

CONCEPT TECHNIQUE VOÛTE NUBIENNE

GUIDE DE BONNES PRATIQUES

Version 0.1 / février 2025

© La Voûte Nubienne
www.lavoutenubienne.org

SOMMAIRE

SECTION 0.	5
0.1	CONTRIBUTEURS..... 6
0.2	INTRODUCTION..... 6
SECTION 1. NOTIONS PRÉALABLES	7
1.1	RÉFÉRENCES NORMATIVES ET TECHNIQUES 8
1.2	LIMITES 8
1.3	PARTIES D'UNE CONSTRUCTION EN VOÛTE NUBIENNE 9
1.4	SE PROTÉGER DE L'EAU 9
1.5	EXIGENCES DE SUIVI/ENTRETIEN 9
SECTION 2. DÉFINITION ET GESTION DE CHANTIER	10
2.1	RÈGLES D'OCCUPATION D'UN TERRAIN..... 11
2.2	LIMITES STRUCTURELLES 11
2.2.1	<i>Forces dans la structure</i> 11
2.2.2	<i>Maîtrise des forces dans le cas du concept technique VN</i> 11
2.2.3	<i>Étude de stabilité structurelle</i> 11
2.2.4	<i>Dimensions d'une voûte</i> 15
2.2.5	<i>Hauteur de Naissance de Voûte (HNV)</i> 15
2.3	PRÉCAUTIONS PENDANT LA CONSTRUCTION 15
2.4	QUANTITATIFS 15
2.5	MATÉRIEL DE CHANTIER 15
SECTION 3. MATÉRIAUX	16
3.1	BRIQUES ET MORTIERS 17
3.1.1	<i>Généralités</i> 17
3.1.2	<i>Briques crues, ou adobes</i> 18
3.1.3	<i>Mortier</i> 20
3.1.4	<i>Cohésion briques/mortier</i> 20
3.2	ESSAIS TERRES ET MATÉRIAUX TRANSFORMÉS 21
3.2.1	<i>Spécificités contextuelles</i> 21
3.2.2	<i>Objectifs des essais</i> 21
3.2.3	<i>Essais d'identification des terres</i> 22
3.2.4	<i>Essais de vérification de la teneur en eau des mélanges de terre</i> 24
3.2.5	<i>Essais de validation des matériaux transformés</i> 24
3.3	AUTRES MATÉRIAUX..... 26
3.3.1	<i>Autres matériaux courants</i> 26
3.3.2	<i>Autres matériaux secondaires</i> 27
3.3.3	<i>Tableau des dosages en ciment</i> 27
SECTION 4. DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE DU GROS-ŒUVRE	28
4.1	FONDACTIONS SUPERFICIELLES 29
4.1.1	<i>Références normatives</i> 29
4.1.2	<i>Principes</i> 29
4.1.3	<i>Cas VN courants</i> 29
4.1.4	<i>Cas VN courant n°1 : fondations en maçonnerie de pierres crues liées au mortier</i> 30
4.1.5	<i>Cas VN courant n°2 : fondations en pisé</i> 31
4.2	SOUBASSEMENTS 32
4.2.1	<i>Principes</i> 32
4.2.2	<i>Cas VN courants</i> 32
4.2.3	<i>Cas VN courant n°1 : soubassements en maçonnerie de briques spéciales</i> 33
4.2.4	<i>Cas VN courant n°2 : soubassements en béton cyclopéen</i> 34
4.3	MURS 34
4.3.1	<i>Principes</i> 34
4.3.2	<i>Typologies et dimensionnements</i> 35
4.3.3	<i>Règles d'appareillage</i> 36

4.3.4	Barrière capillaire.....	37
4.4	OUVERTURES	37
4.4.1	Principes.....	37
4.4.2	Dimensionnement des ouvertures dans les murs porteurs.....	38
4.4.3	Dimensionnement des ouvertures dans les murs pignon et de refend.....	39
4.4.4	Autres fiches du Manuel du Maçon	39
4.4.5	Protection des appuis d'ouvertures donnant sur l'extérieur.....	39
4.5	CÂBLE-COMPAS	41
4.5.1	Principes.....	41
4.6	VOUTAINS ET ARCADES.....	41
4.6.1	Principes.....	41
4.6.2	Coffrage.....	42
4.6.3	Mise en œuvre.....	42
4.7	VOÛTES	43
4.7.1	Principes.....	43
4.7.2	Mise en œuvre.....	43
4.8	CONTREFORTS	44
4.8.1	Principes.....	44
4.8.2	Typologies et dimensionnements.....	45
4.8.3	Règles d'appareillages	45
4.8.4	Fiches du Manuel du Maçon	46
4.9	TOITURE	46
4.9.1	Principes.....	46
4.9.2	Forme de pente maçonnée	47
4.9.3	Gouttières.....	47
4.9.4	Bâche plastique et couche de mortier de terre.....	48
4.9.5	Murets d'acrotère et balustrades	48
4.9.6	Finitions.....	49
4.10	PROTECTIONS D'ACROTÈRES ET DE BALUSTRADES	49
4.10.1	Principes	49
4.10.2	Cas VN courant n°1 : couronnement en dalles préfabriquées en béton de ciment.....	50
4.10.3	Cas VN courant n°2 : couronnement en béton armé coffré.....	50
4.11	ESCALIERS	51
4.11.1	Références normatives.....	51
4.11.2	Spécificités VN	51
4.11.3	Fiches du Manuel du Maçon	52
4.12	CONSTRUIRE UN ÉTAGE	52
4.12.1	Règles	52
4.12.2	Fiches du Manuel du Maçon	53
4.13	AGRANDIR UN BÂTIMENT VN EXISTANT	53
4.13.1	Cas n°1 : ajout d'une voûte dans le prolongement ou perpendiculairement à une voûte existante	53
4.13.2	Cas n°2 : ajout d'une voûte adjacente à une voûte existante.....	54
4.13.3	Cas n°3 : ajout d'un étage	55
SECTION 5. OUVRAGES CONNEXES		56
5.1	MENUISERIES.....	57
5.1.1	Références normatives.....	57
5.1.2	Spécificités VN.....	57
5.1.3	Fiches du Manuel du Maçon	58
5.2	PETITE MAÇONNERIE	58
5.2.1	Principes.....	58
5.2.2	Cloisons	58
5.2.3	Étagères des niches.....	59
5.3	ÉLECTRICITÉ	60
5.3.1	Références normatives.....	60
5.3.2	Spécificités VN.....	60
5.4	PLOMBERIE	61
5.4.1	Références normatives.....	61
5.4.2	Spécificités VN.....	61
5.5	TRAITEMENTS DES PLANCHERS INTÉRIEURS	62
5.5.1	Principes.....	62

5.5.2	Exemples VN courants.....	62
SECTION 6. REVÊTEMENTS DE MURS, VOÛTES ET TOITURES		63
6.1	ENDUITS	64
6.1.1	Références normatives et techniques	64
6.1.2	Cas d'application.....	64
6.1.3	Contraintes d'application VN.....	64
6.1.4	Règles générales	66
6.1.5	Cas VN courant n°1 : les enduits terre	68
6.1.6	Cas VN courant n°2 : les enduits stabilisés au bitume	70
6.1.7	Cas VN courant n°3 : les enduits sable-ciment.....	71
6.1.8	Autres types d'enduits.....	73
6.2	BADIGEONS ET PEINTURES	73
6.2.1	Références normatives.....	73
6.2.2	Règles de base.....	74
6.2.3	Badigeons de chaux	74
6.2.4	Peintures	74
6.2.5	Fiches du Manuel du Maçon	74
6.3	CARRELAGES	75
6.3.1	Références normatives.....	75
6.3.2	Spécificités VN.....	75
SECTION 7. ANNEXES		76
7.1	FICHES CONTRÔLE / AUTO-CONTRÔLE	77
7.1.1	Fondations superficielles.....	77
7.1.2	Soubassements	78
7.1.3	Murs	79
7.1.4	Ouvertures.....	79
7.1.5	Câble-compas.....	80
7.1.6	Voutains et arcades.....	80
7.1.7	Voûte.....	81
7.1.8	Contreforts	82
7.1.9	Toiture.....	83
7.1.10	Protections d'acrotères et balustrades	85
7.1.11	Escaliers.....	86
7.1.12	Construire un étage.....	86
7.1.13	Agrandir un bâtiment VN existant	87
7.1.14	Pose de menuiseries	88
7.1.15	Petite maçonnerie	89
7.1.16	Électricité.....	90
7.1.17	Plomberie	90
7.1.18	Traitement des sols	90
7.1.19	Enduits.....	91
7.1.20	Badigeons et peintures.....	91
7.1.21	Carrelages	91

SECTION 0.

0.1 CONTRIBUTEURS

Comité de rédaction :

Mathieu Hardy – Architecte – Rédaction

Samuel Rodrigues – Architecte – Illustration

Cyril Chabaud – Architecte – Illustration (v2018)

Thomas Granier – Fondateur, Directeur Général AVN – Comité de rédaction et relecture

Seri Youlou – Fondateur, Directeur AVN Burkina Faso – Comité de rédaction et relecture

Comité de consultation :

Adama Ilboudo – Maître Maçon VN

Richard Somda – Maître Maçon VN

Augustin Tonavo – Technicien VN

0.2 INTRODUCTION

Les informations et règles contenues dans ce *Guide de bonnes pratiques* sont basées d'une part sur l'expérience et les pratiques de professionnels utilisant le *concept technique Voûte Nubienne* ; d'autre part sur des références normatives et techniques existantes et jugées pertinentes.

Le présent *Guide de bonnes pratiques* établit et décrit les pratiques usuelles en matière de mise en œuvre d'ouvrages de type *concept technique Voûte Nubienne* promu par l'Association la Voûte Nubienne. Tout autre type d'ouvrage se situe donc en dehors du domaine d'application de ce guide.

Le *concept technique Voûte Nubienne* est un système constructif complet inspiré de la technique antique de la voûte nubienne. Il consiste en une structure massive et porteuse, entièrement réalisée en maçonnerie de briques et mortier de terre crue, constituée de murs reprenant une toiture voûtée. La voûte est montée sans coffrage ; elle est autoportante, travaille principalement en compression et est mise en charge.

Le *concept technique Voûte Nubienne* est étudié pour la réalisation d'ouvrages de petite et moyenne échelle ; il a été développé prioritairement pour répondre aux besoins constructifs de base des populations rurales et paysannes sahéniennes. Les ouvriers qui l'utilisent sont donc le plus souvent des maçons ruraux autonomes qui réalisent des bâtiments modestes, sans implication de maîtres d'œuvre (techniciens, architectes, etc.), que ce soit pour la conception ou pour le suivi des chantiers. La simplification et la standardisation technique se situent au cœur de la démarche de mise au point du *concept technique Voûte Nubienne* comme réponse à cette réalité. Bien entendu cela ne limite en rien l'usage du *concept technique Voûte Nubienne* au monde paysan, la technique s'avérant tout à fait adaptée à des opérations de construction plus exigeantes, menées de façon plus formelle et impliquant notamment des maîtres d'œuvre.

Mise en garde : ce *Guide de bonnes pratiques* ne remplace pas la formation acquise sur les chantiers et transmise par des artisans expérimentés. L'utilisation de ce document ne peut donc en aucun cas garantir une mise en œuvre correcte.

SECTION 1. NOTIONS PRÉALABLES

1.1 RÉFÉRENCES NORMATIVES ET TECHNIQUES

Documents normatifs référents :

- New Zealand Standard NZS 4297:2020: Engineering design of earth buildings
- New Zealand Standard NZS 4298:2020: Materials and construction earth buildings
- New Zealand Standard NZS 4299:2020: Earth buildings not requiring specific engineering design
- Norme Française XP P13-901 : Briques et Blocs de terre crue pour murs et cloisons - Définitions - Spécifications - Méthodes d'essai - Conditions de réception
- Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue 2020 : Brique de terre crue
- NF DTU 20.1 P1-1 (octobre 2008) : Travaux de bâtiment - Ouvrages en maçonnerie de petits éléments - Parois et murs
- « Règles professionnelles : Enduits sur supports composés de terre crue – 63 fiches d'exemples de mise en œuvre », Éditions du Moniteur 2013

Documents techniques référents :

- « Guide Pratique 2002 : la Construction Sans Bois (CSB) », Development Workshop
- « Document de référence de la CSB 2003 : principes de structure & règles de base », Development Workshop
- « Traité de construction en terre », CRAterre 2006, ISBN 978-2-86364-161-3
- « Argiles et biopolymères, les stabilisants naturels pour la construction en terre », CRAterre éditions 2017, ISBN 978-2-906901-88-9, (lien de téléchargement : <https://amaco.org/wp-content/uploads/2020/04/recettes-traditionnelles170105-web-md.pdf>)

1.2 LIMITES

Hauteur : le *concept technique Voûte Nubienne* est adapté à des constructions ne dépassant pas 2 niveaux (rez-de-chaussée + 1 étage).

