cloître.





Réf. : Photographies CRATerre.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

DIFFERENTES FORMES DE TROMPES.

1 - Trompe perse.

2 - Trompe en demi-coupole en pendentifs.

3 - Trompe en corbeau.

4 - Trompe Moukarnas (Gourna).

Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984. Documentation CRATerre.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
AFGHANISTAN

DIFFERENTES FORMES DE TROMPES.

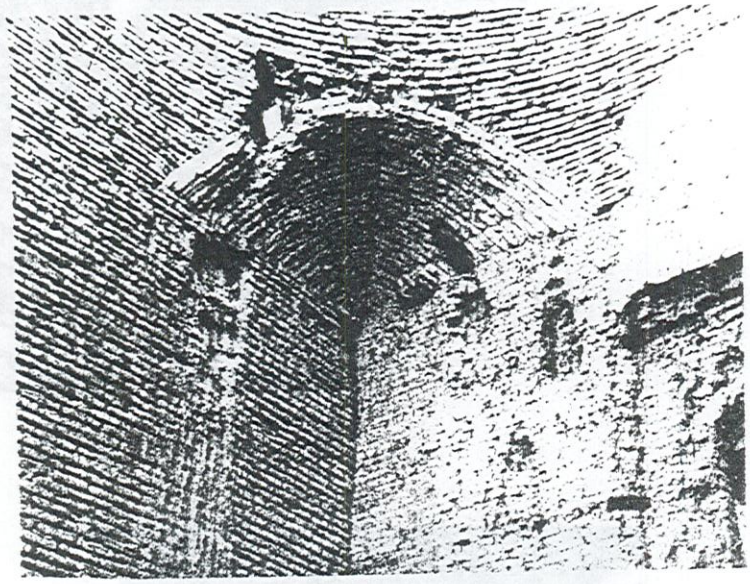
Lashkari Bazar, Afghanistan :

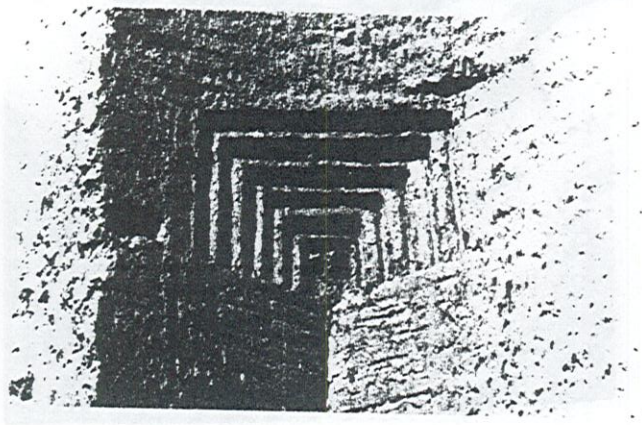
1 - Trompe perse.

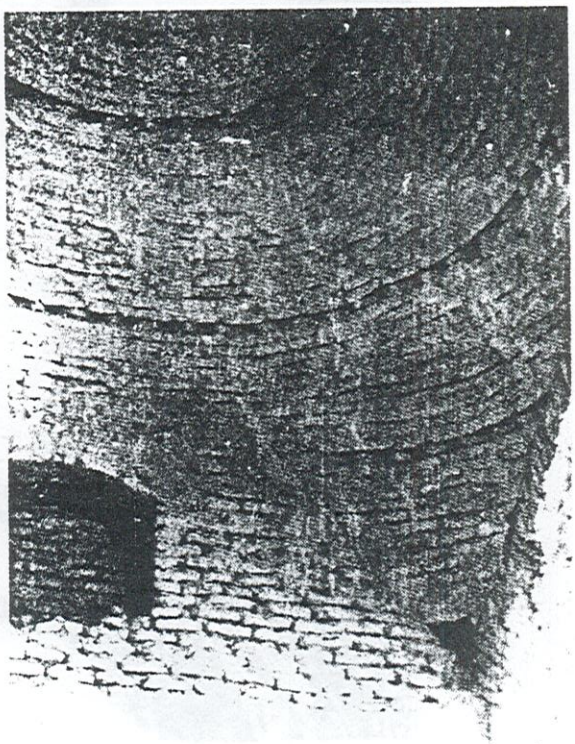
2 - Trompe en archivolte plate-bande.

Lokhi, Seistan, Afghanistan :

3 - Trompe en triangle turc.







Réf. : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

© CRATerre 86

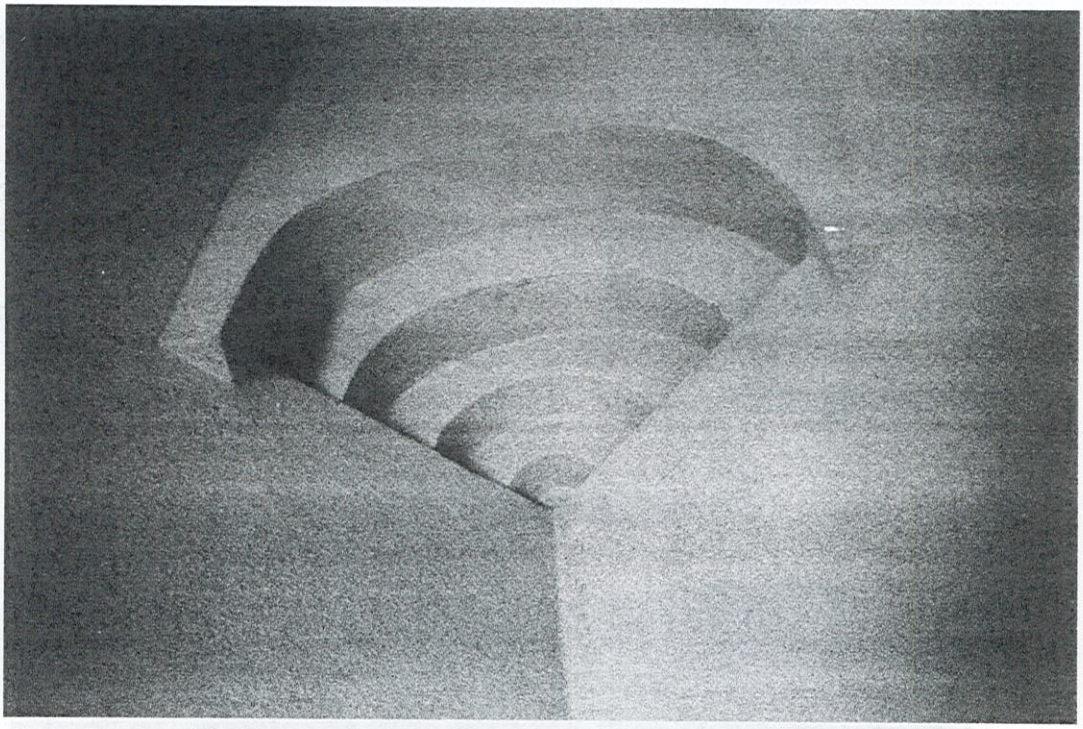
COUPOLES SUR TROMPES

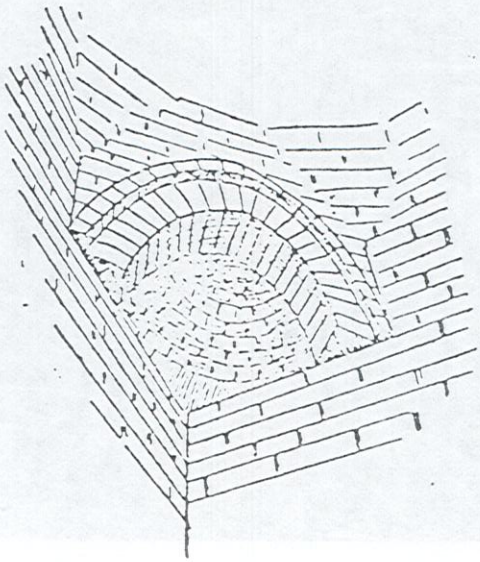
TYPOLOGIE
MAROC

DIFFERENTES FORMES DE TROMPES.

1 - Maroc, trompe en archivolte plein cintre.

2 - Trompe en arc + remplissage.





Réf. : Photographie JOFFROY, Th. Documentation CRATerre.

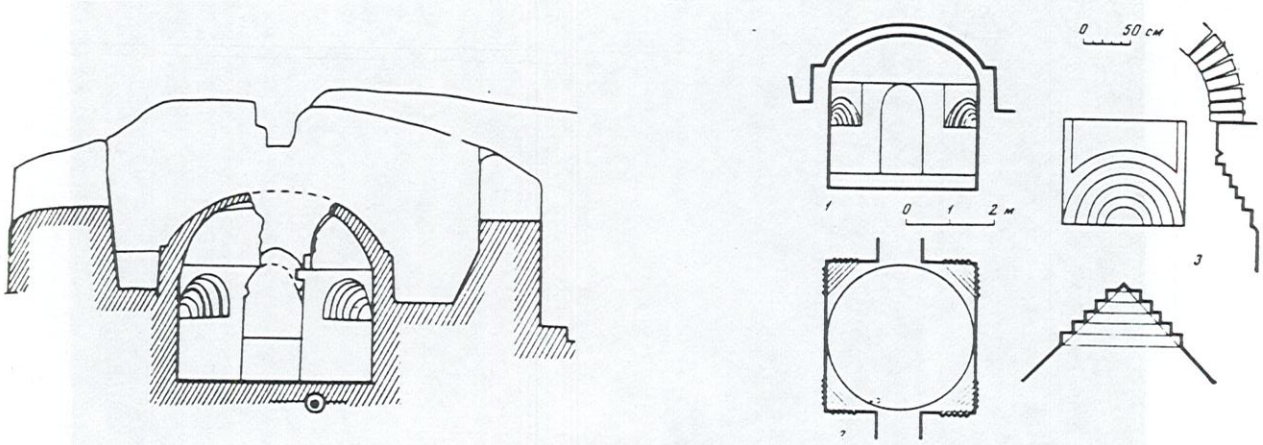
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
AFGHANISTAN

1 - Sanctuaire boudhique de Dilberjeen Tepe, Afghanistan, daté du 2ème au 4 ème siècle ap. J.C. : Coupole en génératrice surbaissée, construite en assises tronconiques clavées. Les trompes sont constituées de plusieurs arcs en encorbellement successifs, élevés sans cintre (d'après Kruglikova, Sarianidi, Pugachenkova, 1976, 1977).

2 - Mosquée de Tashkourgan, Afghanistan : Coupoles sur trompes surmontées de lanterneaux.



Réf. 1 : BESENVAL, R. ; Technologie de la voûte dans l'Orient Ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.
Réf. 2 : MICHAUD, R. et S. ; Caravanes de Tartarie, Ed. Chêne, Paris, 1977.

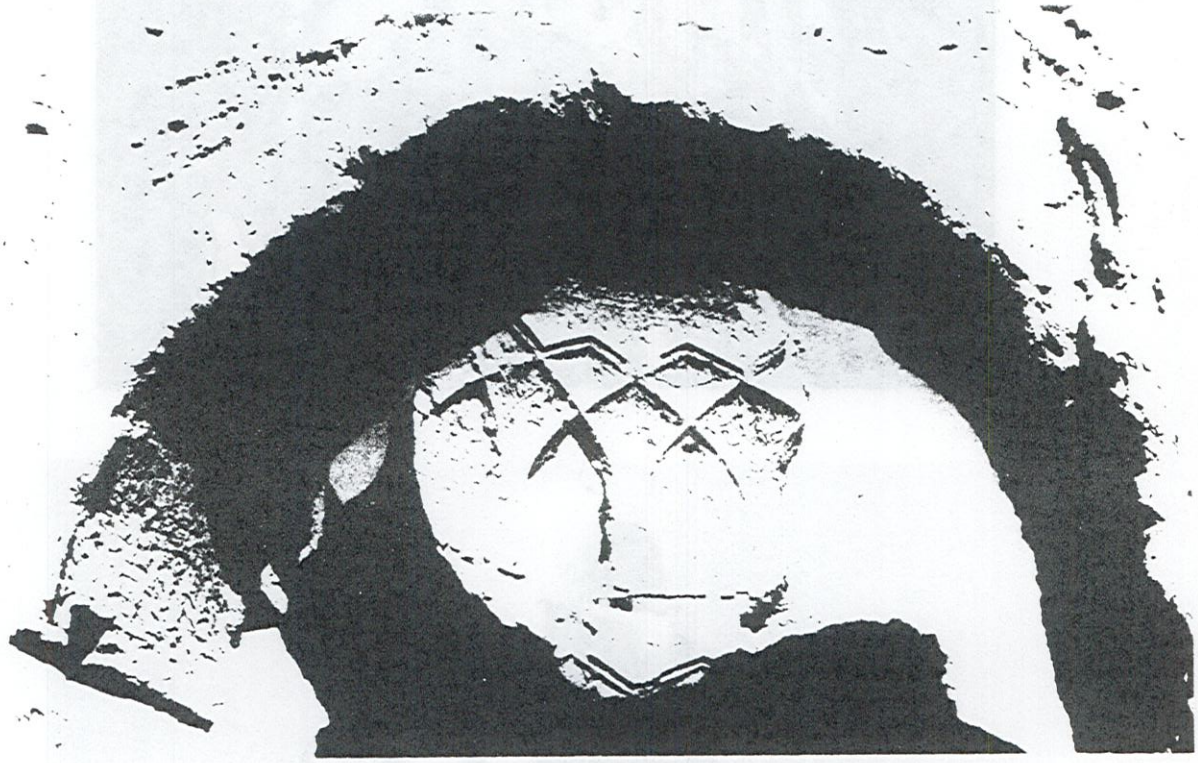
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
IRAN

Coupoles sur trompes-pendentifs réticulés :

Yazo, Iran, lieu de pélerinage du 14ème siècle.



Réf. : GALDIERI, E. ; Le Meraviglie dell'Architettura in terra cruda, Ed. Laterza, Rome, 1982.

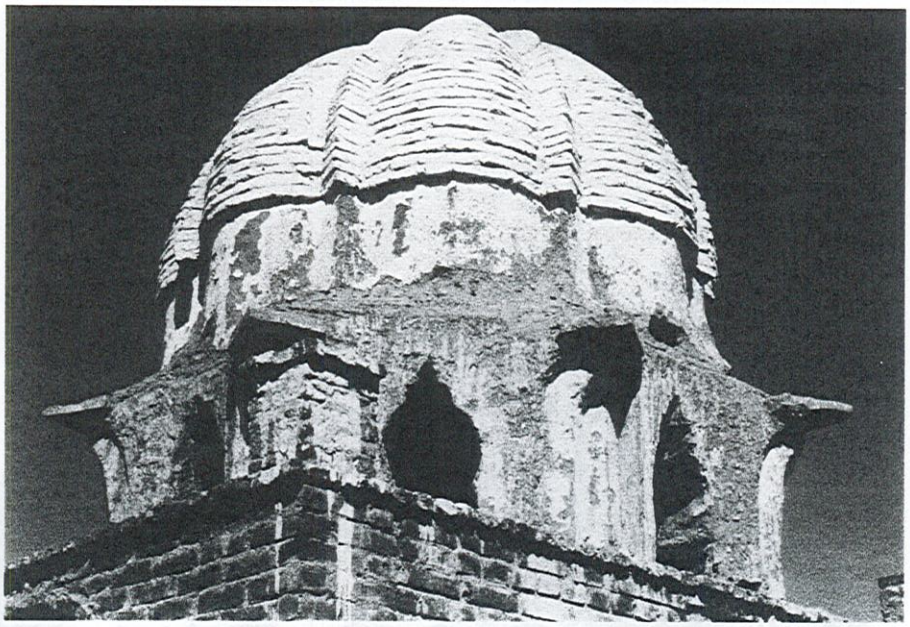
© CRATerre 86

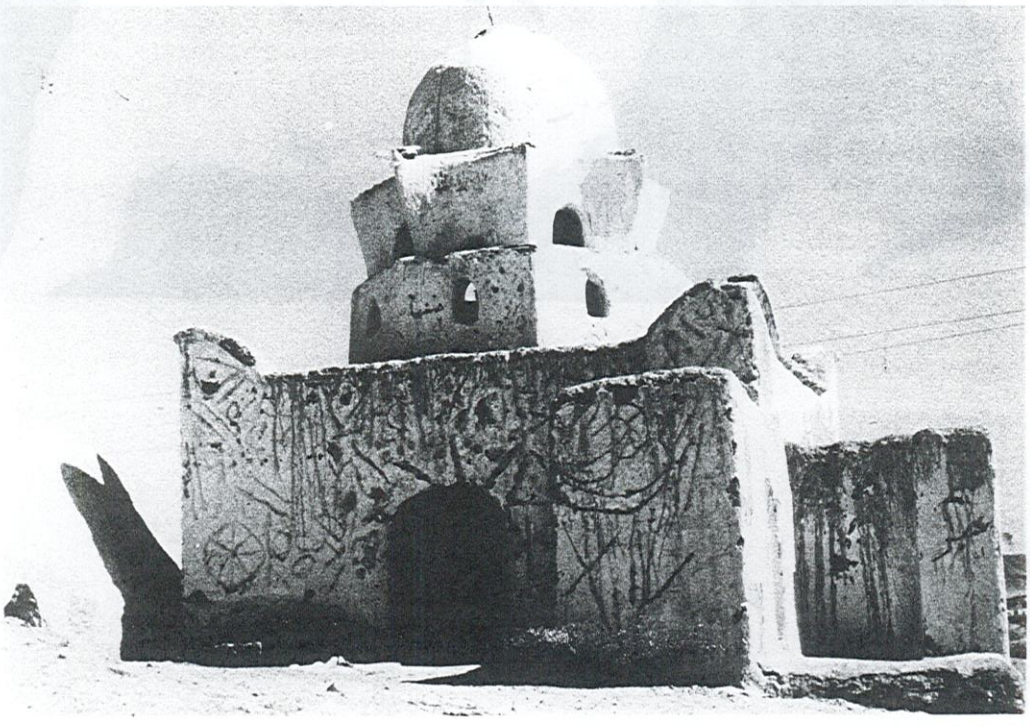
COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

Nécropole fatimide à Assouan, Egypte, Xème siècle ap. J.C. :

Coupoles sur niveaux successifs de trompes qui témoignent d'une étonnante maîtrise des bâtisseurs égyptiens.





Réf. : Photographie CRATerre.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

Nécropole fatimide à Assouan, Egypte, Xème siècle ap. J.C. :

Trompe perse, selon la technique sassanide.

Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

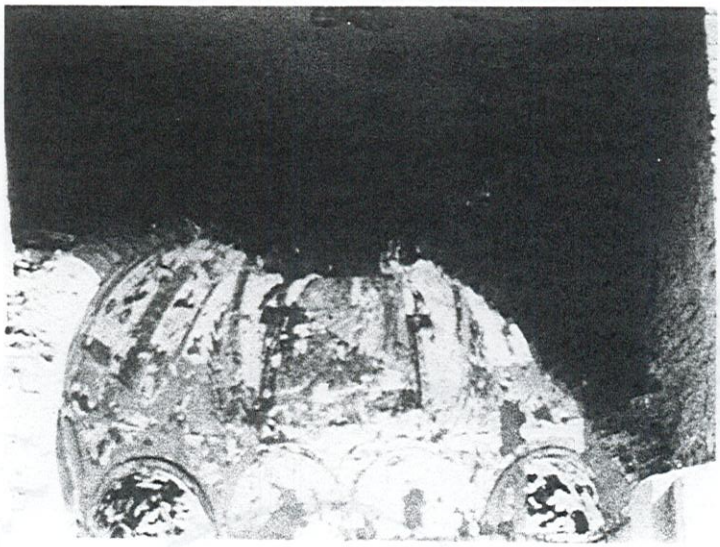
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE EGYPTE

1 - Monastère de Saint Siméon, près d'Assouan, Egypte, Xème siècle ap. J.C. : Passage d'une coupole sur trompes à une surface horizontale.

2 - Succession de coupoles sur trompes dans une école, près d'Assouan.



Réf. : Photographie CRATerre.

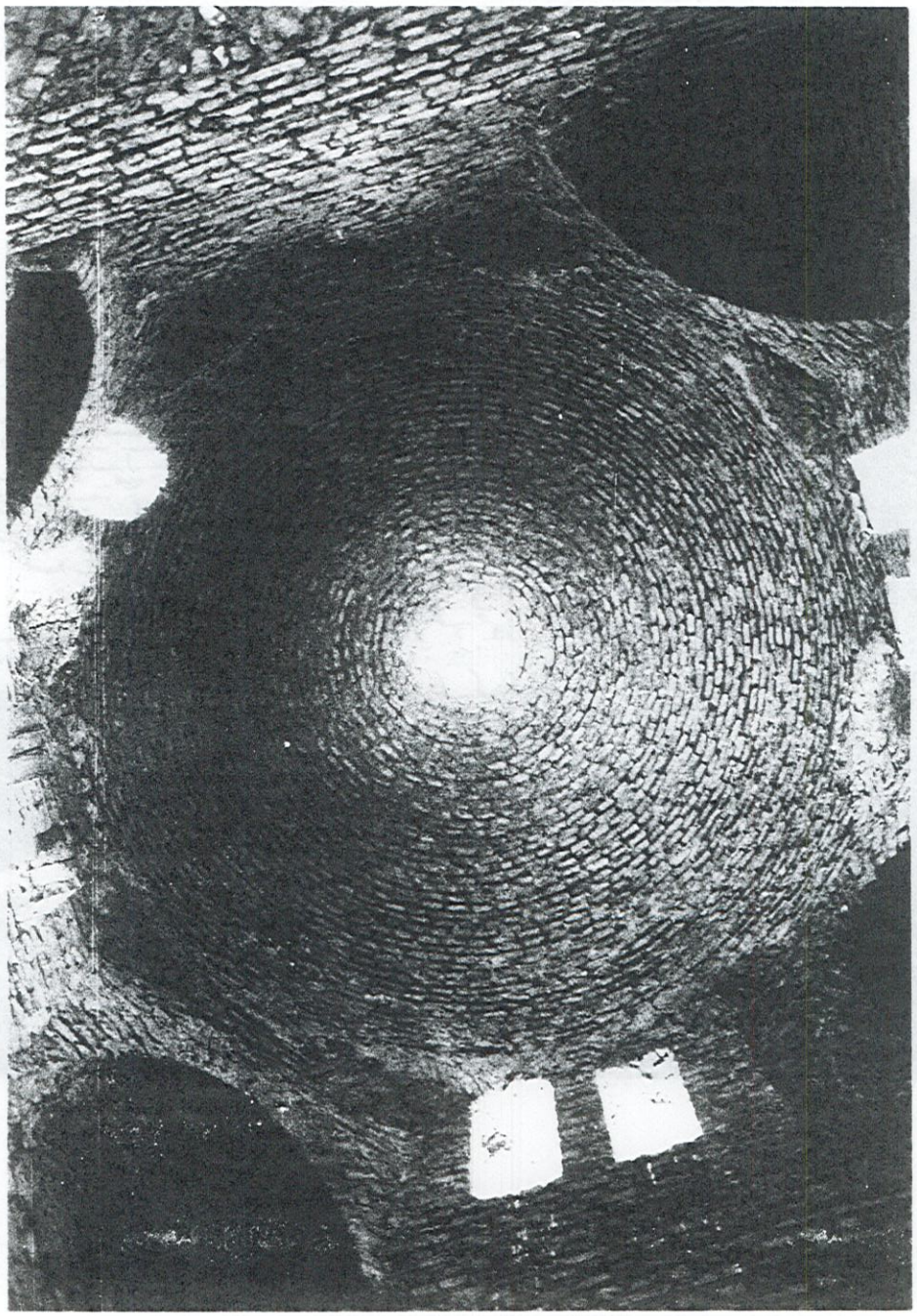
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE EGYPTE

Baris, Egypte, architecte Hassan Fathy :

Le passage du plan carré au plan circulaire se fait par une double série de trompes. Une première série de quatre demi-coupoles sur pendentifs et une deuxième série de huit petites trompes coupant les angles du plan octogonal et réalisées en assises courbes en encorbellement.



Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

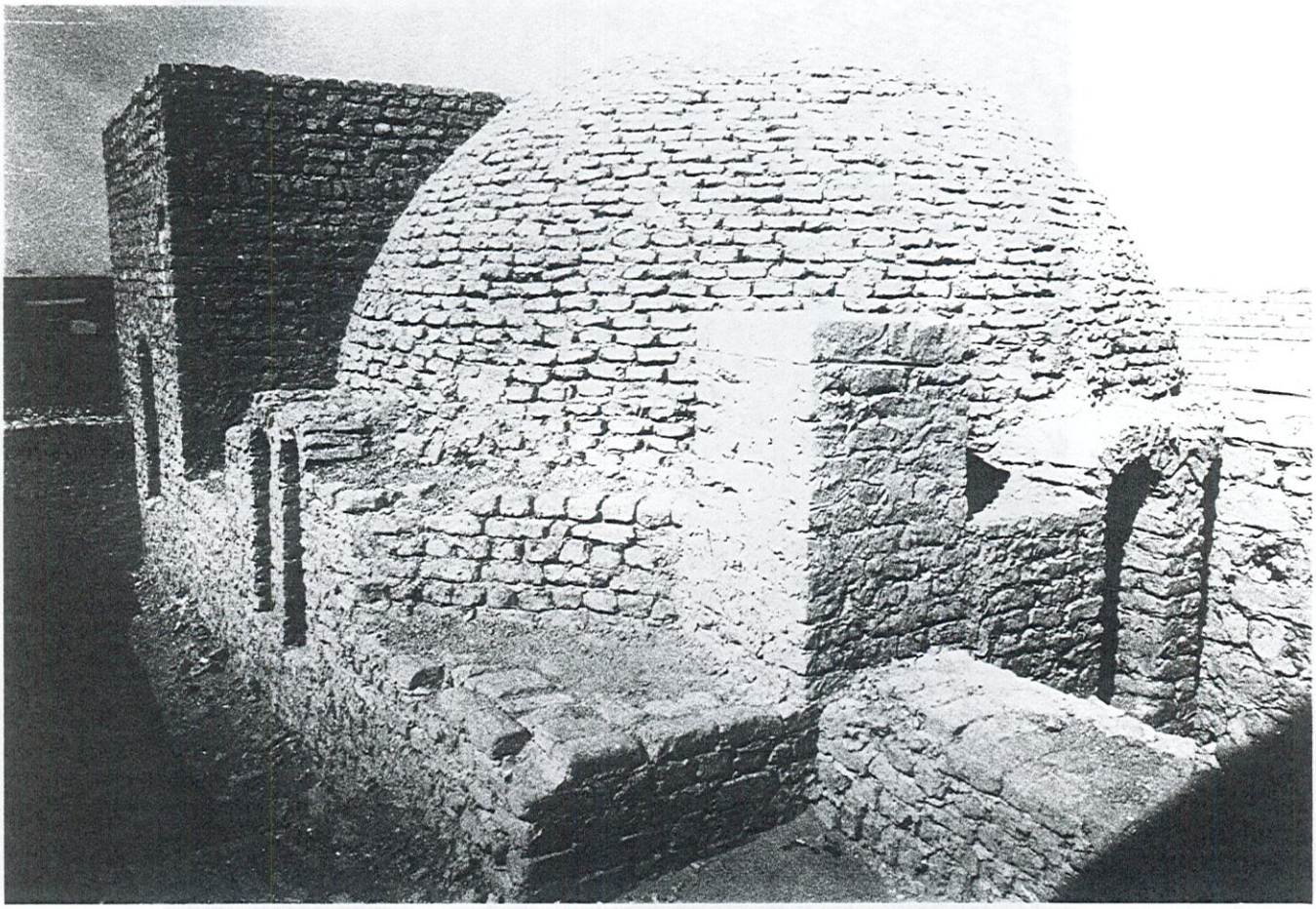
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

Baris, Egypte, architecte Hassan Fathy :

Vue extérieure de la coupole sur trompe volontairement surélevée.