Inondations : le *concept technique Voûte Nubienne* est adapté à des sites de construction ne présentant pas de risque d'inondation. Les eaux stagnantes ou de crue peuvent détruire les murs en adobes lorsque le contact est prolongé. Dans tous les cas, un bon drainage est indispensable.

Précipitations : le *concept technique Voûte Nubienne* est adapté à des milieux secs où les précipitations n'excèdent pas 1.000 mm par an et où la saison des pluies est concentrée sur une période continue. Les prescriptions de ce guide ne couvrent pas les constructions qui seraient réalisées sous des climats tropicaux enregistrant de fortes précipitations annuelles.

Activité sismique : la bande sahélienne dite large est une zone de faible activité sismique. Les prescriptions de ce guide ne couvrent pas les constructions qui seraient réalisées en zone présentant un risque sismique.

1.3 PARTIES D'UNE CONSTRUCTION EN VOÛTE NUBIENNE

Insérer fiche « S1-1 »

1.4 SE PROTÉGER DE L'EAU

Insérer fiche « S1-2 »

1.5 EXIGENCES DE SUIVI/ENTRETIEN

Un bâtiment construit selon le *concept technique Voûte Nubienne* doit être entretenu, comme tout bâtiment, ni plus ni moins. Un bon entretien est d'abord préventif, car il permet de maîtriser les dégradations, de réduire les besoins correctifs et de réduire les dépenses.

Le présent Guide ne porte pas sur les questions d'entretien, qui sont traitées dans une documentation dédiée. Seules quelques orientations ayant valeur de rappel sont introduites ici.

Insérer fiches « S1-3a, b, c »

SECTION 2. DÉFINITION ET GESTION DE CHANTIER

2.1 RÈGLES D'OCCUPATION D'UN TERRAIN

Insérer fiches « S2 – 1.1 ; 1.2 »

2.2 LIMITES STRUCTURELLES

2.2.1 Forces dans la structure

> **Forces obliques** : à la différence des bâtiments maçonnés couverts par des toitures plates qui sont soumis essentiellement à des forces verticales, les bâtiments maçonnés couverts par des voûtes sont soumis à des forces obliques en plus des forces verticales, ce qui engendre un effet d'écartement. Ces forces obliques doivent être attentivement prises en compte afin d'assurer la stabilité des ouvrages, d'autant plus lorsque les ouvrages sont réalisés en maçonnerie de briques de terre crue qui travaillent essentiellement en compression.

> **Forces statiques et dynamiques** : les forces statiques sont exercées par le poids propre des ouvrages en question (murs, voûtes, charges des riens, forme de pente et étanchéité, acrotères, etc.). Les forces dynamiques sont par exemple le vent ou la circulation des personnes ; ce sont aussi des forces qui peuvent s'exercer pendant la construction, par exemple pendant la phase de mise en charge progressive de la voûte.

2.2.2 Maîtrise des forces dans le cas du concept technique VN

La stabilité structurelle du *concept technique Voûte Nubienne* est obtenue par la combinaison de plusieurs facteurs :

- La limitation de la portée de la voûte à 3m30 ;
- Une Hauteur de Naissance de Voûte (HNV) maximum de 175 cm pour des murs porteurs de 60 cm d'épaisseur (si besoin d'un HNV plus haut, les murs porteurs sont épaissis) ;
- Une voûte en berceau entièrement mise en charge, dont l'arc est un plein-cintre légèrement surhaussé en anse-de-panier.

Le respect de ces principes combinés permet de conférer à la structure ses valeurs de stabilité et de sûreté.

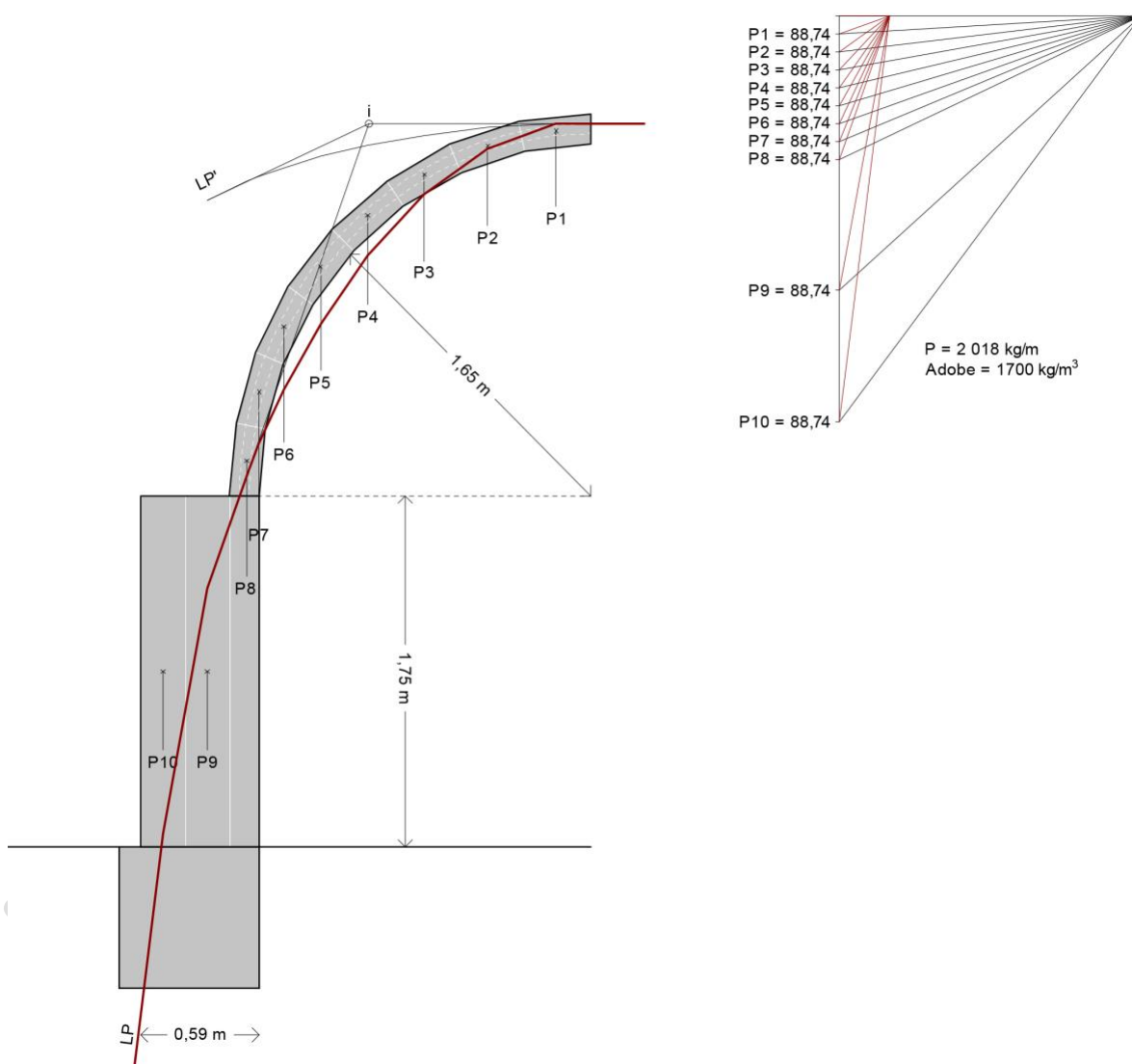
2.2.3 Étude de stabilité structurelle

La présente étude de stabilité structurelle a été produite pour un module VN de base aux valeurs limites « hautes ». La méthode utilisée est celle dite « funiculaire », avec les données suivantes :

- Densité adobes et mortier = 1.700 kg/m³
- Épaisseur murs porteurs = 59 cm
- Hauteur de Naissance de Voûte = 175 cm
- Portée VN = 330 cm
- 3 cas de mise en charge des reins = sans charge / demi-charge / pleine charge

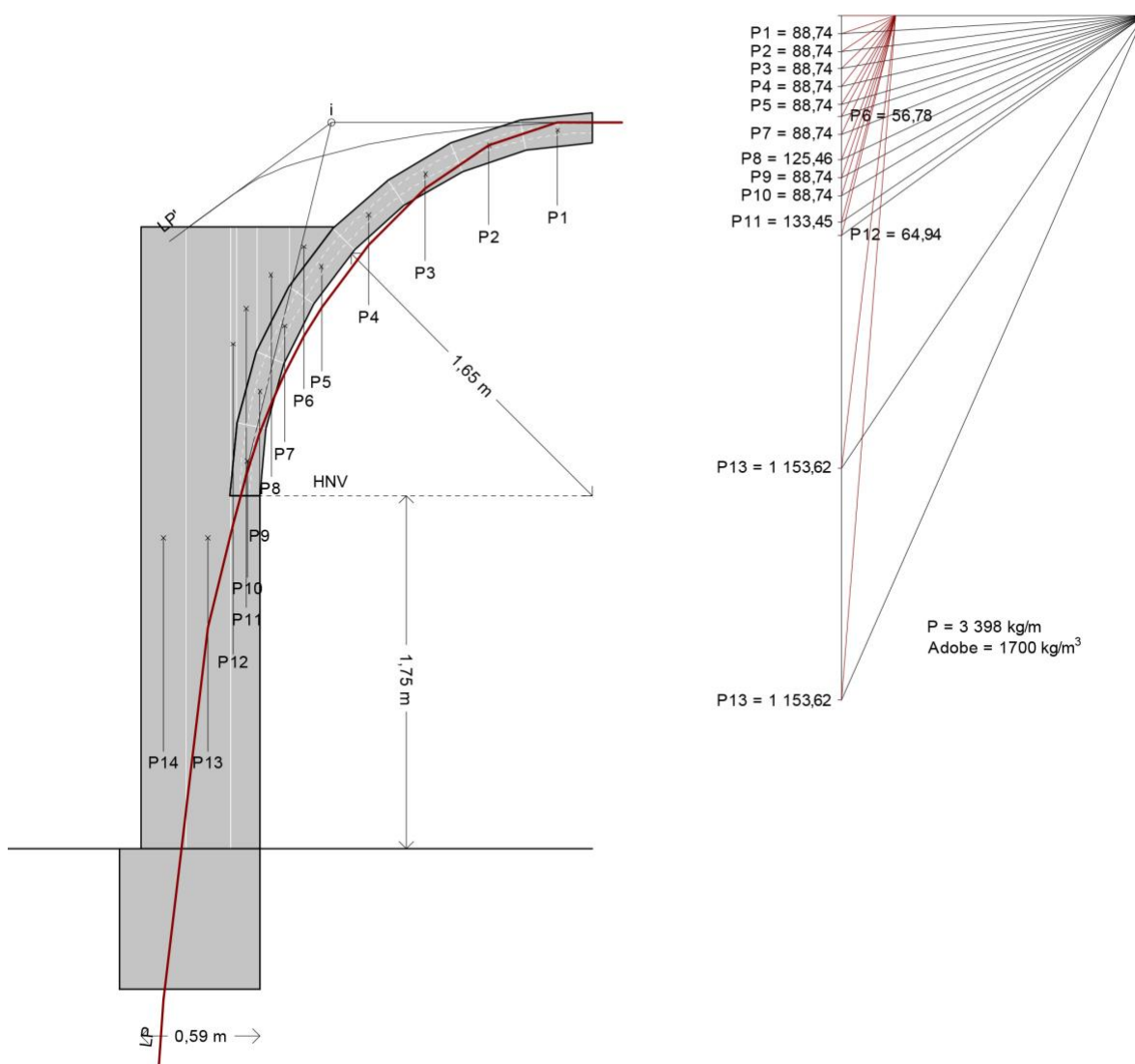
- Complexe d'étanchéité de base = forme de pente épaisseur moyenne 8 cm - 1.700 kg/m³ + couche de terre épaisseur 6 cm - 1.700 kg/m³ + antiérosif stabilisé au bitume épaisseur 4 cm – 2.200 kg/m³
- Muret d'acrotère 1 rang 1.700 kg/m³
- Vérification de la stabilité et de la sureté, avec un coefficient de sécurité géométrique de 3 (= ligne de pression dans le tiers central) et résistance aux sollicitation latérale (résultante des forces comprise dans le tiers central du mur dans le cas de charge le plus défavorable).