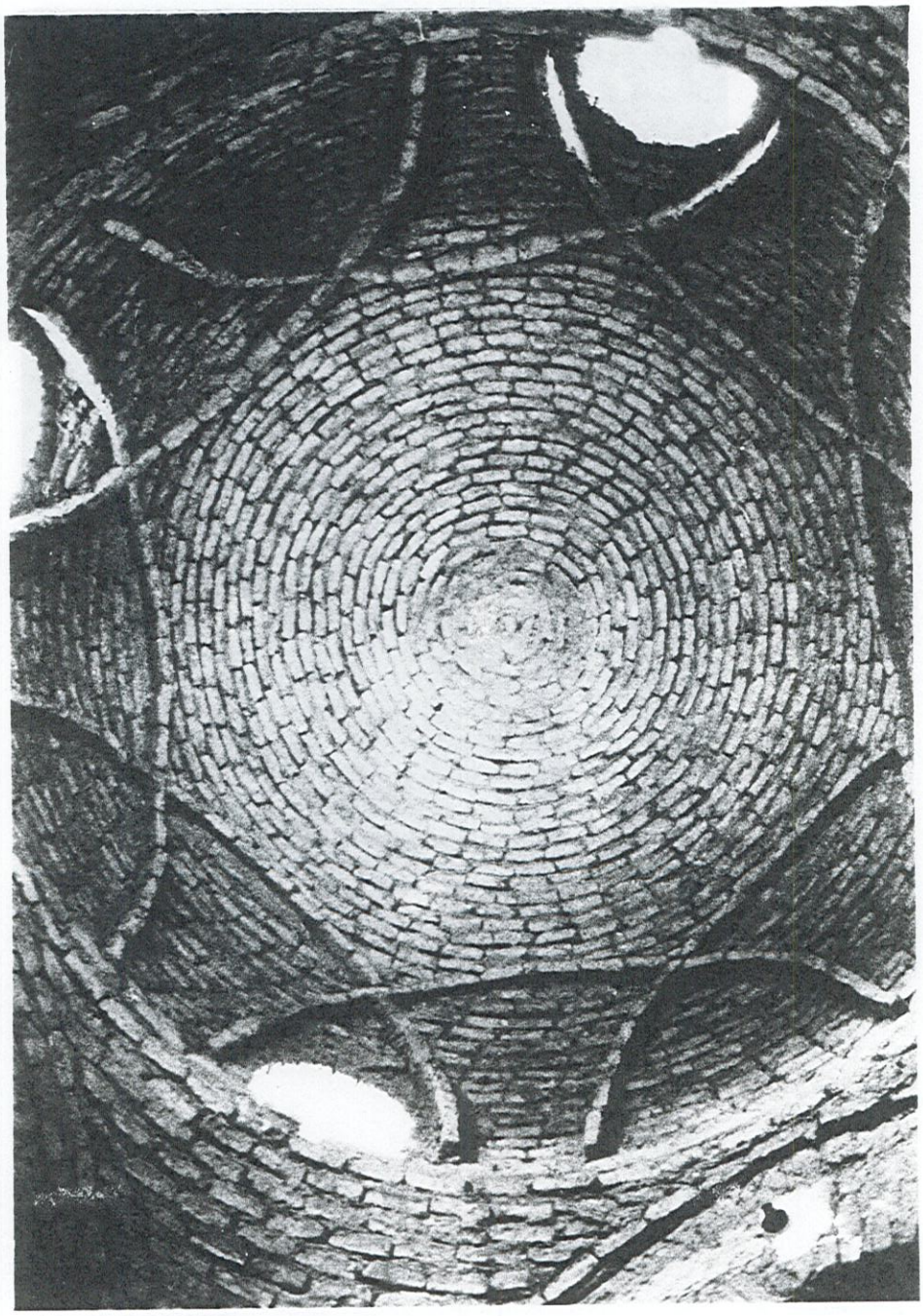
Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

Louxor, Egypte, villa édifiée en 1980, Conçue par les architectes Olivier Sednaoui et D. Sims : Coupole sur trompes-pendentifs ou coupole byzantine. Le passage du plan carré au plan circulaire se fait par l'intermédiaire de pendentifs. Dès la jonction des pendentifs, le centre de la pige de guidage est rehaussé afin de construire une coupole en demi-sphère. La coupole est ajoutée en sa base par des arcs en plein cintre. Le décor à l'intrados n'est dû qu'à un jeu de l'appareillage.



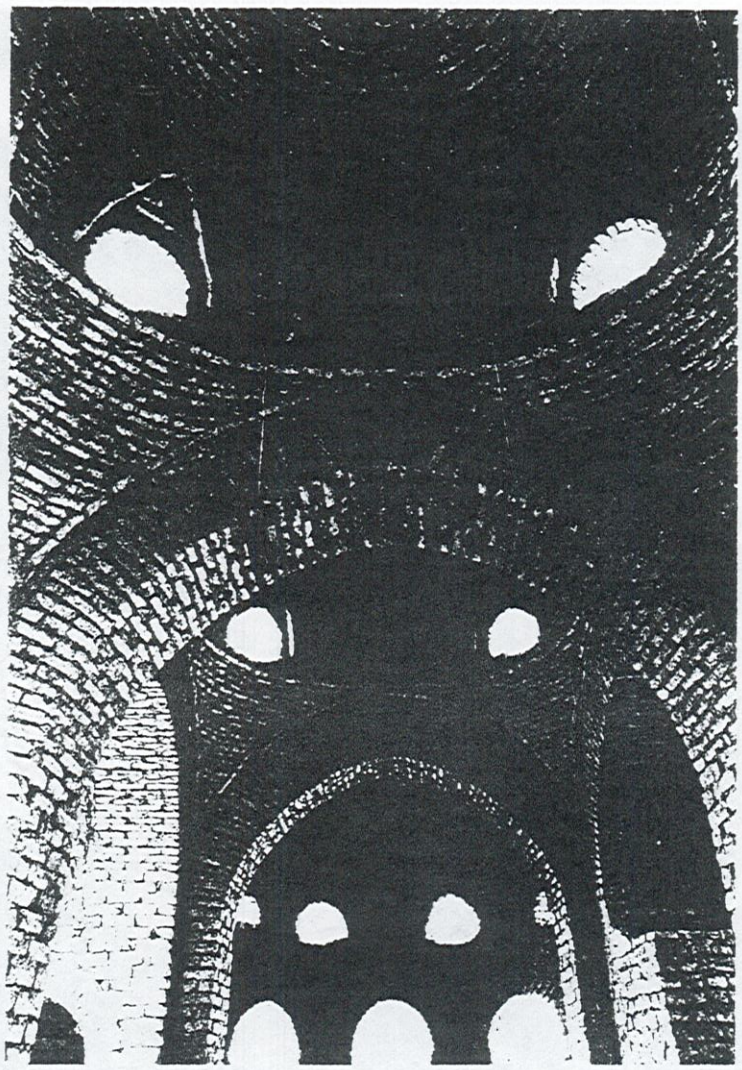
Réf. : Photographie MOUSTAADER, A. ; mission CRATerre en Egypte, 1984.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
EGYPTE

Louxor, Egypte, villa édifiée en 1980, conçue par les architectes Olivier Sednaoui et D. Sims : Succession de coupoles byzantines sur trompes-pendentifs.



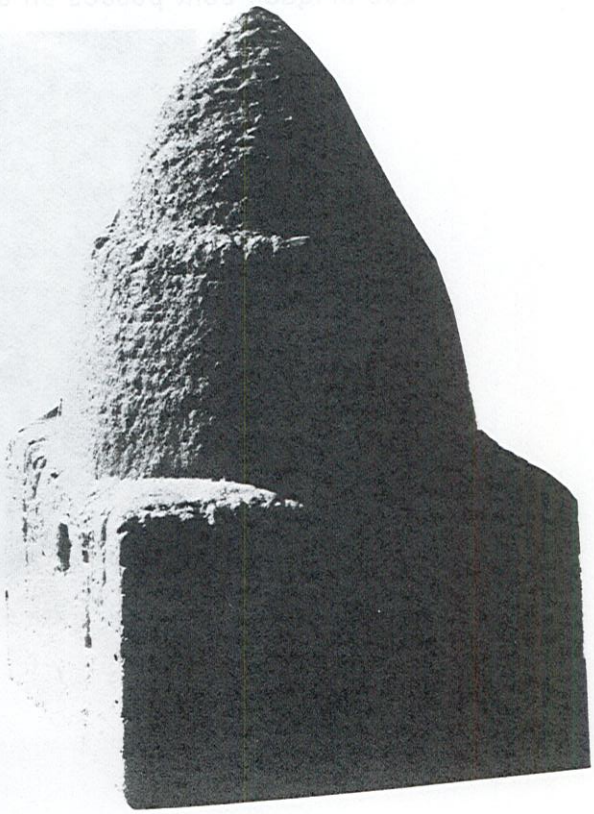
Réf. : DETHIER, J. ; Des Architectures de Terre, catalogue d'exposition du CCI, Paris, 1982.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
MAROC

Région d'Erfoud, sud du Maroc. Marabout à coupole en deux étages ; les trompes sont des pièces de bois disposées en corbeaux. Les briques sont en encorbellement.



Réf. : Photographie JOFFROY, Th.

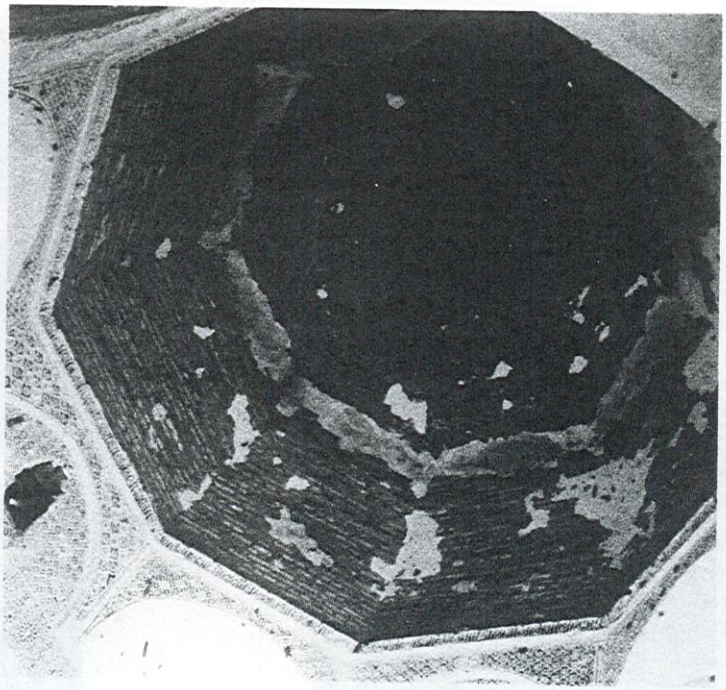
© CRATerre 86

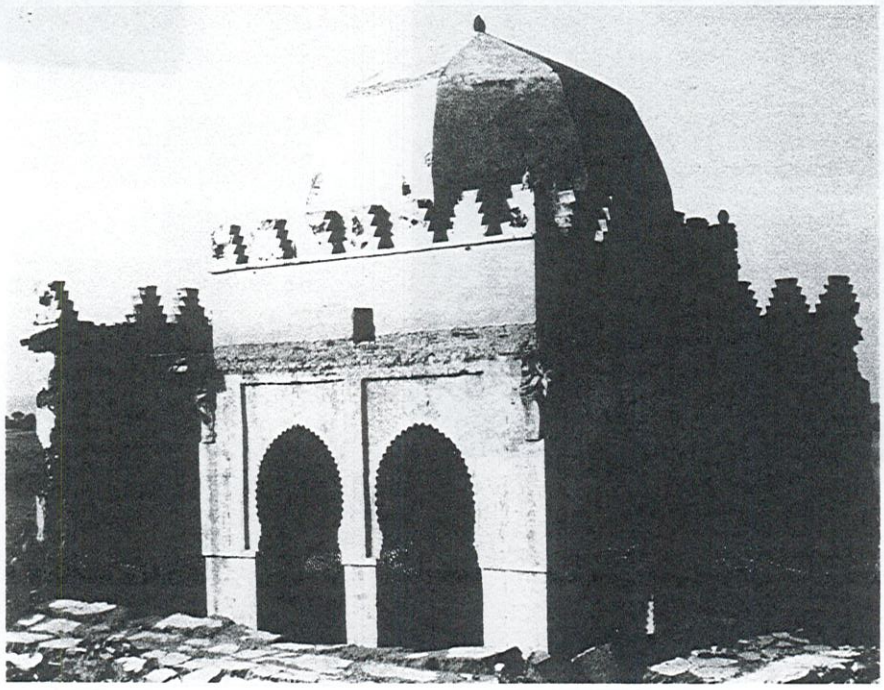
COUPOLES SUR TROMPES

TYPOLOGIE
MAROC

Marabout dans la région de Zagora, sud du Maroc :

Les trompes sont des demi-coupoles sur pendentifs qui ramènent la base de la coupole à un plan octogonal. Forme typique de coupoles d'Afrique du Nord à plusieurs niveaux de facettes très légèrement bombées, résultant de la superposition de systèmes en arc de cloître à génératrices différentes. Les briques sont posées en assises tronc-pyramidales.





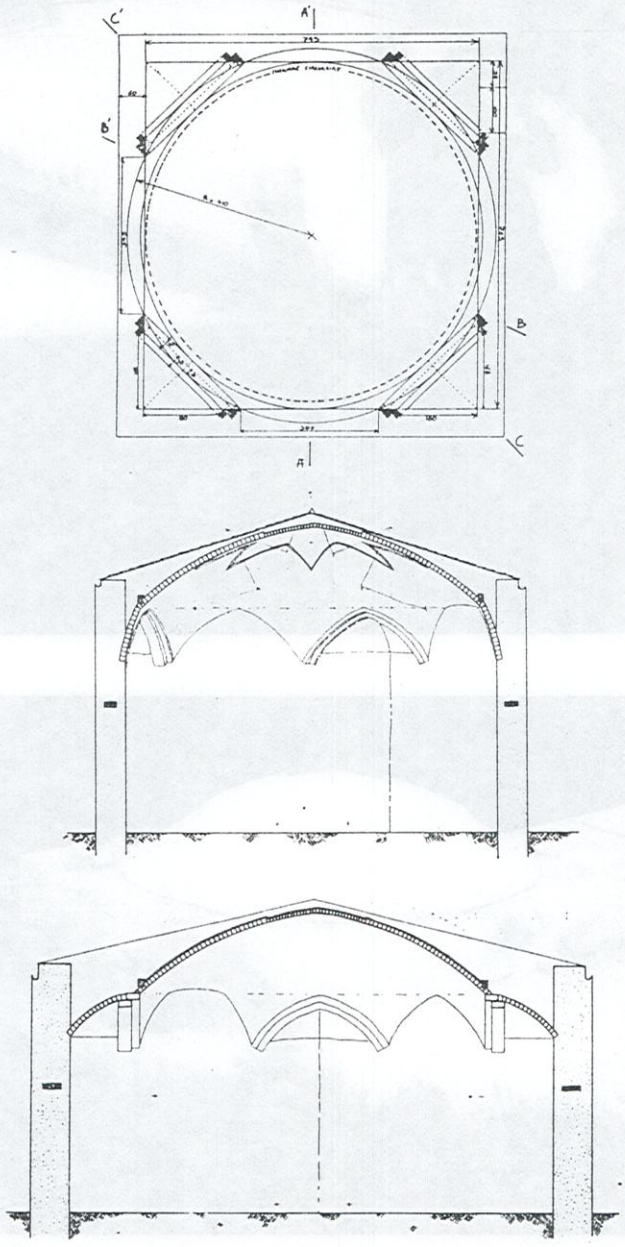
Réf. : Photographies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

CONSTRUCTION FRANCE

Maison de M. Plantier à Lumio, Corse, constructeur Christian Moretti avec Thierry Joffroy et Pascal Baeteman, 1984. L'originalité de cette coupole de 8,20 m de diamètre réside dans le passage du plan carré au plan circulaire par l'intermédiaire de trompes-arcs puis de pendentifs reposant sur ces trompes et des arcs-sommiers taillés dans les murs de pisé. La coupole est surbaissée dès la jonction des pendentifs afin de réduire sa hauteur. La couverture est en terre damée, en pyramide à quatre pentes (pavillon) couverte de tuiles maçonnées. Epaisseur de la coupole : 15 cm ; construction en blocs de terre comprimée stabilisée à 7 % de chaux.



T. JOFFROY

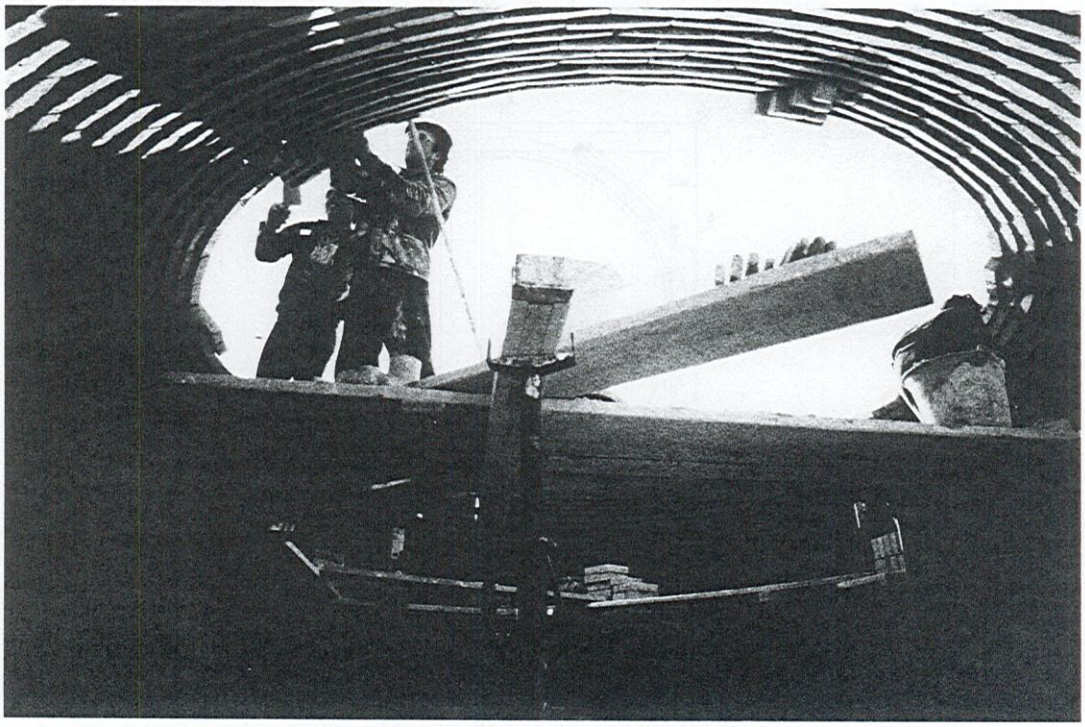
Réf. : Plan et coupes, JOFFROY, Th.

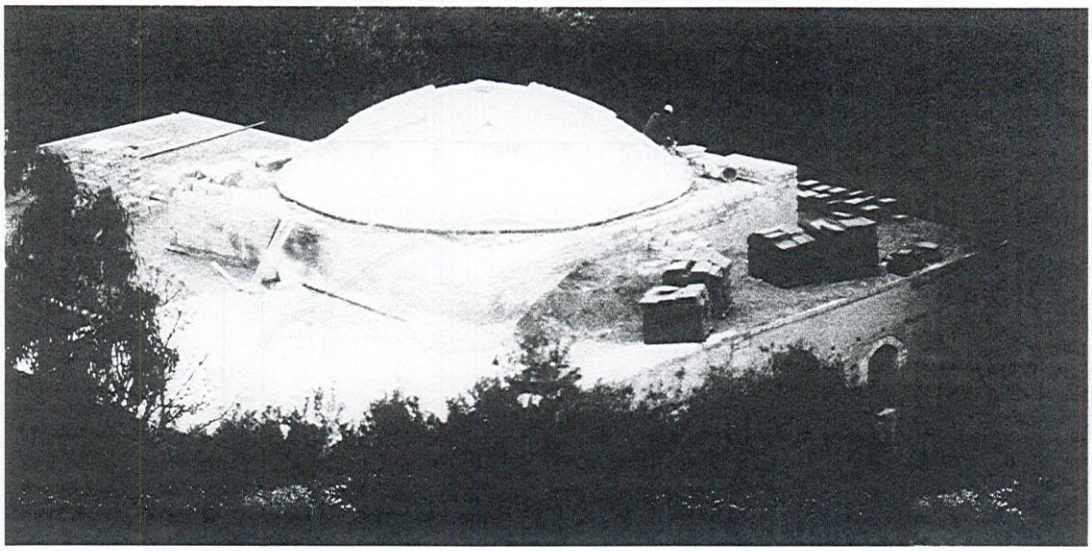
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

CONSTRUCTION
FRANCE

Maison de M. Plantier à Lumio, Corse , 1984, Constructeur Christian Moretti, avec Pascal Baeteman et Thierry Joffroy : Elévation de la coupole à l'aide d'une pige métallique ; réalisation d'un décor étoilé par le jeu de l'appareillage des blocs de terre.





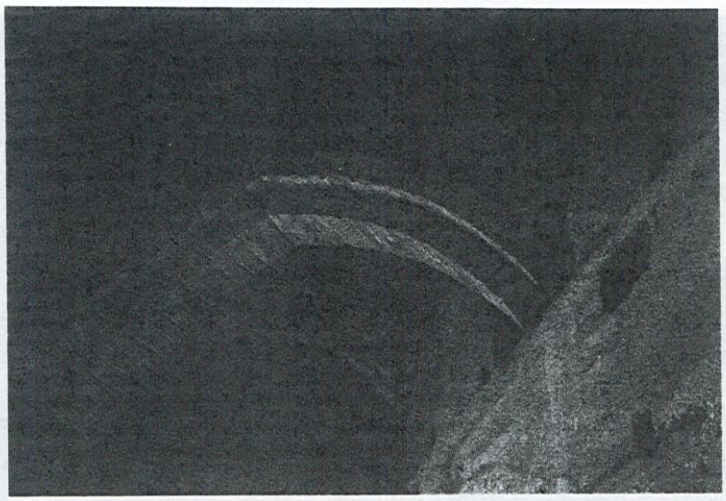
Réf. : Photographies JOFFROY, Th.

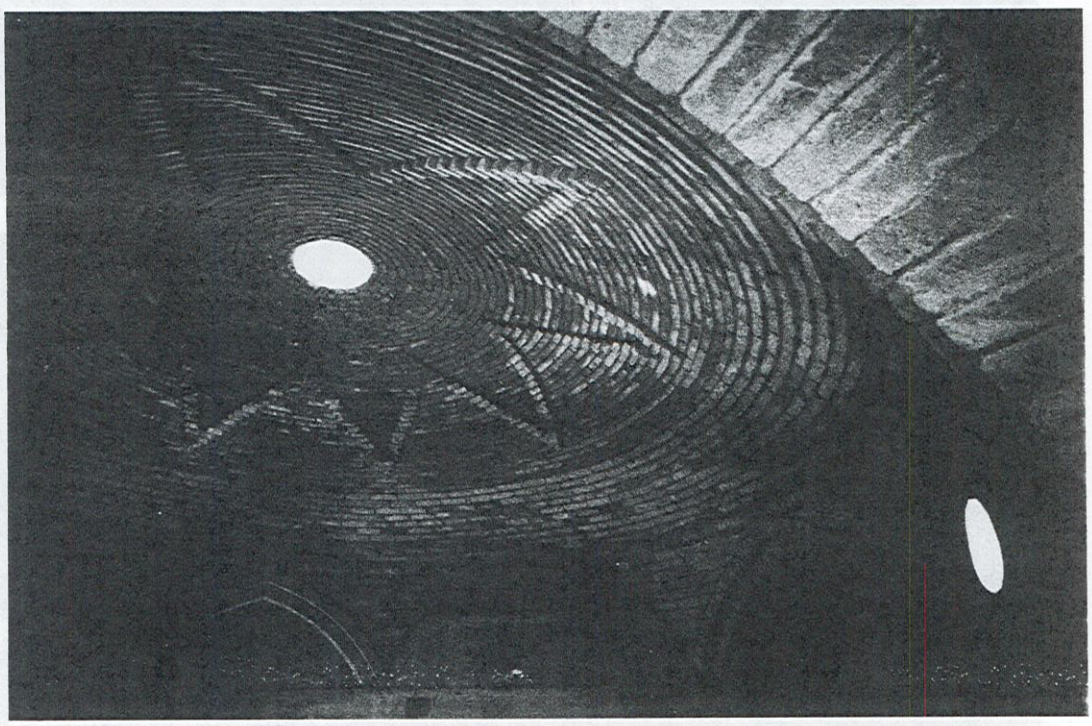
© CRATerre 86

COUPOLES SUR TROMPES

CONSTRUCTION
FRANCE

Maison de M. Plantier, à Lumio, Corse, 1984, constructeur Christian Moretti, avec Thierry Joffroy et Pascal Baeteman : Vues intérieures de la coupole, arcs-trompes et arcs-sommiers en pisé, détail du décor en étoile. Détail d'un arc-trompe à deux rouleaux, de forme ogivale et remplissage de la trompe en demi-voûte d'arête surbaissée sur arcs-sommiers en pisé.





Réf. : Photographies JOFFROY, Th.

© CRATerre 86

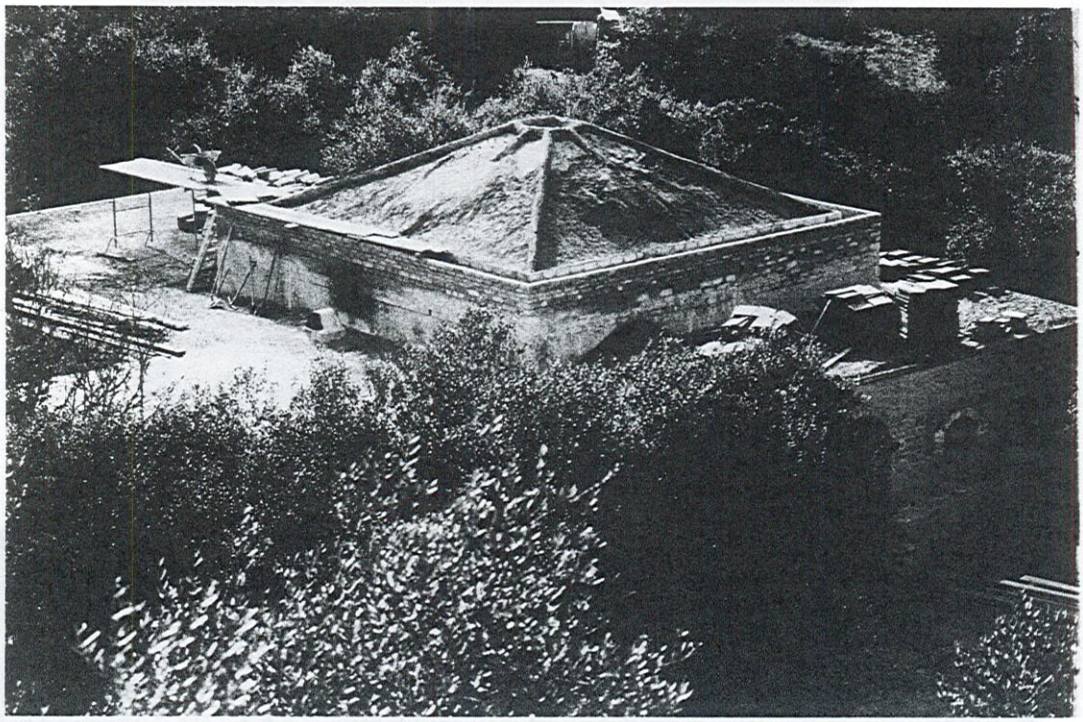
COUPOLES SUR TROMPES

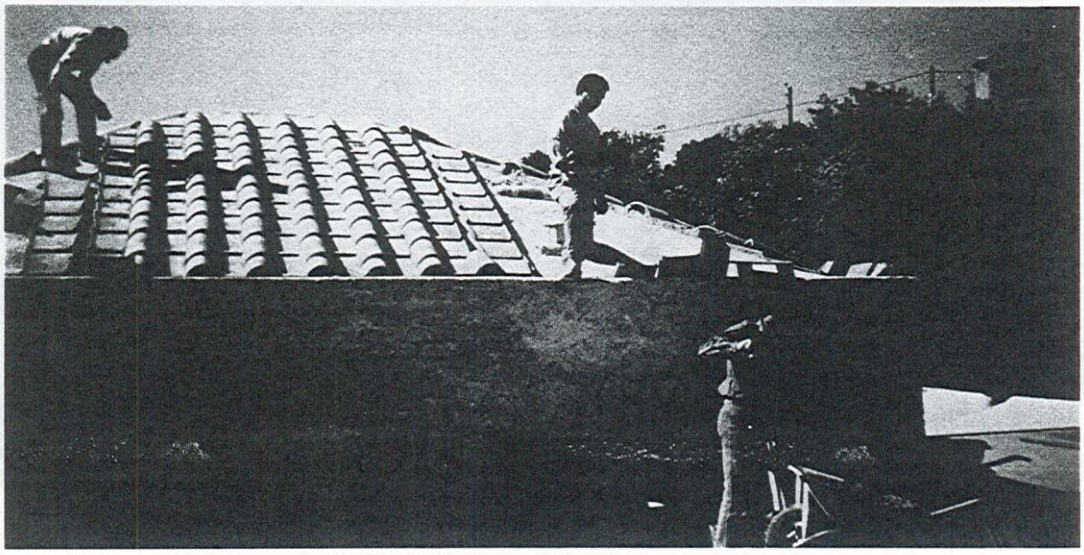
CONSTRUCTION FRANCE

Maison de M. Plantier à Lumio, Corse, 1984, constructeur Christian Moretti, avec Thierry Joffroy et Pascal Baeteman.

1 - Passage de la coupole à la toiture pyramidale.

2 - Réalisation de la couverture en tuiles bâties au mortier de chaux sur une chape de chaux.





Réf. : Photographies BAETEMAN, A.

© CRATerre 86

FLECHES EN TERRE

Les flèches en terre, généralement construite en bauge ou en façonnage direct, parfois en adobe, sont caractéristiques de l'architecture musulmane des mosquées d'Afrique ou de pays du Moyen-Orient. La construction des flèches-minarets en terre se fait par encorbellements très faibles sur la base de plans carrés, rectangulaires ou circulaires. Les génératrices sont très élancées et accusent la hauteur des flèches.