2.2.3.1 Cas n°1 : aucune mise en charge des reins de la voûte



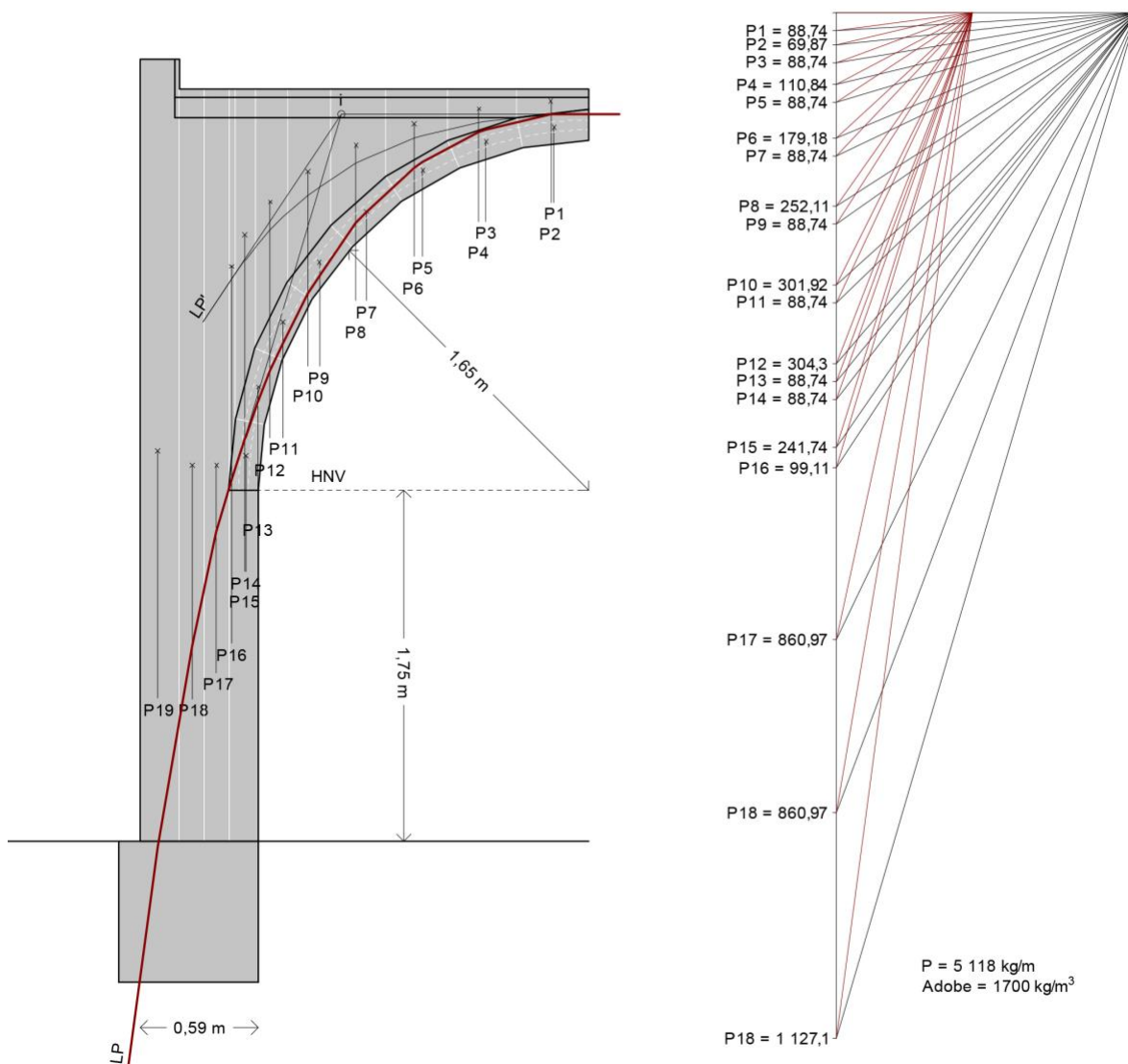
Sans mise en charge, la ligne de pression sort très nettement de l'emprise de la voûte côté intrados. Le phénomène de déformation de la voûte est inévitable. La voûte n'est ni stable ni sûre ; elle présente un risque d'effondrement élevé.

2.2.3.2 Cas n°2 : mise en charge partielle (2/3) des reins de la voûte



Avec une mise en charge partielle (2/3), la ligne de pression sort moins nettement de l'emprise de la voûte côté intrados. La mise en charge permet de contrecarrer le phénomène de déformation de la voûte, mais pas de façon optimale. Toutefois, le fait que de nombreuses voûtes aient été construites selon ce principe de mise en charge partielle et soient stables depuis des années tend à démontrer que le principe de mise en charge partielle des reins est envisageable, même si nous ne le recommandons pas.

2.2.3.3 Cas n°3 : mise en charge complète des reins de la voûte



Avec une mise en charge complète, la ligne de pression rentre entièrement dans l’emprise de la voûte. Elle sort légèrement du tiers central de l’arc vers l’intrados, mais la mise en charge complète des reins empêche toute possibilité de déformation. Ainsi la voûte est considérée stable et sûre et le risque d’effondrement est jugé nul.

On remarque par ailleurs, pour le mur porteur de 175 cm de hauteur, que la ligne de pression sort du tiers central de l’épaisseur du mur à la base de celui-ci, ce qui indique un risque léger de basculement. Toutefois, dès lors que l’on considère que le mortier de liaison apporte une résistance/sécurité supplémentaire (la méthode funiculaire ne prend pas en compte l’adhésion du mortier), le mur avec en question peut être considéré stable et sûr. Les très nombreux bâtiments VN construits avec des murs porteurs de 175 cm de hauteur reprenant des voûtes mises en charge de 330 cm de portée en fournissent une excellente démonstration.

2.2.3.4 Conclusion

Les voûtes utilisées par le concept technique Voûte Nubienne ne sont pas à l'équilibre lorsqu'elles ne sont pas mises en charge. La non mise en charge est donc proscrite !

Une mise en charge partielle, au minimum aux 2/3 de la hauteur de la voûte, n'est pas interdite, mais elle n'est pas recommandée. En cas de recours à cette pratique, nous invitons à la prudence.

La mise en charge complète constitue donc in fine la bonne pratique dans le cas du concept technique Voûte Nubienne. C'est elle qui garantit la stabilité et la sûreté des voûtes mises en œuvre.

Enfin, la Hauteur de Naissance de Voûte (HNV) maximum de 175 cm est confirmée pour l'élévation des murs porteurs reprenant des voûtes de 3m30 de portée.

2.2.4 Dimensions d'une voûte

Insérer fiche « S2 – 2.1 »

2.2.5 Hauteur de Naissance de Voûte (HNV)

Insérer fiche « S2 – 2.2 »

2.3 PRÉCAUTIONS PENDANT LA CONSTRUCTION

Attention ! Les maçonneries en briques et mortier de terre crue, et plus largement les ouvrages en terre crue, tendent vers leur pleine résistance progressivement avec leur séchage, qui s'avère assez long. Il faut en tenir compte et appliquer au chantier un rythme tel que les ouvrages aient le temps de sécher suffisamment pour être en capacité de reprendre les charges croissantes qui s'y exercent.

Par ailleurs, en cas de pluie pendant le chantier à des étapes critiques de la construction – mise en œuvre et mise en charge de la voûte particulièrement – faisant augmenter le taux d'humidité des ouvrages en terre récemment mis en œuvre, des risques de rupture sont possibles et doivent être sérieusement pris en considération en anticipant des solutions de protection comme des bâches plastiques, ou en interrompant la mise en œuvre afin de permettre aux ouvrages à risques de sécher suffisamment avant de poursuivre leur mise en œuvre et leur mise en charge.

2.4 QUANTITATIFS

Insérer fiches « S2 – 3.1a, b, c, d, e ; 3.2a, b, c »

2.5 MATÉRIEL DE CHANTIER

Insérer fiches « S2 – 4.1 ; 4.2 »

SECTION 3. MATÉRIAUX

3.1 BRIQUES ET MORTIERS

3.1.1 Généralités

Dans le champ des matériaux « terre crue » le *concept technique Voûte Nubienne* emploie exclusivement la brique d'adobe et le mortier de terre crue. Sont donc situés en dehors du domaine d'application de ce guide les autres matériaux « terre crue » (pisé, bauge, brique compressée, etc.).

3.1.1.1 Masse volumique

Masse volumique apparente des briques et mortiers de terre crue : le champ couramment admis est 1.400 – 1.700 kg/m³, soit une densité comprise entre 1,4 et 1,7. En cas d'incapacité à vérifier la densité réelle, il est recommandé de retenir pour les éventuels calculs de descentes de charge la valeur la plus défavorable.

3.1.1.2 Préparation des mélanges

La production des briques et mortiers de terre crue commence par le mélange des matières premières – terres, éventuels adjuvants (paille, sable, etc.) et eau – dosées selon les préconisations obtenues lors des essais de mise au point. Voir la section « 3.2 Essais terres et matériaux transformés ».

Le mélange se fait le plus souvent au pied, par foulage énergique et répété, mais il peut aussi être réalisé à l'aide d'animaux ou de machines.

Le mélange doit aboutir à un ensemble parfaitement homogène afin de garantir tant la qualité des matériaux transformés que la solidité des ouvrages réalisés. Une bonne terre mal mélangée donnera généralement des produits transformés et ouvrages médiocres, voir mauvais.

Le mélange doit être laissé au repos un certain temps avant d'être utilisé ; il faut donc anticiper sa préparation. Par exemple un premier trempage/foulage aura lieu à J1 pour une utilisation à J2 après un nouveau trempage/foulage juste avant utilisation.

Insérer fiche « S3 – 1.1 »

3.1.1.3 Contrôle qualité

Plus les chantiers sont de taille importante et plus il est recommandé de réaliser des contrôles réguliers des matériaux pendant le chantier, afin de s'assurer que ces derniers maintiennent le niveau performanciel requis.

Les contrôles sont réalisés à l'aide d'essais. Voir la section « 3.2 Essais terres et matériaux transformés ».

3.1.2 Briques crues, ou adobes

3.1.2.1 Définition

Les briques crues utilisées par le concept technique VN, aussi appelées adobes, sont produites à l'aide de moules dans lesquels le mélange préparé à cet effet est déversé de façon homogène, puis immédiatement démoulées et laissées à sécher au soleil. Aucune cuisson, ni compression, ni aucun ajout de liant hydraulique n'interviennent dans la production.

3.1.2.2 Conditions de production

Les briques crues sont produites directement à même le sol. Le terrain de production doit être aussi plat que possible et avoir été préalablement nettoyé à cet effet.

Il est recommandé que la face supérieure des briques soit striée à la main avant démoulage afin d'accroître l'adhérence entre briques et mortier.

Tant qu'elles ne sont pas suffisamment sèches, les briques ne doivent pas être déplacées, uniquement tournée sur leur tranche au bout de quelques jours afin d'accélérer leur séchage. La production nécessite donc de vastes terrains.

Selon les dimensions des briques et les conditions climatiques, le séchage peut nécessiter une à trois semaines.

3.1.2.3 Dimensions

Les briques crues peuvent être fabriquées dans une large gamme de tailles et de proportions.

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, ce guide préconise toutefois des briques de dimensions L38 x l17 garantissant des appareillages satisfaisants pour produire des murs de 38 cm, de 60 cm et de 80 cm d'épaisseur.

La hauteur quant à elle varie généralement à l'intérieur du champ $8 > 15$ cm, sachant qu'il est recommandé de travailler avec des briques dont la hauteur est inférieure à la largeur.

3.1.2.4 Adjuvants courants

Les adjuvants les plus courants sont 1/ les fibres naturelles comme la paille ; 2/ le sable. L'un et l'autre sont généralement utilisés pour contrôler la fissuration des briques produites à partir d'une terre ayant une forte teneur en argile. Lorsque les fibres jouent un rôle d'armature, le sable joue un rôle de réduction de la teneur en argile.

Remarques : les fibres naturelles peuvent aussi être utilisées pour produire des briques allégées, mais ces produits spécifiques se situent en dehors du champ applicatif de ce guide.

3.1.2.5 Résistance à la compression (R_c) des briques

Le concept technique Voûte Nubienne utilise des murs porteurs maçonnés dont l'épaisseur minimale est de l'ordre de 60 cm ; les surfaces d'appui sont donc particulièrement importantes et offrent une bonne capacité de portance.

À titre d'exemple, un mur porteur de 6 m de longueur et 0,6 m d'épaisseur, avec un ratio de 40 % de vide constitué de baies de 90 cm de largeur (maximum autorisé), offre une surface d'appui de 21.600 cm². En prenant une valeur de Résistance à la compression (R_c) relativement faible de 1 MPa, la capacité de portance du mur est alors de l'ordre de 2.150 kN.

Prenons un cas particulièrement contraignant :

- Soit ce même mur porteur séparatif situé à rez-de-chaussée et reprenant 2 voûtes adjacentes de 3m30 de portée et chargées à rez-de-chaussée, avec une HNV de 175 cm, plus le prolongement du même mur en étage reprenant lui aussi les 2 voûtes adjacentes de 3m30 de portée et chargées de l'étage, avec une HVN de 150 cm.
- Soit une masse volumique sèche hypothétique de 1.700 kg/m³ (valeur haute pour les adobes) : le total des charges appliquées (charges d'exploitation comprises) est de l'ordre de 1.400 kN.
- Le total des charges appliquées (1.400 kN) reste donc largement inférieur à la capacité de portance du mur (2.150 kN) ayant une valeur R_c de 1 MPa.

Prenons maintenant un cas courant plus représentatif de l'architecture populaire sahélienne :

- Soit toujours le même mur porteur, mais cet fois extérieur et ne reprenant qu'une voûte de 3m30 de portée et chargée, avec une HVN de 150 cm.
- Soit une masse volumique sèche hypothétique de 1.700 kg/m³ (valeur haute pour les adobes) : le total des charges appliquées (charges d'exploitation comprises) est de l'ordre de 545 kN.
- Le total des charges appliquées (545 kN) reste donc très largement inférieur à la capacité de portance du mur (2.150 kN) ayant une valeur R_c de 1 MPa.

Partant de ces cas représentatifs concrets, il est recommandé pour le concept technique VN de produire des briques dont la valeur minimale de R_c est 1,5 MPa, valeur conservatrice assurant une bonne marge de sécurité.

Vérification : le test simple de rupture consistant à monter sur 1 brique supportée par 2 autres briques (3.2.5.3 Essai de rupture des briques) permet de vérifier sans matériel la résistance des briques, y compris sur le plan de la compression, considérant le ratio admis de 1 pour 10 entre rupture et compression. Pour des chantiers courants, ce simple test suffit généralement. Pour des cas moins courants, des essais de rupture à la flexion et de résistance à la compression peuvent être réalisés (en laboratoire pour le 2nd).

3.1.2.6 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiches « S3 – 1.2 ; 1.3 ; 1.4 ; 1.5 ; 1.6 »

3.1.3 Mortier

3.1.3.1 Définition

Le mortier est le matériau de liaison entre les briques ; il forme horizontalement l'assise de chaque rang de briques, et verticalement les joints entre les briques. Aucune cuisson, ni compression, ni aucun ajout de liant hydraulique n'interviennent dans sa production.

3.1.3.2 Composition

Pour un ouvrage maçonné donné, il est recommandé que le mortier soit de même composition que les briques.

Pour une bonne relation mortier/briques, le mortier ne doit pas contenir de granulats de diamètre supérieur à la moitié de l'épaisseur des joints, en tenant compte des variables et irrégularités des dits joints. Il faut donc retenir l'épaisseur de joint la plus faible attendue.

3.1.3.3 Consistance

Le mortier ne doit être ni trop dur/sec ni trop mou/humide. S'il est trop dur/sec l'adhérence briques/mortier est défaillante ; s'il est trop mou/liquide les briques s'affaissent excessivement lors de leur pose et le risque de rétractation au séchage est plus important.

Le mortier de bonne consistance permet donc une bonne assise des briques avec une bonne adhérence au mortier sans affaissement excessif.

3.1.3.4 Adjuvants courants

Comme pour les briques, les adjuvants les plus courants sont les fibres naturelles comme la paille, et le sable. L'un et l'autre sont généralement utilisés pour contrôler la fissuration des mortiers produits à partir d'une terre ayant une forte teneur en argile. Lorsque les fibres jouent un rôle d'armature, le sable joue un rôle de réduction de la teneur en argile.

3.1.4 Cohésion briques/mortier

Les briques et le mortier mis en œuvre doivent correctement adhérer l'un à l'autre pour former un ensemble maçonné cohésif.

Les briques doivent être humidifiées avant leur pose afin de réduire la vitesse de séchage du mortier tout en favorisant la bonne cohésion recherchée.

Pour une cohésion optimale, les joints doivent être parfaitement remplis et ne présenter aucune discontinuité, tant verticale qu'horizontale.

3.2 ESSAIS TERRES ET MATÉRIAUX TRANSFORMÉS

3.2.1 Spécificités contextuelles

Ce guide traite exclusivement du *concept technique Voûte Nubienne* qui utilise des briques et mortiers de terre crue ; les terres utilisées doivent donc répondre aux besoins spécifiques de cette technique et de ces matériaux transformés.

Le choix d'une terre est généralement placé sous la responsabilité du bâtisseur : maçon, artisan ou entrepreneur VN. Il résulte toujours d'une démarche d'identification visant à valider sa convenance pour un couple matériaux transformés + technique.

Le *concept technique Voûte Nubienne* utilise des murs porteurs massifs et des voûtes mises en charge, impliquant un poids d'ensemble considérable. De plus les forces obliques exercées par les voûtes imposent aux murs des contraintes spécifiques. Il faut tenir compte de ces facteurs, les essais réalisés devant notamment et prioritairement permettre de confirmer des valeurs de résistance et de cohésion satisfaisantes pour les matériaux transformés finaux – briques et mortiers de terre crue – mis en œuvre dans le cadre du *concept technique Voûte Nubienne*.

3.2.2 Objectifs des essais

La réalisation d'essais s'avère indispensable afin d'évaluer la convenance d'une terre, mais aussi afin de mettre au point des matériaux transformés, ou encore de les caractériser. Les essais de terrain, simples à réaliser et économiques, permettent d'obtenir de bons résultats et sont généralement suffisant ; les essais de laboratoire ne doivent donc être envisagés que dans les cas où les essais de terrain n'aboutiraient pas à des résultats clairs, ou si certaines caractéristiques spécifiques ne peuvent être vérifier qu'à l'aide de ces derniers.

Il faut aussi rappeler que l'accès aux essais de laboratoire n'est pas toujours possible, ne serait-ce que pour des raisons d'éloignement entre les chantiers et les labos. Qui plus est au Sahel, d'une part les labos ne sont pas toujours en mesure de réaliser les essais requis ; d'autre part leurs coûts s'avèrent généralement incompatibles avec les réalités socio-économiques des utilisateurs majoritaires du *concept technique Voûte Nubienne* : clients et bâtisseurs issus majoritairement du monde paysan.

Le présent guide se limite donc à la description des principaux essais de terrain simples d'utilisation nécessaires à l'identification courante des terres et à la mise au point des briques et mortiers de terre crue utilisés par le *concept technique Voûte Nubienne*.

Il existe de très nombreux autres essais, de terrain et de laboratoire. Ils sont tous très bien décrits dans la documentation technique et normative référente citée au présent guide, en particulier le *Traité de construction en terre* de CRAterre et la norme *NF P13-901*. Ils doivent être consultés autant que de besoin, et notamment dans les cas où les essais de base introduits ici ne donneraient pas de résultats satisfaisants.

3.2.3 Essais d'identification des terres

3.2.3.1 Examen visuel

Objectif : évaluation de la présence de fines.

« On examine à l'œil la terre sèche pour apprécier l'importance de sa fraction sableuse et de sa fraction fine. On enlève les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation. La fraction fine est constituée par les grains d'un diamètre inférieur à 0,08 mm. Ce diamètre se trouve à la limite de la visibilité à l'œil nu. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

Interprétation :

Fraction fine importante = argile probable

Fraction fine faible = argile en quantité probablement insuffisante

3.2.3.2 Essai de l'odeur

Objectif : évaluation de la présence de matière organique.

« On sent la terre que l'on vient d'extraire. Elle est de nature organique si l'odeur évoque le moisi. Cette odeur est amplifiée si on chauffe ou humidifie la terre. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

Interprétation :

Présence marquée de matière organique = terre à écarter

3.2.3.3 Essai de morsure

Objectif : confirmation de la présence d'argile.

Enlever les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation.

« On mord une pincée de terre et on l'écrase légèrement entre les dents. La terre est sableuse si elle crisse avec une sensation désagréable. La terre est silteuse si le crissement ne donne pas une sensation désagréable. La terre est argileuse si l'on éprouve une sensation lisse ou farineuse, ou si une pastille de terre sèche est collante quand on y applique la langue. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

3.2.3.4 Essai de toucher

Objectif : confirmation de la présence d'argile.

« On triture la terre débarrassée de ses plus grosses particules en effritant un échantillon entre les doigts et la paume de la main. La terre est sableuse si l'on éprouve une sensation de rugosité et si elle ne présente aucune cohésion. La terre est silteuse si l'on a l'impression d'une faible rugosité et si l'échantillon humidifié devient moyennement plastique. La terre est argileuse si, à l'état sec, elle présente des mottes ou concrétions qui résistent à l'écrasement et si elle devient plastique et collante lorsqu'elle est humidifiée. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

3.2.3.5 Essai de lavage

Objectif : confirmation de la présence d'argile.

Enlever les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation.

« On se lave les mains avec de la terre légèrement mouillée. La terre est sableuse si les mains se rincent facilement, la terre est silteuse si elle paraît pulvérulente et si les mains ne sont pas trop difficiles à rincer. La terre est argileuse si l'on a une sensation savonneuse et si les mains sont difficiles à rincer. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

3.2.3.6 Essai de l'éclat

Objectif : confirmation de la présence d'argile.

Enlever les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation.

« Une boulette de terre légèrement humide est coupée en deux avec un couteau. Un aspect terne de la surface entaillée indique une terre plutôt silteuse. Un aspect brillant indique que l'on est en présence d'une terre argileuse plastique. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

3.2.3.7 Essai d'adhérence

Objectif : évaluation de la teneur en argile de la terre.

Enlever les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation.

« On prend une masse de terre humide qui ne colle pas aux doigts et on y enfonce une spatule ou un couteau. La terre est très argileuse si la spatule s'enfonce difficilement et si la terre adhère lorsqu'on la retire. La terre est moyennement argileuse si la spatule pénètre sans grande difficulté et si la terre y adhère lorsqu'on la retire. La terre est peu argileuse si l'on pénètre et retire la spatule sans effort même si elle demeure sale lorsqu'on la retire. ». Source : Traité de construction en terre ; fiche 302 Analyses préliminaires ; CRAterre.

3.2.3.8 Essai de cohésion

Objectif : évaluation de la cohésion de la terre.

Enlever les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation.

Humidifier et malaxer un tas de terre dans les mains pour former une boule homogène. Rouler la boule entre les mains pour en faire un long boudin (+/- 20 cm) d'environ 2 cm de diamètre. Pousser délicatement et progressivement le boudin pour le mettre en suspension croissante sur le rebord de la main, et jusqu'à ce que la partie en suspension se sectionne. Mesurer la longueur de la section tombée.

Interprétation :

Section entre 5 et 15 cm de longueur = terre cohésive dans de bonnes proportions

Section inférieure à 5 cm = terre trop peu cohésive

Section supérieure à 15 cm = terre trop cohésive

3.2.3.9 *Fiches du Manuel du Maçon*

Insérer fiche « S3 – 2.1a, b »

3.2.4 *Essais de vérification de la teneur en eau des mélanges de terre*

Un mélange ayant une bonne teneur en eau permet de produire de bonnes briques et de bons mortiers.