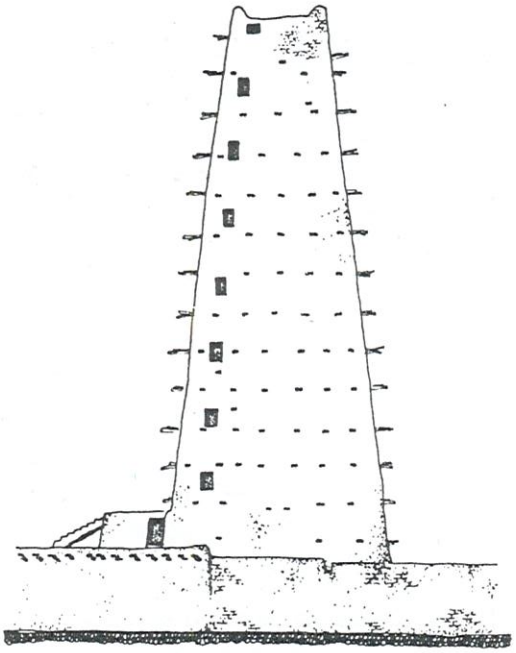
© CRATerre 86

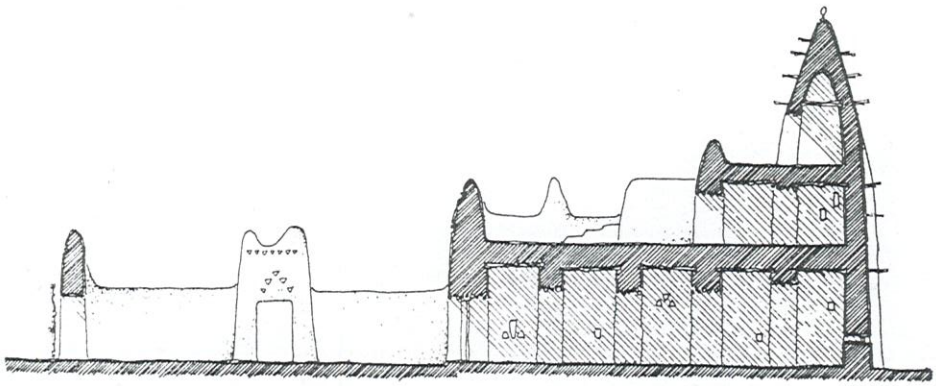
FLECHES EN TERRE

TYPOLOGIE
NIGER ET MALI

1 – Minaret de la mosquée d'Agades, Niger.

2 – Coupe sur la mosquée de Leo, Mali.





Réf. : AGO, F. ; Moschee in adobe, Ed. Kappa, Rome, 1982.

© CRATerre 86

FLECHES EN TERRE

TYPOLOGIE
BURKINA FASO

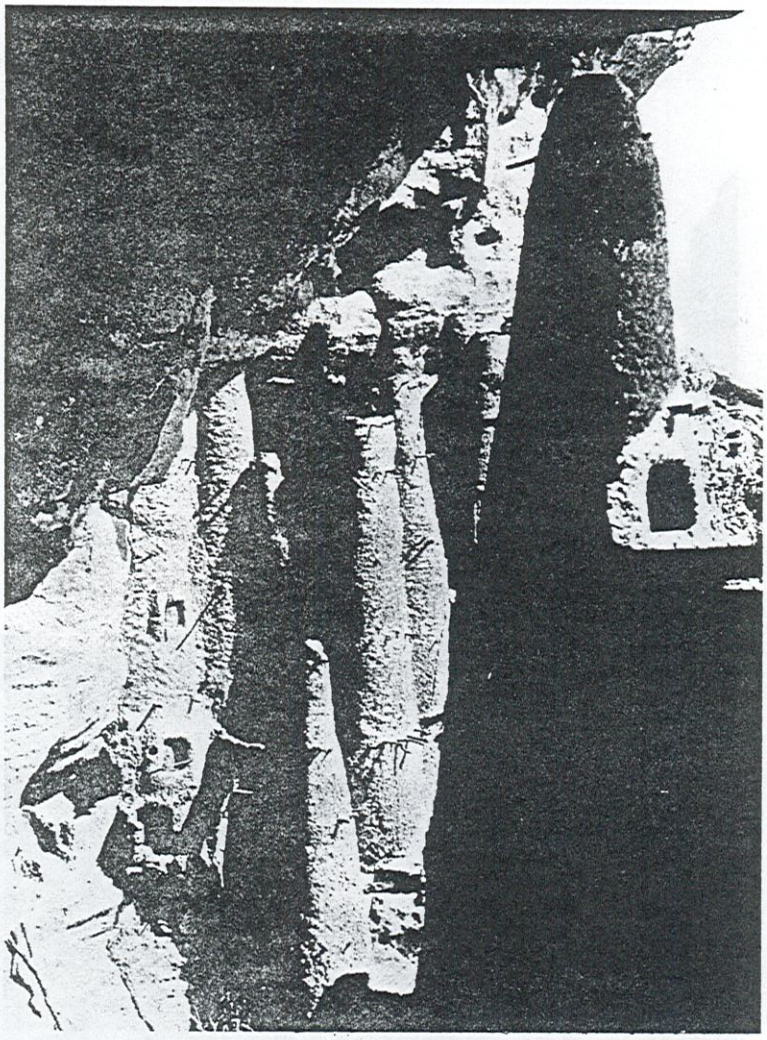
Mosquée de Ouagadougou, Burkina Faso :

Les troncs de bois servent à la fois de chaînage et d'échaffaudages pour la construction et les réfections périodiques.

Réf. : Photographie NOURAULT, J C. ; Ed. ATTIE, J C. ; Ouagadougou.

© CRATerre 86

Grenier de l'ethnie Dogon au Mali.



Réf. : GUIDONI, E. ; Architecture Primitive, Ed. Berger Levrault, Paris, 1980.

© CRATerre 86

VOUTES ET COUPOLES COMPOSITES

On regroupe sous l'intitulé de "voûtes et coupoles composites" des constructions qui associent à la terre un autre matériau à fonction structurale. Ainsi, cette catégorie sera illustrée par :

- Les voûtes en terre armée de bois avec l'exemple des "Sorayes" de l'ethnie Hausa. Ces voûtes dont la découverte est relativement récente (XIXe) sont d'origine inconnue. Elles s'apparentent aux voûtes réticulées.

- Des coupoles en sacs de terre disposés en encorbellement : réalisation expérimentale du Gesamthochschule de Kassel (GHK), autour des recherches et travaux du Pr. Doctor Ing, Gernot Minke.

- Des planchers et toitures en entrevous de briques de terre ou d'adobe, disposés entre des solives en bois ou en béton armé (poutrelles).

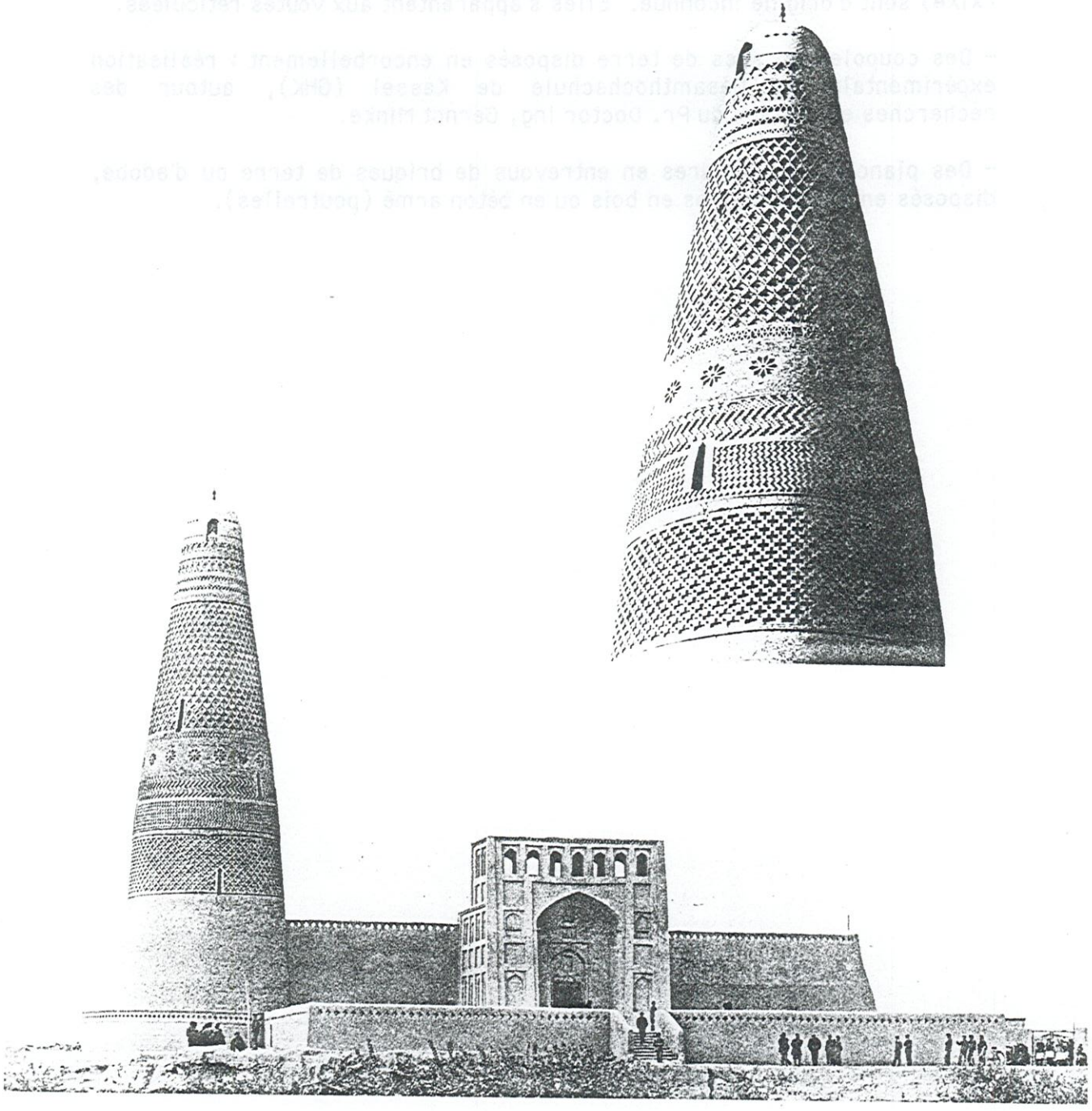
© CRATerre 86

FLECHES EN TERRE

TYPOLOGIE
CHINE

Mosquée Amin, région de Turfan, Chine.

Construction en adobe dont le minaret, décoré à la brique cuite s'élève jusqu'à 44 mètres de hauteur.



Réf. : Photographie dans MIMAR, n° 3.

© CRATerre 86

VOUTES EN TERRE ARMEE DE BOIS

La construction des "Sorayes" de l'ethnie Hausa est toujours courante et notamment répandue dans les régions du sud du Niger ou du nord du Nigéria. Leur mise en œuvre débute par la construction d'arc-doubleaux en terre armée dont le croisement engendre une structure réticulée. Cette structure servira à supporter un coffrage perdu en branchages sur lequel sera élevé un dôme en bauge. Cette technique permet de couvrir de vastes espaces avec des portées supérieures à 8 - 10 mètres. Les formes réalisées sont très variées et dépendent du tracé des arcs-doubleaux et de leur disposition. Les espaces couverts sont de géométrie très variable, soit de plan carré, rectangulaire, circulaire ou ovale.

© CRATerre 86

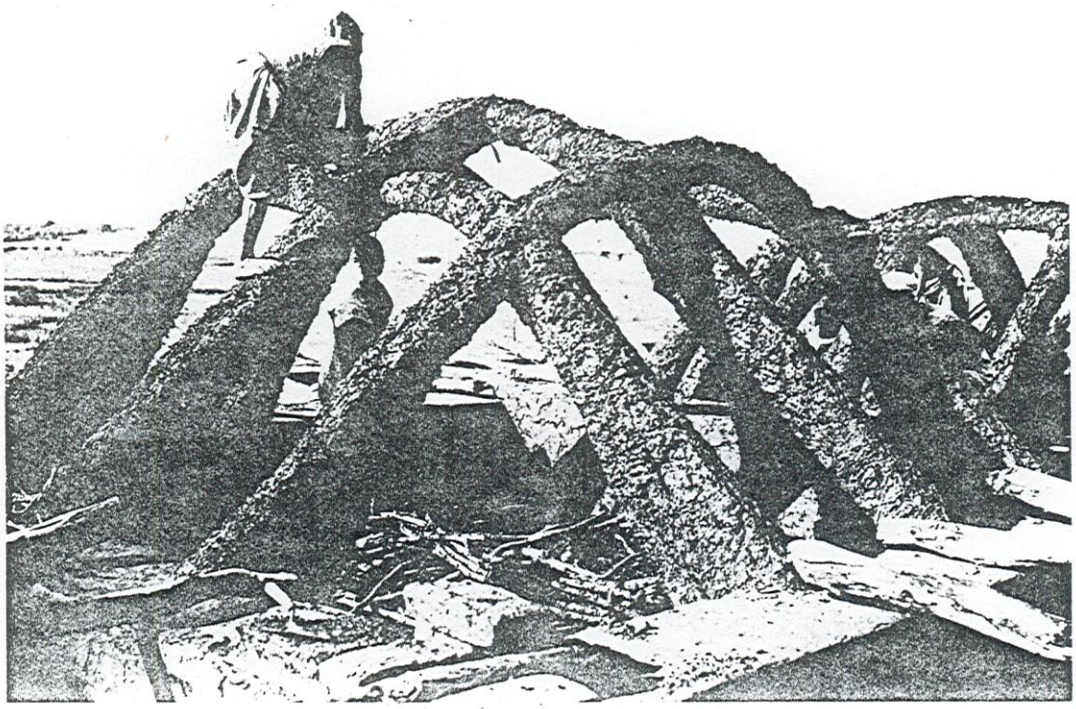
VOUTES EN TERRE ARMEE DE BOIS

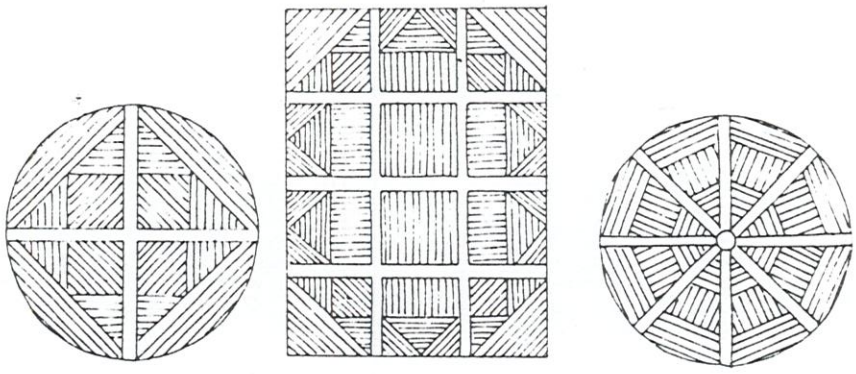
CONSTRUCTION NIGER

Sorayes de l'ethnie Hausa :

1 - Construction des arcs en terre armée confectionnant la structure réticulée.