> Trop peu d'eau = problèmes de cohésion

> Trop d'eau = problèmes de rétractation excessive ; problèmes d'affaissement

3.2.4.1 *Essai de la barre de fer*

Objectif : évaluer la teneur en eau du mélange pour la production de mortier ou de briques.

Pour chaque mélange en préparation :

- Faire un petit tas de mortier avec la teneur en eau à évaluer ;
- Poser délicatement et verticalement à sa surface une barre de fer à béton Ø10 de 50 cm de longueur ;
- Lorsque la barre de fer arrête de s'enfoncer, l'extraire et mesurer la longueur de la partie enfoncée.

La teneur en eau du mélange est jugée bonne lorsque la partie mesurée fait environ 2 cm.

3.2.5 *Essais de validation des matériaux transformés*

3.2.5.1 *Examen visuel des briques*

Objectif : évaluer l'aspect général des briques et l'uniformité des lots.

- Vérifier la régularité des briques, des arrêtes et la présence des angles > cassure des arrêtes, angles absents, briques déformées = mauvaise technique de moulage > rejeter les lots trop mauvais – travailler avec les briquetiers à l'amélioration de la production.
- Vérifier la tenue générale des briques ; seul un affaissement faible est toléré > affaissement excessif = trop d'eau dans le mélange au moment du moulage > réduire la quantité d'eau ajoutée au mélange – laisser reposer le mélange pour que l'eau s'évapore jusqu'à ce que la teneur en eau soit satisfaisante.
- Vérifier la présence éventuelle de fissures ; seules les petites fissures sont tolérées > nombreuses/grosses fissures = mélange trop argileux > changer de terre ; ou ajouter des fibres ou du sable au mélange.

- Vérifier la cohésion des briques ; les arrêtes et les angles en particulier ne doivent pas s'effriter excessivement > érosion facile = mélange trop sableux ou silteux > changer de terre ; ou ajouter de l'argile.
- Vérifier les dimensions des briques qui doivent restées constantes, avec une tolérance de l'ordre de 2% max. > briques de dimensions trop irrégulières = mauvaise technique de moulage > rejeter les lots trop irréguliers – travailler avec les briquetiers à l'amélioration de la production.

3.2.5.2 1^{er} essai de rupture des briques

Objectif : évaluer la solidité des briques.

Produire un échantillon de 2 ou 3 briques pour chaque terre présélectionnée à l'aide des essais précédents.

Pour chaque échantillon procéder de la sorte :

- Prendre 1 brique bien sèche ;
- La lever à deux mains à hauteur de hanches, face vers le sol ;
- La laisser tomber sur le sol.

L'essai est concluant si la brique ne se casse pas ou si elle se casse en quelques gros morceaux.

> Si la brique se casse en de nombreux morceaux, la terre est probablement trop sableuse ou trop silteuse. Le mélange doit être revu.

3.2.5.3 2nd essai de rupture des briques

Objectif : évaluer la solidité des briques.

Produire un échantillon de 4 ou 5 briques pour chaque terre présélectionnée à l'aide des essais précédents.

Pour chaque échantillon procéder de la sorte :

- Prendre 3 briques bien sèches ;
- Poser 2 briques sur un sol propre et plat et les écarter d'environ 30 cm l'une de l'autre ;
- Placer la 3^{ème} brique sur les extrémités des 2 autres (appuis sur 4/5 cm) ;
- Faire monter une personne de poids moyen (+/- 70 kg) sur le 3^{ème} brique en appui sur 1 pied.

L'essai est concluant si la brique ne casse pas.

> Si la brique cède, la terre est probablement trop sableuse ou trop silteuse. Le mélange doit être revu.

Remarque : cet essai simple de rupture permet de vérifier sans matériel la résistance des briques, y compris sur le plan de la compression, considérant le ratio admis de 1 pour 10 entre rupture et compression. Pour des chantiers courants, ce simple test suffit généralement. Pour des cas moins courants, des essais de rupture à la flexion et de résistance à la compression peuvent être réalisés (en laboratoire pour le 2nd).

3.2.5.4 Essai de cohésion entre briques et mortier

Objectif : évaluer la cohésion entre les briques et le mortier de pose.

Il arrive que les briques et le mortier soient produits à partir de terres différentes. Il est donc très important de vérifier que ces terres sont compatibles et adhèrent bien l'une à l'autre (cohésion), car il arrive que deux terres apparemment de bonne qualité ne fonctionnent pas bien ensemble.

Produire un échantillon d'une dizaine de briques et d'un tas de mortier de pose pour chaque terre présélectionnée à l'aide de l'essai de solidité des briques.

Pour chaque échantillon, procéder de la sorte :

- Le jour 1, bâtir un muret fermé (boucle), constitué de 8 briques maçonnées sur deux rangs ;
- Les briques sont posées en panneresse et les joints horizontaux font 3 cm d'épaisseur en moyenne ; toutes les règles de maçonnerie données dans ce guide sont ici respectées ;
- Laisser l'ouvrage sécher jusqu'au jour 2 ;
- Sur l'ouvrage sec, taper au poing de façon énergique au niveau des 2^{ème} rang.

Si la brique frappée cède facilement et détache peu ou pas de mortier, les briques et le mortier ne sont pas compatibles ! Il faut changer de terre (l'une, l'autre ou les deux) et refaire l'essai jusqu'à obtenir un bon résultat.

Si la brique frappée cède difficilement et entraîne avec elle des parties de mortier, les briques et le mortier sont compatibles car l'adhérence est bonne.

3.2.5.5 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S3 – 2.2a, b »

3.3 AUTRES MATÉRIAUX

Le *concept technique Voûte Nubienne* utilise principalement la terre crue comme matériau de construction. Mais il utilise aussi d'autres matériaux, certains courants, d'autres secondaires.

3.3.1 Autres matériaux courants

L'eau : elle est indispensable à quasiment toutes les étapes de construction, et en particulier lors de la production des briques et mortiers de terre crue. Elle est consommée en quantité importante, avec à titre d'exemple environ 0,3 m³ d'eau consommée pour 1 m³ de mortier de terre produit.

Les pierres : elles sont essentiellement utilisées dans les fondations, sous forme de maçonnerie de pierres crues liées au mortier. Les pierres tendres, demi-fermes, fermes, dures et froides sont toutes propices à la réalisation des fondations. Les pierres très tendres sont les seules pierres ne devant à priori pas être utilisées.

La bâche plastique : elle est utilisée comme un élément participant de l'étanchéité des toitures VN ; elle peut aussi servir de barrière capillaire placée à la base des murs en terre ou sous les dallages de sols. Au Sahel, on la trouve généralement sous la forme de rouleaux de film polyane.

Insérer fiche « S3 – 3.1 »

3.3.2 Autres matériaux secondaires

Les blocs de pierre ou de ciment : ces blocs sont principalement utilisés pour leur stabilité à l'eau. Ils sont généralement utilisés soit dans la partie externe exposée des murs et contreforts sous forme de maçonnerie mixte (voir 4.3.2.3 *Les murs dits « mixtes »*), ce qui permet de se passer d'enduit extérieur ; soit au niveau de certaines parties sensibles du bâti (pieds de murs sous forme de soubassement ; murets d'acrotères ou balustrades).

Remarque : il est recommandé de produire des blocs aux mêmes dimensions que les briques de terre afin de permettre de bons appareillages en cas de maçonnerie mixte.

Insérer fiche « S3 – 3.2 »

3.3.3 Tableau des dosages en ciment

Insérer fiche « S3 – 3.3 »

SECTION 4. DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE DU GROS-ŒUVRE

4.1 FONDATIONS SUPERFICIELLES

4.1.1 Références normatives

Les règles normatives relatives aux travaux de fondations superficielles s'appliquent au *concept technique Voûte Nubienne* ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur et en particulier :

- *Eurocode 7 : Calcul géotechnique*
- *NF P 94-261 : Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations superficielles*

4.1.2 Principes

Les règles normatives de calculs s'appliquent à la conception des fondations du *concept technique Voûte Nubienne*, qui doivent être dimensionnées pour résister aux charges qui s'y appliquent et aux réactions induites.

Le *concept technique Voûte Nubienne* est un système constructif complet fonctionnant par empilement d'ouvrages massifs porteurs lourds ; la répartition des charges dans la structure est particulièrement régulière.

Les fondations les plus adaptées au *concept technique Voûte Nubienne* sont les semelles superficielles filantes, réalisées en pleine fouille. Hormis pour certaines grandes ouvertures, les semelles sont poursuivies sous les ouvertures courantes.

Les dimensions des fondations sont déterminées par les deux principaux facteurs suivants :

- La largeur du mur que la fondation reprend > la fondation n'est jamais moins large que le mur qu'elle reprend, et toujours plus large que les murs porteurs sous voûtes, avec débords de part et d'autre du mur ou uniquement du côté du sens de poussée de la voûte.
- La nature du sol sur lequel la fondation repose > la fondation doit reposer sur le bon sol ; la profondeur du bon sol détermine la profondeur de la fouille.

Par ailleurs, les fondations doivent toujours être protégées de l'eau de surface et de l'humidité.

Insérer fiches « S4 – 1.1 ; 1.2 ; 1.3 »

4.1.3 Cas VN courants

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, les systèmes de fondations les plus couramment employés sont :

- Les semelles filantes en maçonnerie de pierres crues liées au mortier de terre, de ciment ou de chaux > première solution utilisée par les artisans VN sahéliens ;
- Les semelles filantes en pisé compacté en pleine fouille > solution utilisée en cas d'indisponibilité des pierres.

Les systèmes de fondations suivants sont aussi possibles mais moins courants (et non décrits dans ce guide) :

- Béton cyclopéen de ciment ou de chaux > moellons ne se touchant pas enchâssés dans un bain de béton ;
- Béton non armé ou béton armé > solutions très couteuses au regard des volumes importants nécessaires.

Remarque : *Les ambiances chaudes et humides favorisent les invasions de termites. En cas de risque connu ou présagé, une barrière chimique en fond de fouille et en périphérie des fondations peut être une bonne solution préventive.*

4.1.4 Cas VN courant n°1 : fondations en maçonnerie de pierres crues liées au mortier

Les fondations en maçonnerie de pierres crues liées au mortier sont celles les plus couramment utilisées par les artisans VN sahéliens. Au Sahel, ces pierres sont généralement dites « sauvages » car ramassées directement sur le sol, avec des dimensions très variables et utilisées brutes (pas de taille ; concassage possible).

Les diamètres des pierres sont généralement compris dans le champ 15/30 cm. Des pierres plus petites pourront servir de cales, alors que de plus grosses sont souvent difficiles à manipuler.

Le principe de cette maçonnerie est que les pierres sont bien assises (pas de pose verticale), calées les unes par rapport aux autres et bloquées à l'intérieur des fouilles. L'appareillage doit être correct afin d'éviter autant que faire se peut les superpositions de joints verticaux. Les pierres les plus grosses doivent être placées prioritairement sur les côtés extérieurs des fondations sous murs porteurs latéraux et dans les angles, en réponse aux poussées obliques exercées par les voûtes.

Le mortier vient simplement combler les vides restant entre maçonnerie ; sa fonction consiste donc essentiellement à étanchéifier l'ensemble à l'eau et à l'air plutôt qu'à liasonner.

La progression dans les fouilles se fait par « étages » avec dépôt soigné du premier rang de pierres en fond de fouilles, coulage du mortier et remplissage des vides, pose soignée du second rang de pierres, coulage du mortier et remplissage des vides, et répétition de l'opération jusqu'au niveau d'arrase, fini au mortier avec nivellement.

Insérer fiche « S4 – 1.4 »

4.1.4.1 Pierres

Les pierres tendres, demi-fermes, fermes, dures et froides sont toutes propices à la réalisation de ces ouvrages. Les pierres très tendres sont les seules pierres ne devant a priori pas être utilisées pour la réalisation de telles fondations.

4.1.4.2 Mortier

Le mortier le plus couramment utilisé et le plus accessible est le mortier de terre dont les caractéristiques sont identiques à celles des mortiers utilisés pour les murs ; mais il est aussi possible d'utiliser un mortier sable-ciment ou sable-chaux.

4.1.5 Cas VN courant n°2 : fondations en pisé

Les fondations en pisé sont la principale alternative recommandée en cas d'indisponibilité des pierres. Elles sont réalisées en pleine fouille en respectant les préconisations techniques propres au pisé, et en particulier :

- Les mélanges devant être recherchés sont idéalement des mixes de terre argileuse, de sable, et de gravier selon les proportions 1/1/1 ;
- Le mélange doit être bien homogène, avec un ajout d'eau limité aboutissant à un état humide ; si le mélange est trop chargé en eau, le taux de compactage sera insuffisant et la fondation ne sera pas portante ;
- Le mélange est déversé en fond de fouille sur une épaisseur uniforme d'environ 15 cm, puis compacté manuellement à l'aide de dames ;
- Le compactage commence par les bords et se poursuit au centre ;
- Le compactage commence avec une énergie douce et se poursuit en augmentant la force progressivement ;
- Le compactage est jugé à son maximum selon le son observé, qui doit tendre vers une note « métallique » ; c'est l'expérience qui permet de reconnaître le bon son ;
- Le processus est répété couche après couche jusqu'à atteindre le niveau d'arrase prévu pour la fondation.

Remarque : il est préconisé d'installer un film plastique en fond et parois de fouilles avant la mise en œuvre de la semelle en pisé afin de protéger cette dernière contre l'humidité.

Insérer fiche « S4 – 1.5 »

4.2 SOUBASSEMENTS

4.2.1 Principes

De façon générale, la base extérieure des murs en terre est une zone très exposée, particulièrement à l'eau : passage ponctuel, rejaillissement, capillarité, etc.

Plus la pluviométrie est importante et plus les agressions seront potentiellement importantes, justifiant d'y apporter des réponses techniques protectrices permettant de s'en prémunir. Si un simple enduit traditionnel en terre offre une protection de base minimum efficace impliquant un entretien régulier, diverses solutions alternatives offrent une protection plus pérenne et peuvent être préconisées.

Une solution très courante au Sahel consiste en la mise en œuvre de masses d'usure débordantes, souvent réalisées avec le même matériaux terre que les murs. Ces ouvrages servent parfois d'assise (banc maçonné).

Insérer fiche « S4 – 2.1 »

Une autre solution intéressante et relativement économique consiste en l'utilisation de matériaux peu sensibles à l'eau sur la partie externe des murs, à leur base, offrant une surface antiérosive satisfaisante à l'aplomb du mur ou débordante. Les matériaux utilisés pourront être par exemple les briques pleines de ciment ou les Briques de Latérite Taillées (BLT) courantes au Sahel, mais aussi des ouvrages coulés de type béton ou béton cyclopéen.

Enfin, une autre solution courante et efficace consiste à traiter la totalité de la base du mur avec des matériaux peu sensibles à l'eau : briques pleines de ciment ou Briques de Latérite Taillées (BLT) ; ouvrages coulés de type béton ou béton cyclopéen.

La hauteur des ouvrages formant soubassement doit être déterminée au cas par cas, en tenant compte de la pluviométrie, de la situation du mur concerné (exposition, gouttières à l'aplomb, etc.) et de la nature du terrain. Au Sahel, une hauteur équivalente à 1 ou 2 rangs de maçonnerie couvrira la plupart des cas de figure.

4.2.2 Cas VN courants

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, les soubassements, si préconisés, sont partiels ou complets, et filants. Les plus couramment employés sont :

- Les maçonneries de briques spéciales (briques pleines de ciment ; Briques de Latérite Taillées ; moellons taillés) en emprise partielle (maçonnerie mixte) ou complète > solution privilégiée par les artisans VN sahéliens en incapacité de réaliser des coffrages ;
- Le béton cyclopéen de ciment ou de chaux (pierres ne se touchant pas enchâssés dans un bain de béton) en emprise partielle (maçonnerie mixte) ou complète > solution privilégiée par les artisans VN sahéliens en capacité de réaliser des coffrages ;

Les options suivantes sont aussi possibles mais moins courantes (et non décrites dans ce guide) :

- Maçonneries de pierres crues liées au mortier de terre, de ciment ou de chaux > plus adapté aux soubassements en emprise complète et de hauteur équivalente au minimum à 2 rangs ;
- Béton non armé ou béton armé > solutions couteuses au regard des volumes importants nécessaires.

4.2.3 Cas VN courant n°1 : soubassements en maçonnerie de briques spéciales

Les soubassements en maçonnerie de briques spéciales sont des ouvrages classiques de maçonnerie de petits éléments, très similaires aux murs courants utilisés dans le *concept technique Voûte Nubienne* et décrits dans ce guide. Les règles d'appareillage en particulier sont identiques.

La principale différence porte sur la nature des matériaux utilisés, qui ne sont plus ici des matériaux en terre crue :

- Les briques sont dites spéciales, les plus courantes étant 1/ la brique pleine de ciment, avec des dosages en ciment qui peuvent être légers (150 kg par m3 suffisent) ; 2/ les Briques de Latérite Taillées (BLT) qui sont couramment utilisées au Burkina Faso par exemple.
- Les mortiers terre sont remplacés par des mortiers de ciment afin de conférer à l'ensemble de l'ouvrage la stabilité à l'eau requise.

En cas de soubassement mixte, la partie interne des murs est traitée en maçonnerie de briques et mortier de terre crue, alors que la partie externe est donc traitée en maçonnerie de briques spéciales et mortier de ciment.

Si le soubassement est complet, c'est la totalité de l'assise qui est traitée en maçonnerie de briques spéciales et mortier de ciment.

Important : les briques spéciales doivent autant que possible être produites aux mêmes dimensions que les briques de terre utilisées pour les murs afin que les appareillages « cohabitent » correctement. Pour les briques de ciment, concevoir un moule spécial ou utiliser le moule des briques de terre ; pour les BLT, indiquer les dimensions souhaitées aux artisans en charge de l'extraction.

Insérer fiche « S4 – 2.2 »

4.2.4 Cas VN courant n°2 : soubassements en béton cyclopéen

Les soubassements en béton cyclopéen sont des ouvrages coffrés consistant en un enchâssement de pierres dans un bain de béton. Les pierres ne doivent pas se toucher ; elles sont entièrement enrobées par le béton.

Les principales étapes de mise en œuvre à respecter sont :

- Mettre en place le coffrage ;
- Couler le béton sur une épaisseur adaptée à la taille des pierres et à la hauteur du soubassement à réaliser ; le coulage se fait généralement en plusieurs couches successives ;
- Mettre en place les pierres dans le bain de béton en prenant soin qu'elles ne se touchent pas entre elles ; l'enrobage doit être au minimum de 3 cm ;
- Répéter l'opération jusqu'à l'atteinte du niveau d'arrase prévu du soubassement ;
- Décoffrer après un temps de séchage de 24 à 48 h selon les conditions météo.

Les diamètres des pierres sélectionnées sont généralement compris dans le champ 10/15 cm. Pour des soubassements de dimensions courantes, des pierres plus grosses ne seraient pas correctement enrobées.

En cas de soubassement mixte, la partie interne des murs est traitée en maçonnerie de briques et mortier de terre crue, et est réalisée avant le béton cyclopéen, servant ainsi de coffrage perdu.

4.2.4.1 Pierres

Les pierres tendres, demi-fermes, fermes, dures et froides sont toutes propices à la réalisation de ces ouvrages. Les seules pierres ne devant à priori pas être utilisées pour la réalisation de telles soubassements sont donc les pierres très tendres.

4.2.4.2 Bain de béton

Le bain de béton le plus couramment utilisé est un béton de ciment dosé à 250 kg/m³ ; mais il est aussi possible d'utiliser un béton de chaux.

Insérer fiche « S4 – 2.3 »

4.3 MURS

4.3.1 Principes

Les murs employés par le *concept technique Voûte Nubienne* ont été calibrés pour répondre aux sollicitations mécaniques que les matériaux et le système constructif employés leur imposent. Ils sont traités selon les règles de l'art applicables aux maçonneries de petits éléments, notamment en termes de contrôle des alignements, niveaux et aplombs.

Les murs sont tous réalisés en maçonnerie de briques de terre crue de dimensions courantes hourdées au mortier de terre crue. Les règles données aux sections « 3.1 *Briques et mortiers* » et « 3.2 *Essais terres et matériaux transformés* » s'appliquent et doivent être consultées.

4.3.2 Typologies et dimensionnements

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, les murs couramment utilisés sont de deux types :

- Les murs porteurs, sur lesquels les voûtes reposent ;
- Les murs pignon et de refend, qui arrêtent et/ou recoupent les murs porteurs et les voûtes.

4.3.2.1 Les murs porteurs

Prise en compte de la Hauteur de Naissance de Voûte (HNV) :

- Les murs porteurs font au minimum 60 cm d'épaisseur lorsque la HNV est inférieure ou égale à 175 cm.
- Pour une HNV supérieure à 175 cm, les murs porteurs doivent être portés à 80 cm d'épaisseur minimum, et des opérations de vérification de la stabilité peuvent s'avérer nécessaires.

Important : *plus la HNV est haute et plus les poussées obliques exercées sur les murs sont impactantes. En cas de doute, il faut toujours soit réduire la HNV, soit épaissir les murs.*

Remarque : *il est recommandé de déterminer la HNV selon l'assise d'un rang. Cela permet d'éviter des découpes de briques fastidieuses au regard de l'épaisseur imposante des murs porteurs. Par exemple pour un rang de 17 cm de hauteur (épaisseur de brique de 14 cm + joint horizontal de 3 cm), on peut déterminer que la HNV est située sur le rang n°10, ce qui correspond à 170 cm.*

Quelle épaisseur de murs en cas d'étage (R+1) ? :

- Si la voûte en étage est bordée à rez-de-chaussée par des voûtes adjacentes, les murs porteurs font au minimum 60 cm d'épaisseur. Dans ce cas de figure, trois voûtes sont construites à rez-de-chaussée et permettent de monter une voûte en étage à l'aplomb de la voûte centrale du rez-de-chaussée.
- Si la voûte en étage n'est pas bordée à rez-de-chaussée par des voûtes adjacentes, ou n'est bordée que d'un côté, le ou les murs porteurs externes doivent être portés à 80 cm d'épaisseur minimum, à minima à rez-de-chaussée.

4.3.2.2 Les murs pignon et de refend

L'épaisseur des murs pignon et de refend est déterminée par la longueur des briques de terre utilisées, et au minimum 38 cm.

La hauteur des murs pignon et de refend est déterminée par la hauteur cumulée des « *murs porteurs + voûtes + contreforts de mise en charge des voûtes* » auxquels ils s'accrochent.

4.3.2.3 Les murs dits « mixtes »

Afin de permettre une meilleure accroche de certains enduits ou de supprimer tout besoin d'enduit sur les murs extérieurs, il est possible de réaliser des murs dits « mixtes ». Cela consiste à utiliser dans la partie extérieure des murs (celle qui est exposée) des briques spéciales : Brique de Banco Surface Cailloux (BBSC – avec enduits sable-ciment) ; Briques de Latérite Taillé (BLT – sans enduit) ; moellons de pierre taillés ; etc.

Les briques spéciales utilisées doivent avoir les mêmes dimensions que les briques de terre (à minima la même épaisseur) et leur pose respecte les règles d'appareillage. Elles sont généralement posées au mortier de terre comme le reste de l'ouvrage. En fin de construction, les BBSC reçoivent un enduit sable-ciment et les autres types de briques (briques de latérite taillées, autres pierres, etc.) sont rejointoyées au mortier de ciment.

4.3.2.4 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S4 – 3.1 »

4.3.3 Règles d'appareillage

Les règles générales d'appareillage utilisées par le concept technique VN sont les suivantes :

- Les dimensions des briques sont déterminées de sorte que : $2 \text{ largeurs} + 1 \text{ joint} = 1 \text{ longueur}$;
- Les briques sont toujours posées soit en panneresse, soit en boutisse, soit en parpaing. La pose en carreau n'est pas permise ;
- Les appareils sont obtenus en utilisant des modules de briques dits $3/4$ et $1/2$, en particulier dans les angles afin de permettre un décalage approprié d'un rang sur l'autre ;
- Le chevauchement des briques d'un rang à l'autre ne doit pas être inférieur à 25 % ni être supérieur à 75 % de la longueur de la brique ;
- Les joints verticaux ne doivent jamais être alignés d'un rang à l'autre, et une attention particulière doit être portée aux angles qui sont généralement des parties d'ouvrages particulièrement sollicités sur le plan structurel ;
- Les joints horizontaux doivent être dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur afin de tenir compte de la possible irrégularité des briques. Cela permet une certaine variation d'épaisseur du joint tout en évitant que certaines briques ne soient en contact direct d'un rang à l'autre.