2 - Remplissage des espaces libres entre les arcs par un coffrage perdu décoratif en branchages et roseaux qui sera recouvert de mortier de terre ou de bauge.





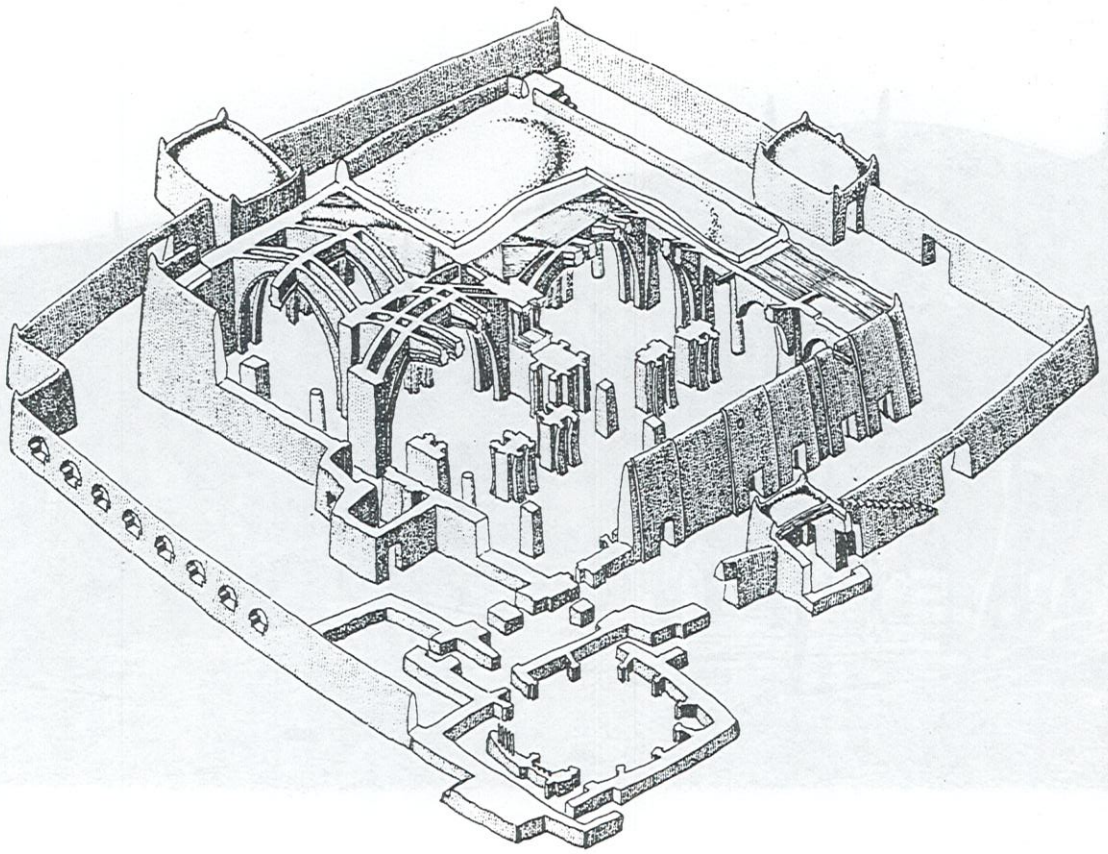
Réf. 1 : DETHIER, J. ; Des Architectures de Terre, catalogue de l'exposition du CCI., Paris, 1982.
Réf. 2 : DENYER, S. ; African traditional architecture. Ed. Heinemann. Londres. 1978.

© CRATerre 86

VOUTES EN TERRE
ARMEE DE BOIS

TYPOLOGIE
NIGER

Restitution de l'aspect original de la mosquée de Zaria montrant la structure en arc.



Réf. : AGO, F. ; Moschee in adobe, Ed. Kappa, Rome, 1982.

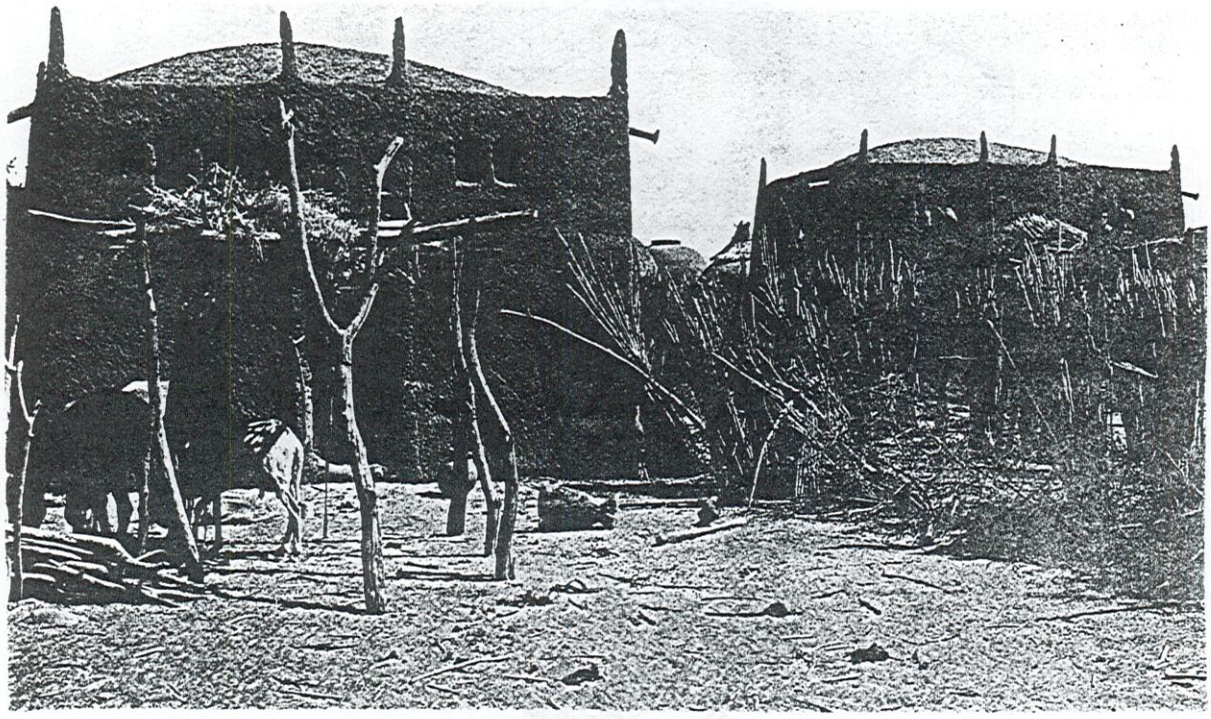
© CRATerre 86

VOUTES EN TERRE ARMEE DE BOIS

TYPOLOGIE NIGER

Au Niger, les maisons d'habitation utilisent le principe de construction des Sorayes de l'ethnie Hausa :

Arcs en terre armée recouverts d'un dôme en bauge sur coffrage perdu en branchages.



Réf. : CHESI, G. ; Les derniers africains, Ed. Arthaud, Paris, 1978.

© CRATerre 86

VOUTES EN TERRE
ARMEE DE BOIS

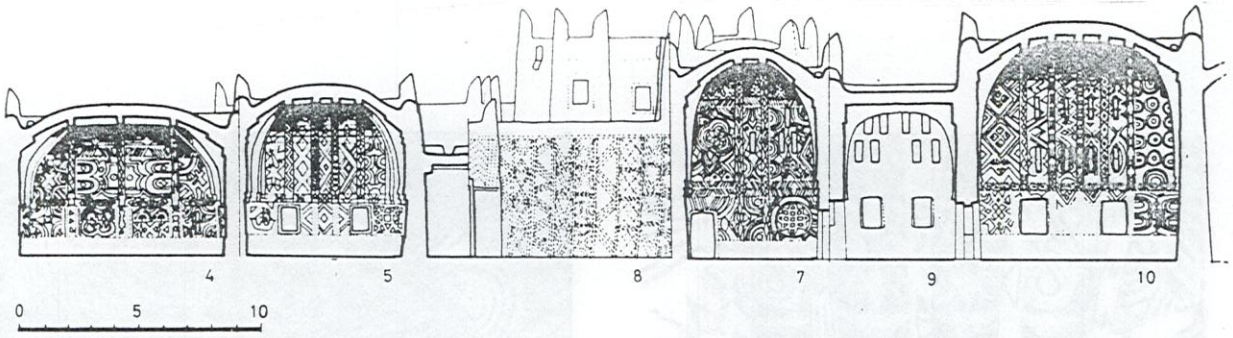
TYPOLOGIE
NIGERIA

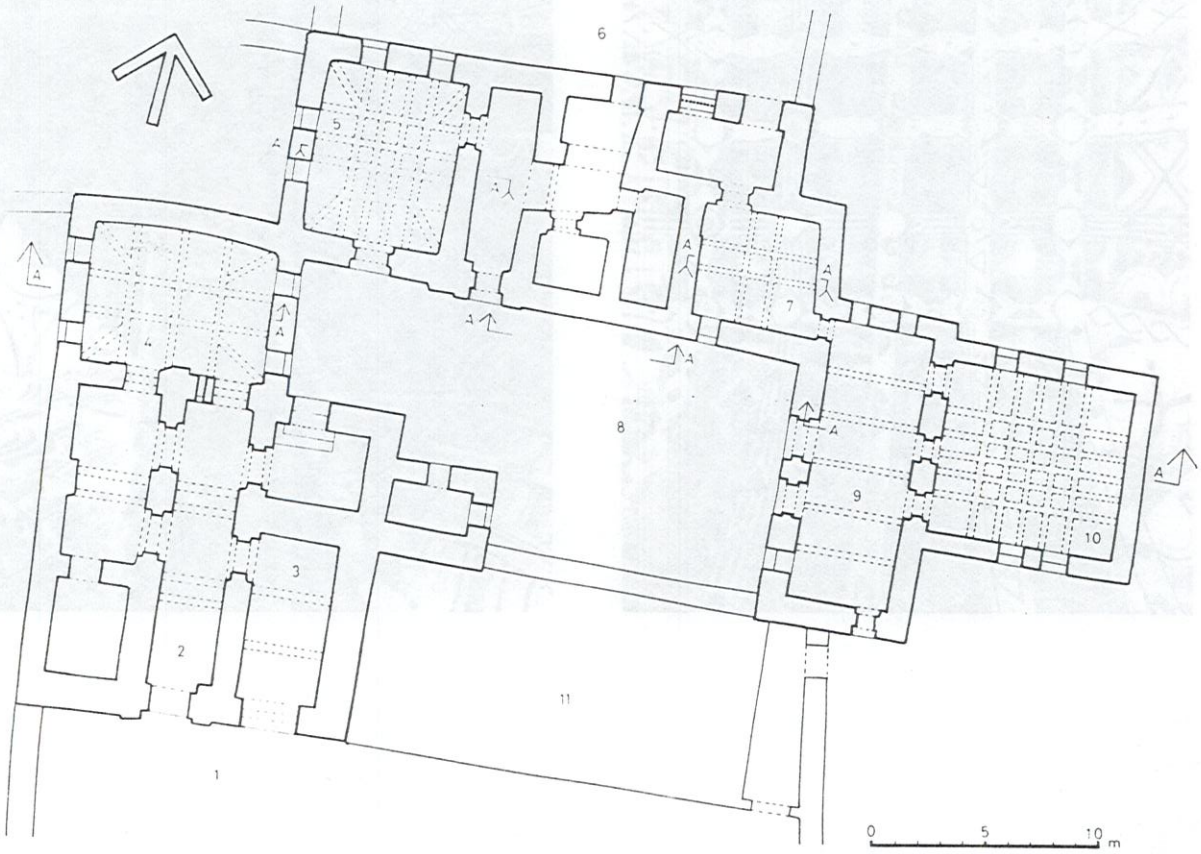
Gridau Rumfa, Palais de Kano, Nigéria :

Les arcs et les lattis de branchages et roseaux ont été enduits puis peints ou décorés de reliefs peints.

1 - Coupe du Palais de Kano.

2 - Plan du Palais de Kano.





Réf. : LEARY, A. ; A décorated Palace in Kano. Artaud Archéology Research Papers n° 12, dec. 1977. Ed. D. JONES and G. MICHELL.

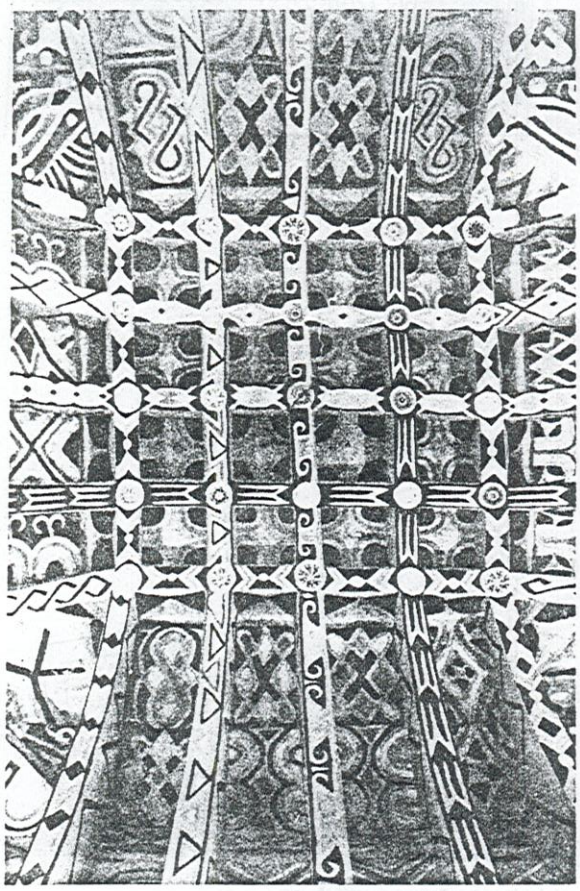
© CRATerre 86

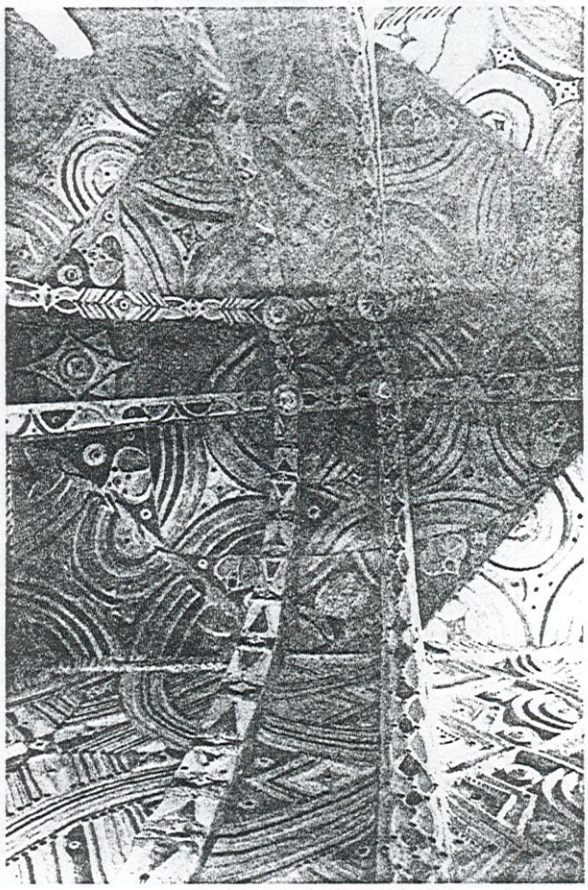
VOUTES EN TERRE
ARMEE DE BOIS

TYPOLOGIE
NIGERIA

Gridau Rumfa, Palais de Kano, Nigéria :

Vue intérieure des plafonds et intrados des voûtes peints et décorés de reliefs sculptés.