Insérer fiches « S4 – 3.2a, b, c ; 3.3 ; 3.4 ; 3.5 ; 3.6 »

4.3.4 Barrière capillaire

Une barrière capillaire permet de bloquer les remontées d'humidité depuis le sol vers les murs en terre crue, et participe donc du maintien des murs à l'état sec. En général, il s'agira soit d'un film polyane, soit d'un film bitumineux, soit d'un mortier hydrofuge.

L'installation d'une telle barrière capillaire à la base des murs en terre crue est recommandée en particulier dans les cas suivants :

- 1/ En cas de présence d'humidité dans le sol ;
- 2/ En cas d'application d'enduits peu perméables à la vapeur d'eau (sable-ciment, stabilisé au bitume, etc.) à l'extérieur, à l'intérieur ou les deux.

Si le mur en terre repose directement sur la fondation, la barrière capillaire est installée sur l'arrase de la fondation ; si par contre un soubassement s'intercale entre la fondation et le mur en terre, la barrière capillaire est généralement installée sur l'arrase du soubassement.

Remarque : En milieu sahélien où le climat est particulièrement sec, le recours à une barrière capillaire n'est pas systématique. En cas de doute, il est toutefois préférable de la prévoir.

Insérer fiche « S4 – 3.7 »

4.4 OUVERTURES

4.4.1 Principes

Les ouvertures utilisées par le *concept technique Voûte Nubienne* sont typiques des ouvertures dans les maçonneries en terre crue et respectent les règles courantes qui s'y appliquent.

On distingue les ouvertures réalisées dans les murs porteurs – qui reprennent les voûtes chargées et sont donc très sollicitées – des ouvertures réalisées dans les murs pignon et de refend – qui ne « portent qu'eux-mêmes » et sont donc moins sollicités.

Plus le mur est sollicité et plus il faut être prudent avec les ouvertures, afin d'éviter l'apparition de pathologies structurelles liées par exemple à des ouvertures trop grandes, ou bien trop rapprochées les unes-des-autres et/ou des angles.

Dans tous les cas, les appareillages au droit des tableaux de baies doivent être particulièrement soignés.

4.4.2 Dimensionnement des ouvertures dans les murs porteurs

4.4.2.1 Ouvertures courantes

Quatre règles importantes doivent être respectées pour dimensionner les ouvertures dans un mur porteur :

- Règle 1 : largeur maximale = 90 cm
- Règle 2 : longueur minimale de mur entre deux ouvertures = longueur de la plus grande ouverture plus 20 cm
- Règle 3 : au moins 100 cm entre un angle externe et une ouverture
- Règle 4-A : pour les murs extérieurs, respecter un ratio de 1/3 d'ouvertures pour 2/3 de pleins
- Règle 4-B : pour les murs intérieurs, respecter un ratio de 2/5 d'ouvertures pour 3/5 de pleins

4.4.2.2 Grandes ouvertures

Les grandes ouvertures dans les murs porteurs sont possibles mais elles imposent de recourir à des ouvrages atypiques dont les spécificités ne sont pas traitées par le présent guide. En cas de nécessité de recourir à de tels ouvrages, les principes suivants sont ici rappelés à titre informatif :

- Les bâtiments VN pèsent très lourd, et l'essentiel des charges est repris par les murs porteurs ;
- Plus les ouvertures sont grandes et/ou nombreuses dans un mur porteur, plus les parties pleines portantes sont réduites et plus les charges qui s'y appliquent augmentent ;
- Les maçonneries d'adobes du *concept technique Voûte Nubienne* doivent assurer une résistance à la compression de l'ordre de 1,5 Mpa. Il est donc possible que dans le cas de grandes ouvertures, les murs ou piliers maçonnés soient sollicités au-delà de ces valeurs ;
- Concevoir de grandes ouvertures dans les murs porteurs nécessite donc de prendre en compte ces différents facteurs et de démontrer que l'ouvrage est stable et sûr.

Si de nombreuses options de formes et de dimensionnements sont possibles, les plus courantes sont :

- Les arcades maçonnées plein-cintre ou surbaissées ;
- Les systèmes poteaux-poutres en béton armé.

4.4.2.3 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S4 – 4.1 »

4.4.3 Dimensionnement des ouvertures dans les murs pignon et de refend

4.4.3.1 Ouvertures courantes

Deux règles doivent être respectées pour dimensionner les ouvertures courantes (jusqu'à 100 cm) dans un mur pignon ou de refend :

- Règle 1 : au moins 40 cm de plein au droit des angles intérieurs
- Règle 2 : au moins 40 cm de plein entre 2 ouvertures

4.4.3.2 Grandes ouvertures

Deux règles doivent être respectées pour dimensionner les grandes ouvertures (jusqu'à 330 cm) dans un mur pignon ou de refend :

- Règle 1 : au moins 55 cm de plein au droit des angles intérieurs, portant l'ouverture à 220 cm maximum
- Règle 2 : en cas d'ouverture supérieure à 220 cm, il faut soit avoir des voûtes latérales de part et d'autre de l'ouverture, soit venir renforcer les angles avec des contreforts maçonnés.

4.4.3.3 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiches « S4 – 4.2a, b »

4.4.4 Autres fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiches « S4 – 4.3 ; 4.4 ; 4.5 »

4.4.5 Protection des appuis d'ouvertures donnant sur l'extérieur

4.4.5.1 Principes

Les appuis d'ouvertures donnant sur l'extérieur sont, de par leur position, des ouvrages particulièrement exposés aux risques d'érosion. Ils doivent toujours être traités avec grand soin afin d'éviter de possibles désordres, en particulier ceux liés à l'eau. Ils concernent généralement les fenêtres, mais peuvent aussi concerner certaines portes, renvoyant à la notion de seuil. Selon les cas, il peut s'avérer utile de les traiter en matériaux « durs » non sujets à l'érosion.

Il existe de nombreuses options de matériaux et de formes ; les choix sont à faire en fonction des ressources locales, mais aussi des conditions d'exposition, ou encore de la présence ou non d'une menuiserie et de la position de cette dernière. On retiendra en particulier les traitements courants suivants, allant du plus simple au plus complexe :

- 1/ Appuis en briques et mortier de terre crue, protégés par un enduit antiérosif > en cas d'absence de menuiserie, à n'utiliser que sur les façades non exposées ; pour les façades exposées, prévoir des menuiseries posées au nu extérieur, avec une pente orientée vers l'intérieur.
- 2/ Appuis en briques spéciales (ciment, latérite taillée, pierre, etc.) et joints verticaux traités au mortier de ciment, protégés par un enduit antiérosif > toutes expositions ; avec ou sans menuiserie ; tous types de pose des menuiseries ; pente vers l'extérieur, sauf si la menuiserie est posée au nu extérieur.
- 3/ Appuis en béton non armé de 4/5 cm d'épaisseur, coulé en place avec une légère inclinaison, encastré de part et d'autre du tableau et protégé par un enduit antiérosif > toutes expositions ; avec ou sans menuiserie ; tous types de pose des menuiseries ; pente vers l'extérieur, sauf si la menuiserie est posée au nu extérieur.
- 4/ Appuis en béton armé de 7/8 cm d'épaisseur, coulé en place avec une légère inclinaison, débord et goutte d'eau côté extérieur, encastré de part et d'autre du tableau ; l'enduit du mur meure en sous-face de l'appui > toutes expositions ; avec ou sans menuiserie ; si menuiserie, pose uniquement au nu intérieur ; pente vers l'extérieur.

4.4.5.2 Cas VN courant n°1 : appuis d'ouverture en briques et mortier

Les appuis d'ouverture en briques et mortier sont traités selon les règles de l'art applicables aux maçonneries de petits éléments, notamment en termes de contrôle des alignements, niveaux et aplombs. Une légère pente doit toujours être prévue ; elle est orientée vers l'extérieur, sauf en cas de menuiserie posée au nu extérieur.

Si les appuis sont réalisés en maçonnerie de briques de terre crue de dimensions courantes hourdées au mortier de terre crue. Les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées.

4.4.5.3 Cas VN courant n°2 : appui d'ouverture en béton coulé en place

Les appuis d'ouvertures en béton coulé en place sont des ouvrages réalisés selon les règles courantes de mise en œuvre des bétons, en tenant compte du fait que de par leur position et leur rôle ils sont peu sollicités sur le plan structural et ne nécessitent donc pas des dosages en ciment élevés.

Ils sont encastrés de part et d'autre du tableau et peuvent ou non être débordants et revêtus.

Les principales étapes et recommandations de mise en œuvre sont les suivantes :

- 1/ Préparation du support : creuser latéralement le tableau sur environ 10 cm ; creuser la partie supérieure des joints verticaux pour accueillir le béton ; nettoyer ;
- 2/ Mise en place du coffrage aux dimensions requises selon les règles de l'art ; ils sont généralement traités en bois, mais peuvent aussi être traités en acier ;
- 3/ Si le béton est armé : préparation et mise en place du ferrailage (maillage carré ou rectangulaire en fers à béton de diamètre 8) : utiliser des cales et assurer un enrobage minimum de 3 cm ;

- 4/ Préparation du béton selon le dosage recommandé de 250 kg de ciment par m³ ;
- 5/ Arrosage du support puis coulage et réglage du béton ;
- 6/ Arrosage régulier du béton pendant le séchage ;
- 7/ Décoffrage après 24 à 48h selon les conditions météo.

4.4.5.4 *Fiches du Manuel du Maçon*

Insérer fiche « S4 – 4.6 »

4.5 CÂBLE-COMPAS

4.5.1 Principes

Le câble-compass est le guide mobile utilisé pour accompagner la mise en œuvre de la voûte, mais aussi celle de la plupart des arcs coiffants les ouvertures dans les murs porteurs. Il permet de façon simple et dynamique de visualiser le bon positionnement des briques utilisées dans la mise en œuvre de ces ouvrages maçonnés.

Le câble-compass est constitué :

- D'un câble tendu fixé dans les murs pignon ou de refend, à l'axe de la voûte et à la Hauteur de Naissance de Voûte (HNV) ; son niveau est réglé ;
- De trois cordeaux mobiles enchâssés sur le câble tendu, dont la longueur est égale à la demie portée de la voûte : pour une voûte de 330 cm, les cordeaux font 165 cm ;
- Les cordeaux sont terminés par un gros clou en acier.

Le câble-compass, avec ses trois cordeaux, permet à trois personnes de travailler en même temps sur une voûte : deux personnes sur les côtés et une personne au centre.

Insérer fiches « S4 – 5.1 ; 5.2 »

4.6 VOUTAINS ET ARCADES

4.6.1 Principes

Les arcs sont des ouvrages maçonnés qui travaillent principalement en compression et sont autoportants. De par leur forme, ils transmettent de fortes poussées sur les ouvrages maçonnés qui les reprennent, en particulier les appuis et les pieds droits. Les règles de dimensionnement des ouvertures dans les murs, données à la section « 4.4 Ouvertures », tiennent compte de cette particularité.

Le *concept technique Voûte Nubienne* utilise des arcs pour franchir toutes les baies intérieures et extérieures (portes et fenêtres). Ces arcs sont le plus souvent de forme dite plein-cintre, c'est donc cette forme spécifique qui est décrite dans ce guide. Mais d'autres formes sont tout à fait possibles : arc surbaissé, en anse-de-panier ou brisé notamment.

4.6.2 Coffrage

La première étape de réalisation d'un arc consiste en la conception et la mise en place du coffrage. Ce dernier est la structure provisoire de forme équivalente à l'intrados de l'arc à bâtir, et servant de support pendant la mise en œuvre de ce dernier.

Le coffrage peut être réalisé en acier, en bois ou même en briques de terre posées à joints secs ou encore à l'aide d'un fût de 200 l (très pratique pour des ouvertures de tailles courantes). Il doit être suffisamment solide pour ne pas subir de déformation pendant la mise en œuvre de l'arc.