Réf. : Photographies dans LEARY, A. ; AARP. n° 12, dec 1977, Ed. D. JONES et G. MICHELL.

© CRATerre 86

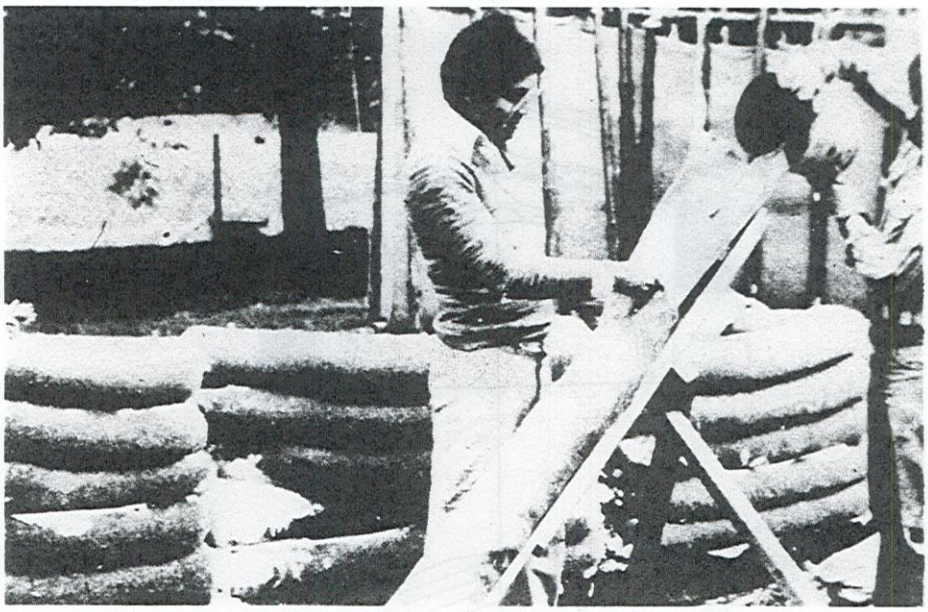
COUPOLES EN SACS DE TERRE

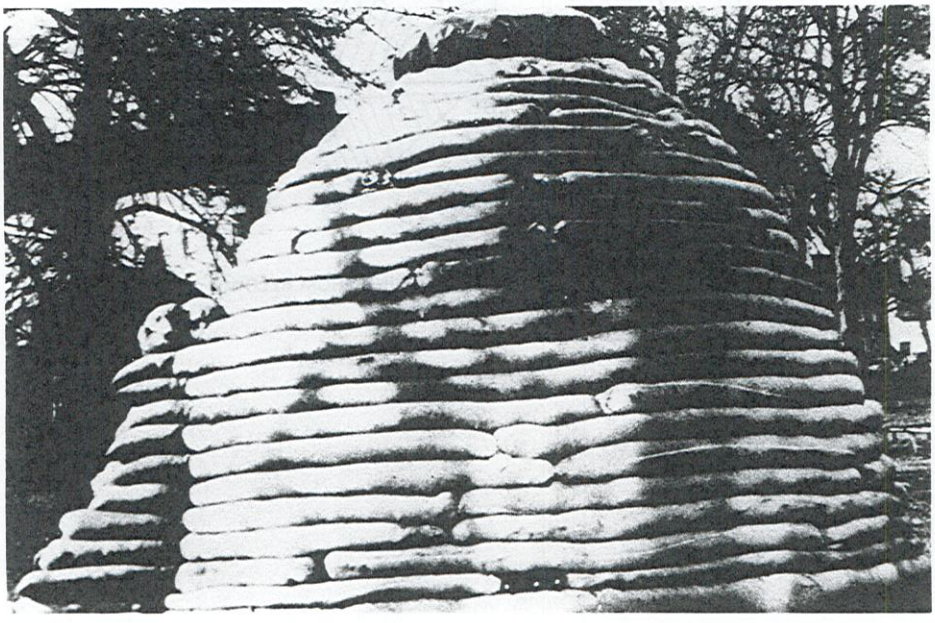
CONSTRUCTION RFA

Expérimentation du Gesamthochschule de Kassel (GHK) dans le cadre des recherches et travaux du Pr. Doctor Ing. Gernot Minke. Des sacs en coton, remplis de terre sont disposés en encorbellements par succession d'assises planes. La génératrice de la voûte est de forme parabolique avec rotation sur un plan circulaire.

1 - Remplissage et empilement des sacs.

2 - Coupole achevée.





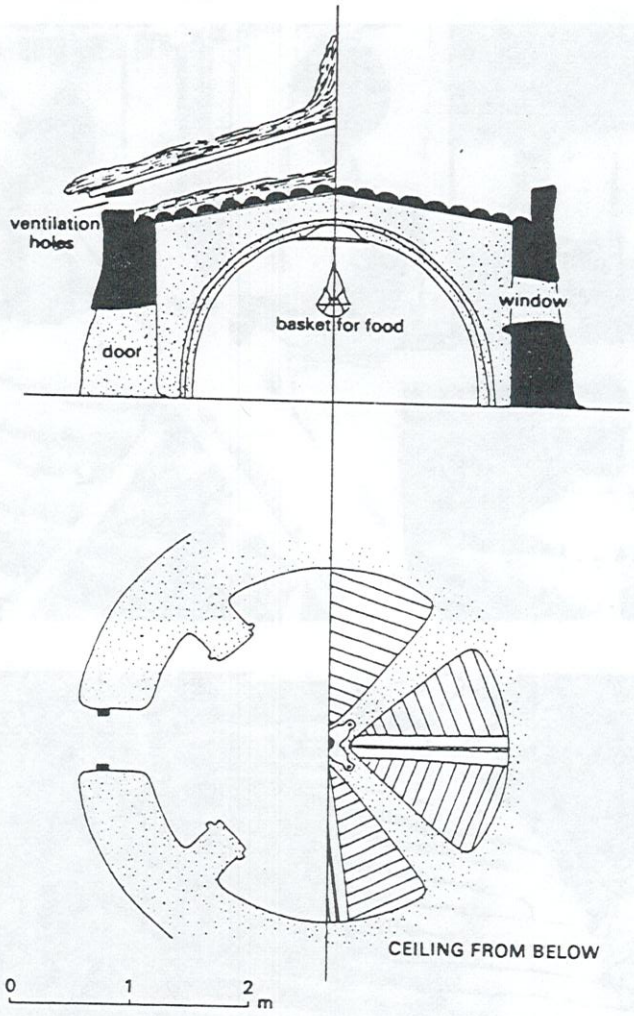
Réf. : Photographies MINKE, G.

© CRATerre 86

VOUTES EN TERRE ARMEE DE BOIS

TYPOLOGIE NIGERIA

Au sud du Nigéria, les précipitations sont plus abondantes et obligent à soigner l'étanchéité. La toiture en terre est doublée d'une couverture en chaume qui ménage un espace de ventilation entre la voûte et la couverture.



Réf. : DENYER, S. ; African traditional architecture, Ed. Heinemann, Londres, 1978.

© CRATerre 86

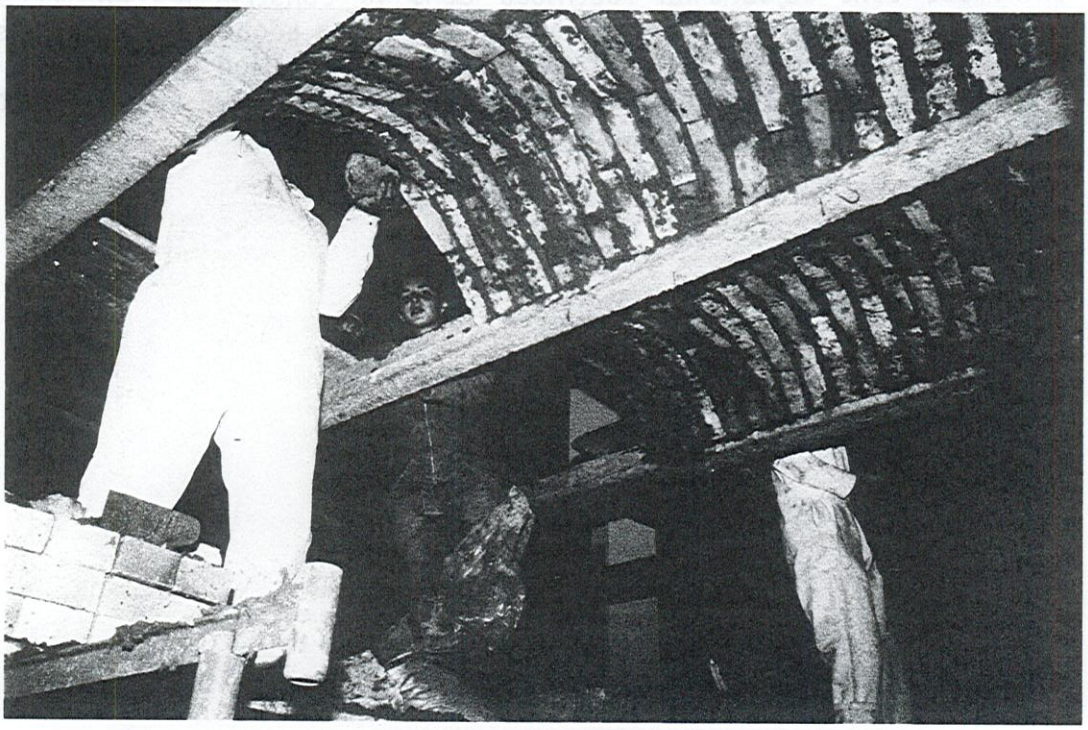
ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE

Les systèmes de planchers en entrevous de briques cuites entre des solives en bois ou des IPN étaient couramment employés dans la construction, à la fin du XIXème et au début du XXème siècle. Ils étaient peu à peu remplacés par les systèmes de dalles à poutrelles et hourdis. Les systèmes en entrevous sont aujourd'hui réutilisés dans la construction en terre et réalisés avec des blocs de terre comprimée ou des adobes entre solives en bois ou poutrelles de béton armé. Leur construction se fait soit par tranches, selon la technique nubienne ou iranienne, soit sur des cintres glissant de forme plein cintre surbaissée.

© CRATerre 86

ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE

Expérimentations réalisées dans le cadre de stages du laboratoire terre de l'Ecole d'Architecture de Grenoble.



Réf. 1 et 2 : Photographies JOFFROY, Th.

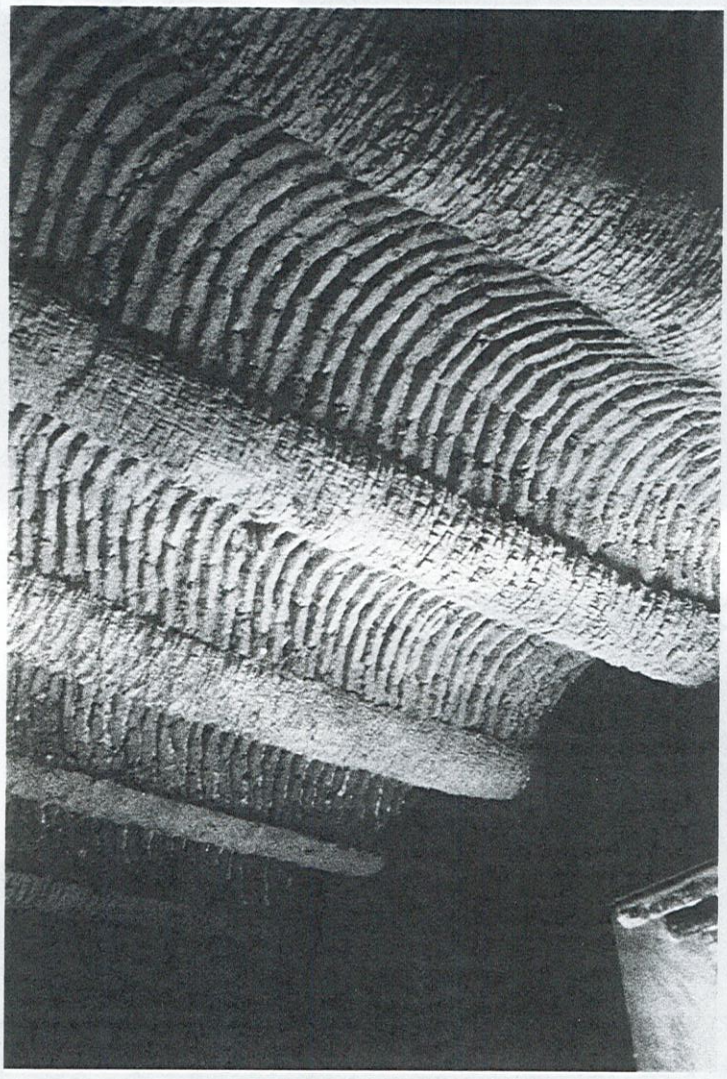
© CRATerre 86

ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE

TYPOLOGIE MAROC

Maison Dana, Marrakech, Maroc, architecte-bâtisseur Elie Mouyal, 1983-84 :

Entrevous en adobe sur quarts de troncs de palmier.



Réf. : Photographie KLEIN, A.

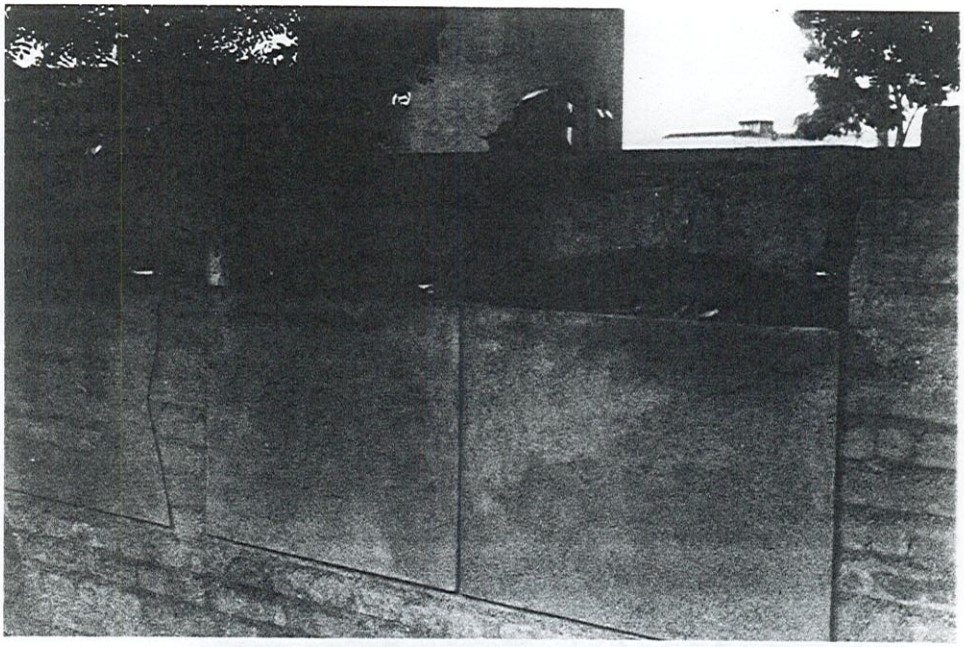
© CRATerre 86

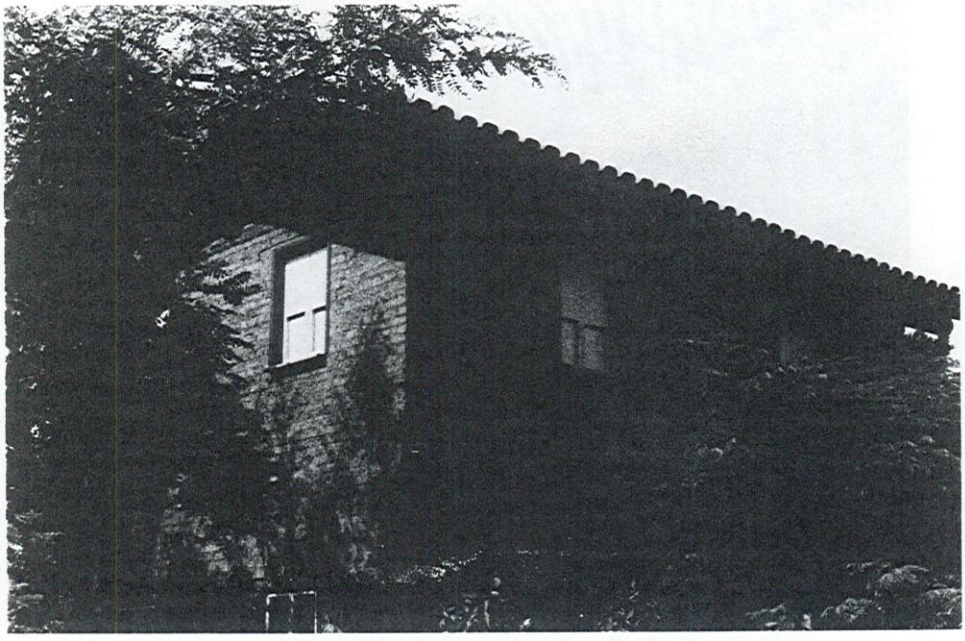
ENTREVOUS EN BRIQUES DE TERRE

TYPOLOGIE BRESIL

1 - Expérimentations de planchers en entrevous de blocs de terre comprimée sur poutrelles de béton armé, Université de São Paulo, Brésil.

2 - Projet d'amélioration de l'habitat pour les favelas de São Paulo, Brésil : Prototype de maison à étage avec planchers en entrevous de blocs de terre.





Réf. : Photographies SAIDI, Mina.

© CRATerre 86

- ADAUA : Rapport sur les techniques de construction mises au point par l'ADAUA entre 1977 et 1982 pour la promotion des matériaux locaux africains, 1982.

- ABEDINI-RAD, M. : Iran-Tabas, une expérience d'entraide collective pour la reconstruction de villages sinistrés, avril 1983.

- AGO, F. : Moschee in adobe, Ed. Kappa, Rome, 1982.

- ALJUNDI, G. : L'architecture traditionnelle en Syrie, Etablissements humains et environnement socio-culturel n°33, UNESCO, déc. 1984.

- ANDERSEN, K B. : African traditional architecture, Oxford University Press Nairobi, 1978.

- ALLCHIN, F R. ; HAMMOND, N. : The archeology of Afghanistan, Academic Press, Londres, 1978.

- BESENVAL, R. : Technologie de la voûte dans l'orient ancien, Ed. Recherches sur les civilisations, Paris, 1984.

- BOURGEOIS, J L. ; PELOS, C. : Spectacular Vernacular, Gibbs M. Smith, Peregrine Smith Books, Salt Lake City, 1983.

- CHESI, G. : Les derniers africains, Ed. Arthaud, Paris, 1978.

- DENYER, S. : African traditional architecture, Ed. Heinemann, Londres, 1978.

- DETHIER, J. : Des Architectures de Terre, catalogue d'exposition du CCI. - CNAC G. Pompidou, Paris, 1982.

© CRATerre 86

- DOAT, P. ; HAYS, A. ; HOUBEN, H. ; MATUK, S. ; VITOUX, F. : Construire en Terre, Ed. Alternatives, Paris, 1979, 1984.

- DULY, C. : The house of mankind, Ed. Thames and Hudson, Londres, 1979.

- FATHY, H. : Construire avec le Peuple, Ed. Sindbad, Paris, 1970.

- FENGHO BRIGADE : Fengho production Brigade, MIMAR n°3, Concept Media, Singapour, 1982.

- FERNEA, R A. ; GESTER, G. : Nubians in Egypt, University of Texas Press, Austin, 1973.

- FRASER, D. : Village planning in the primitive world, planning and cities, Ed. Studio vista, Londres.

- GALDIERI, E. : Le meraviglie dell' architettura in terra cruda, Ed. Laturza, Rome, 1982.

- GARDI, R. : Maisons africaines, Ed. Sequoïa, Paris-Bruxelles, 1974.

- GOETHALS, E. : Arcs, voûtes, coupoles, Art de bâtir, Bruxelles.

- GUIDONI, E. : Architecture Primitive, Ed. Berger Levrault, Paris, 1980.

- HIRSCHI, M. et S. : L'architecture au Yémen du Nord, Ed. Berger Levrault, Paris, 1983.

- HORNE, L. : Les habitats ruraux et leurs lieux d'implantation dans le monde islamique. Transformation de l'habitat rural, vol. 2, Concept Media, Singapour, 1982.

© CRATerre 86

- HUTT, A. ; HARROW, L : Iran 1, Scorpions Publications Limited, Londres, 1977.

- LANDER, H ; NIERMANN, M : Lehm architektur in Spanien und Africa, Karl Robert Langewiesche Nachfolger, Hans Köster Königstein im Taunus, 1980.

- LEARY, A. : A decorated palace in Kano, Art and Archeology Research Papers n°12, déc. 1977, D. Jones and G. Michell editors, Londres.

- MANSBRIDGE, J. : Historia grafica de la arquitectura, Ed. Victor Leru, Buenos Aires, 1977.

- MICHAUD, R. et S. : Caravanes de Tartarie, Ed. Chêne, Paris, 1977.

- MICHELL, G. : Architecture of the islamic world, Ed. Thames and Hudson, Londres, 1978.

- MINKE, G. : Bauen mit Lehm n°1 et 2, Okobuch Verlag, Grebenstein, 1984.

- MOREAU, D. : L'Egypte, Ed. Larousse, Paris, 1975.

- MORENO, I. : Arcos y bovedas, CEAC, Barcelone, 1980.

- NATHAN, F. : Archéologie, Ed. Fernand Nathan, Paris, 1980.

© CRATerre 86

- NOYCE, M. : Brick vault and dome construction, the Arup Journal, Avril 1981.

- NOWEIR, S. : The El Miniawy architects in Algeria, MIMAR n°8, Concept Media, Singapour, 1983.

- PEINAN, Z. ; QUOQUAN, Y. ; BING DONG, L. : La maison troglodyte de Dian Lui, Transformations de l'habitat rural, vol. 1, Concept Media, Singapour, 1981.

- RAINER, R. : Anonymes Bauen im Iran, Akademische Druck-u Verlagsanstadt, Graz, 1977.

- RENAUDEAU, M. : Regards sur le Niger, Ed. Delroisse, Vilo, Paris, 1978.

- RUDOFSKY, B. : Architectures sans architectes, Ed. Chêne, Paris, 1964.

- SAUNERON, S. ; JACQUET, I. : Les ermitages chrétiens du désert d'Esna, Publications de l'Institut Français d'Archéologie du Caire, Paris, 1972.

- SCHNEIDER, J. : Am Anfang Die Erde Sanfter Baustoff Lehm, Ed. Fricke im Rudolph Müller Verlag, Frankfurt am Main, 1985.

© CRATerre 86

- SEIGNOBOS, C. : Nord Cameroun, Montagnes et Hautes Terres, Ed. Parenthèses, Roquevaire - Marseille, 1982.

- SNELDER, R. : The great mosquee at Djenné, MIMAR n°12, Concept Media, Singapour, 1984.

- SULZER, H D. ; MEIER, T. : Economical Housing for Developing Countries, Vol. 2, Bâle, 1978.

- SUN, P. : Underground Houses, MIMAR n°3, Concept Media, Singapour, 1982.

- TEHERAN MUSEUM OF CONTEMPORARY ART : Geltaftan, Tehéran, dec. 1980.

- VARANDA, F. : Art of building in Yemen, Art and Archeology Research Papers, Londres, 1982.

- WICHMANN, H. : Architecktur der Vergänglichkeit, Birkhäuser Verlag, Basel, 1983.

- WULFF : The traditional crafts of Persia, MIT. Press, Cambridge, 1966.

- YAGI, K. : Housing analysis in Syria, Process Architecture n°15, Process architecture publishing, Tokyo, Mai 1980.

© CRATerre 86

BIBLIOGRAPHIE

CHAIX et CHAMBARET. "Traité des ponts"
Cours de construction tome 2. Editions Fanchon et Artus.

"Aide mémoire de l'ingénieur". Edition française du manuel de la société LA HÜTTE. Librairie Polytechnique. Baudry et Cie éditeur.

ACHILLE PETRIGNANI. "Tecnologie dell'Architettura".
Série Görlich. Décembre 1979.

J. CARVALHO. "Etude sur la stabilité des voûtes". Annales des Ponts et Chaussées. N°40. 1er semestre 1853. PARIS.

A. CREPIN. "Etude sur la résistance des voûtes en maçonnerie. Détermination graphique de la courbe des pressions". Annales des Ponts et Chaussées. N°37. 1er semestre 1887.

J. HEYMAN. "The mansonry arch".
Ellis Horwood publisher. CHICHESTER 1982.

DE LA HARPE. "Notes et formules de l'ingénieur".
Albin Michel. 1927. PARIS.

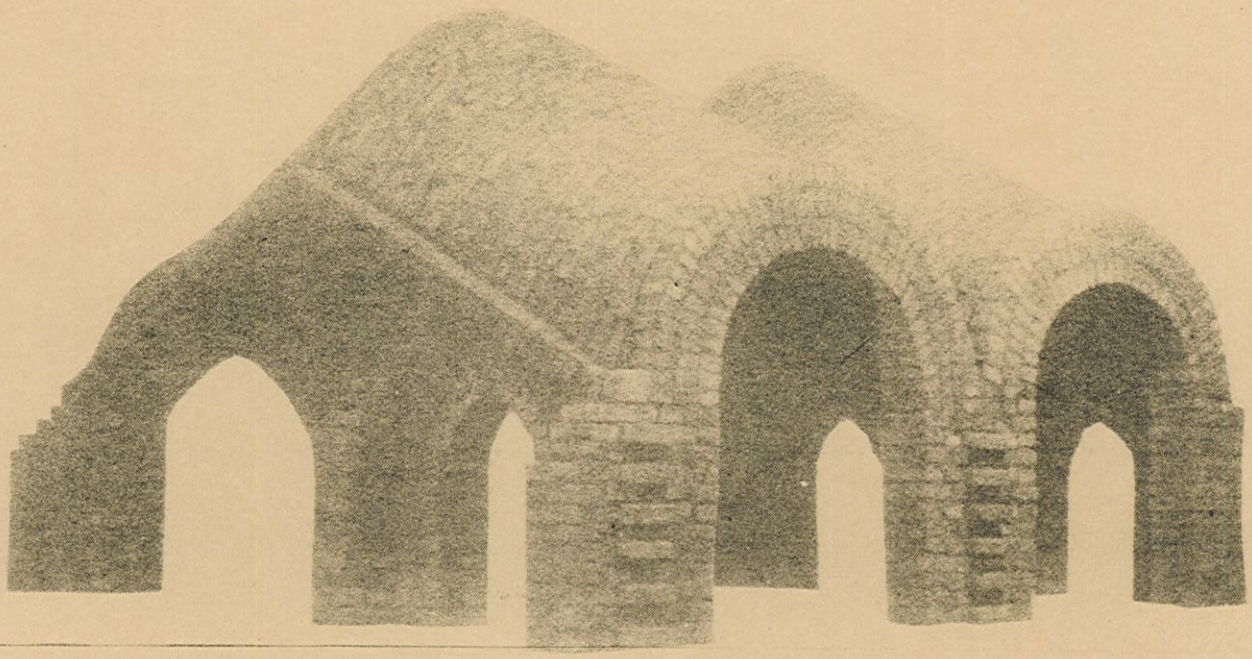
MONDIN et BOULLE. "Aide mémoire-Bâtiment" Dunod.
1969. PARIS.

"Cours de construction - Arcs, voûtes et dômes en terre".
CEAA Ecole d'Architecture de Grenoble. IUT Génie Civil. Document interne.

F. PICHKINE. "Traité de construction"
Editions Grünstein. 1888. St PETERSBOURG.

© CRATerre 86

1484



CRATerre
Centre Simone SIGNORET - BP 53
38090 VILLEFONTAINE - France