Insérer fiche « S4 – 6.1 »

4.6.3 Mise en œuvre

Les arcs sont réalisés en maçonnerie de briques d'adobe hourdées au mortier de terre. Les règles données aux sections « 3.1 *Briques et mortiers* » et « 3.2 *Essais terres et matériaux transformés* » s'appliquent et doivent être consultées.

Les petites briques 25-15-5 sont les plus fréquemment utilisées pour la réalisation des arcs du *concept technique Voûte Nubienne*, avec une mise en œuvre en double rouleau (2 rangs). Mais il est aussi possible d'utiliser des grandes briques avec une mise en œuvre en simple ou en double rouleau (1 ou 2 rangs).

Les arcs sont construits en avançant simultanément depuis les deux extrémités (sommiers de l'arc), jusqu'à rencontre au centre (clé de l'arc). Chaque brique est légèrement plus inclinée que la précédente, et la ou les dernières briques sont généralement taillées et rentrées en force.

Les briques se touchent dans l'intrados de l'arc (en bas) et s'écartent dans l'extrados (en haut). Le joint obtenu dans l'extrados est rempli de mortier et il est recommandé d'y insérer de petits éléments durs servant de cales (cailloux, morceaux de mortier de ciment, etc.). Ce principe de pose permet de réduire les risques d'affaissement et de fissuration liés au décoffrage, au séchage et à la mise en charge des arcs.

Pour les arcs plein-cintre et les arcs surbaissés, l'inclinaison des briques est déterminée par le rayon de l'arc. Il est recommandé d'utiliser un cordeau fixé au cintre pour déterminer le bon angle de pose de chaque brique.

Insérer fiches « S4 – 6.2 ; 6.3a, b, c »

4.7 VOÛTES

4.7.1 Principes

Le concept technique Voûte Nubienne utilise les voûtes pour franchir et couvrir les espaces.

La voûte utilisée par le concept technique Voûte Nubienne est une voûte en berceau entièrement mise en charge, dont l'arc est un plein-cintre légèrement surhaussé en anse-de-panier : la flèche est environ 10 cm plus longue que le rayon du plein-cintre.

Son mode constructif est dit nubien, permettant une mise en œuvre sans coffrage grâce à la combinaison des facteurs suivants :

- Les briques sont petites et légères
- Le mortier est collant et à prise rapide
- Les assises de briques sont inclinées selon un angle de +/- 60 °

4.7.2 Mise en œuvre

Important : la voûte du concept technique Voûte Nubienne n'acquière sa stabilité et sa sûreté qu'après achèvement des travaux, et en particulier après sa mise en charge complète. Cela signifie que pendant sa construction, la voûte présente nécessairement certaines fragilités qui sont liées d'une part à sa forme – car avant la mise en charge de la voûte la ligne de pression sort de l'arc vers l'intrados – et d'autre part au taux d'humidité élevé de l'ouvrage durant sa mise en œuvre. Des mesures de précaution doivent donc être prises pendant la mise en œuvre, et en particulier :

- Se prémunir contre d'éventuelles pluies en prévoyant des bâches de protection qui pourront être déployées en cas d'évènement pluvieux ; et attendre que les ouvrages sèchent suffisamment avant de poursuivre les travaux, notamment ceux de mise en charge.
- Mettre en charge les voûtes de façon symétrique autant que faire se peut afin de limiter au mieux les charges déséquilibrantes (voir 4.8 CONTREFORTS).

4.7.2.1 Règles de base

Les voûtes sont réalisées en maçonnerie de briques d'adobe 25-15-5 hourdées au mortier de terre. Les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées.

D'une assise à l'autre, les briques sont décalées afin de respecter les règles d'appareillage (pas de superposition de joints).

Le câble-compas est utilisé par le maçon pour l'aider à positionner correctement chaque brique en maintenant la régularité du tracé de la voûte. Arrivé à peu près aux 2/3 de la hauteur de la voûte, le maçon

rehausse progressivement la position de chaque brique de 1, puis 2, puis 3, puis enfin 4 doigts au sommet de la voûte, conférant ainsi à l'arc sa forme de plein-cintre légèrement surhaussée en anse-de-panier.

Chaque assise de la voûte doit être construite en avançant simultanément depuis les deux côtés, jusqu'à la rencontre au centre. La dernière brique est généralement taillée et rentrée en force.

Les briques doivent se toucher dans l'intrados de l'arc (en bas) et s'écarter dans l'extrados (en haut). Le joint obtenu dans l'extrados est rempli de mortier et il est possible d'y insérer de petits éléments durs servant de cales (cailloux, morceaux de mortier de ciment, etc.).

4.7.2.2 *Départ de voûte*

Le départ de voûte se fait toujours en prenant appui sur un mur pignon ou de refend sur lequel le tracé de la voûte s'inscrit parfaitement.

Insérer fiche « S4 – 7.1 »

4.7.2.3 *Progression de la voûte*

La progression de la voûte appelle un contrôle régulier de la part du maçon. Il est recommandé, toutes les 3 ou 4 assises, de s'éloigner de l'ouvrage afin de l'observer de loin et sous d'autres angles. Cela permet notamment de vérifier la bonne inclinaison des assises et la bonne horizontalité du sommet.

Insérer fiche « S4 – 7.2 »

4.7.2.4 *Fermeture de la voûte*

La fermeture de la voûte se fait à l'opposé du démarrage, avec un mur pignon ou de refend « dans le dos ». Le manque d'espace et de recul rend le travail moins aisé.

Insérer fiche « S4 – 7.3 »

4.8 CONTREFORTS

4.8.1 Principes

Dans le cadre spécifique du *concept technique Voûte Nubienne*, le terme « contreforts » est employé pour désigner les ouvrages maçonnés massifs élevés à l'aplomb des murs porteurs et épousant les reins de la voûte afin de mettre cette dernière en charge et de participer ainsi de la stabilité tant de la voûte que des murs porteurs.

Sans ces ouvrages, la voûte n'est pas stable ; il est donc obligatoire, d'une part de les réaliser, d'autre part de les réaliser autant que possible de façon symétrique afin que la mise en charge des reins de la voûte se fasse aussi uniformément que possible.

Les contreforts sont traités selon les règles de l'art applicables aux maçonneries de petits éléments, notamment en termes de contrôle des alignements, niveaux et aplombs. Ils sont toujours réalisés en maçonnerie de briques de terre de dimensions courantes hourdées au mortier de terre. Les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées.

Important : la pratique qui consisterait à ne maçonner dans les règles que la partie de contrefort à l'aplomb du mur porteur qu'elle prolonge et à combler la partie accompagnant la courbe de l'extrados de la voûte par du tout-venant est proscrite ! Cette pratique a déjà été observée, engendrant des défauts de mise en charge, des voies d'eau, et donc in fine de graves pathologies.

4.8.2 Typologies et dimensionnements

Dans le cas du concept technique Voûte Nubienne, les contreforts utilisés sont de deux types :

- Les contreforts latéraux, qui mettent en charge une seule voûte ;
- Les contreforts centraux, qui mettent en charge deux voûtes adjacentes.

Dans les deux cas, les ouvrages prennent appui sur les murs porteurs et sont élevés jusqu'à atteindre le niveau de l'extrados de la voûte. La mise en charge des reins de la voûte est donc complète.

En cas d'étage, la section du contrefort située à l'aplomb du mur porteur sur lequel il repose est prolongée verticalement à partir du niveau de l'extrados de la voûte de rez-de-chaussée pour former le mur porteur à l'étage.

Comme pour les murs, les contreforts peuvent être traités en maçonnerie mixte, consistant en l'utilisation, dans la partie extérieure des murs (celle qui est exposée), de briques spéciales : Brique de Banco Surface Cailloux (BBSC – avec enduits sable-ciment) ; Briques de Latérite Taillées (BLT – sans enduit) ; moellons de pierre taillés ; etc.

Les briques spéciales utilisées doivent avoir les mêmes dimensions que les briques de terre (à minima la même épaisseur). Elles sont généralement posées au mortier de terre comme le reste de l'ouvrage. En fin de construction, les BBSC reçoivent un enduit sable-ciment et les autres types de briques (Briques de Latérite Taillées, autres pierres, etc.) sont rejointoyées au mortier de ciment.

4.8.3 Règles d'appareillages

Les règles générales d'appareillages des contreforts sont les mêmes que pour les murs :

- Les dimensions des briques sont déterminées de sorte que : $2 \text{ largeurs} + 1 \text{ joint} = 1 \text{ longueur}$;
- Les briques sont toujours posées soit en panneresse, soit en boutisse. La pose en carreau n'est pas permise ;
- Les appareils sont obtenus en utilisant des modules de briques dits $3/4$ et $1/2$, en particulier dans les angles afin de permettre un décalage approprié d'un rang sur l'autre ;

- Le chevauchement des briques d'un rang à l'autre ne doit pas être inférieur à 25 % ni être supérieur à 75 % de la longueur de la brique ;
- Les joints verticaux ne doivent jamais être alignés d'un rang à l'autre, et une attention particulière doit être portée aux angles qui sont généralement des parties d'ouvrages particulièrement sollicités sur le plan structurel ;
- Les joints horizontaux doivent être dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur afin de tenir compte de la possible irrégularité des briques. Cela permet une certaine variation d'épaisseur du joint tout en évitant que certaines briques ne soient en contact direct.
- Les contreforts viennent s'accrocher aux murs pignon ou de refend en suivant la courbe externe de la voûte ; les appareils au droit de ces jonctions massives doivent être traités avec le plus grand soin.

4.8.4 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiches « S4 – 8.1a, b, c »

4.9 TOITURE

4.9.1 Principes

La voûte du *concept technique Voûte Nubienne* n'est visible que depuis l'intérieur des bâtiments, car elle est entièrement mise en charge afin d'assurer sa stabilité. À l'extérieur, la toiture est donc de type « toiture plate à faible pente », pouvant ou non être accessible selon les besoins et usages du bâtiment.

La sous-section « Toiture » rassemble les différents postes techniques concourant à la mise hors d'eau des toitures du *concept technique Voûte Nubienne*, présentés selon leur ordre chronologique de mise en œuvre :

- La forme de pente maçonnée ;
- Les gouttières ;
- La bâche plastique et la couche de mortier de terre qui la recouvre ;
- Les murets d'acrotère et les balustrades ;
- La finition.

Important : Les toitures, tous types confondus, sont très exposées aux intempéries, tout particulièrement aux pluies. Leur mise hors d'eau est donc indispensable et doit être traitée avec le plus grand soin. Les toitures du *concept technique Voûte Nubienne* n'échappent pas à cette règle, d'autant plus que les ouvrages structurels qui la soutienne (voûte et contreforts) sont réalisés en terre crue et sont donc sensibles à l'eau. Dans tous les cas, elles doivent être contrôlées et entretenues régulièrement.

Remarque : Ce guide propose et décrit en détails une solution complète ayant démontré son efficacité. D'autres solutions sont possibles, mais elles se situent hors du champ d'application de cette documentation.

4.9.2 Forme de pente maçonnée

La forme de pente est réalisée en maçonnerie de briques de terre de dimensions courantes hourdées au mortier de terre. Les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées.

La forme de pente est l'ouvrage principal permettant le drainage des eaux de pluie au niveau de la toiture ; sans une bonne pente, l'eau stagne, s'infiltre et cause des désordres. Elle doit faire au minimum 2 % (2 cm/m), avec une épaisseur minimum de 2 cm en son point le plus bas, au droit des gouttières. Par exemple, pour une course de 6 m de longueur, la pente fera 2 cm d'épaisseur minimum en son point le plus bas, et 14 cm d'épaisseur minimum en son point le plus haut.

Pour faciliter sa mise en œuvre, il est recommandé de suivre les étapes préparatoires suivantes qui détermineront les points hauts et bas de la pente et permettront de guider son tracé :

- Creuser les réservations qui accueilleront les gouttières en bas de pente ;
- Monter un muret maçonné en haut de pente, de hauteur adaptée à la pente (par exemple 1 rang pour une course ≤ 7 m, mais 2 rangs pour une course > 7 m) ; son emprise équivaut à l'emprise du futur muret d'acrotère ou de la future balustrade ;
- Monter les amorces de murets maçonnés latéraux qui serviront de butées latérales lors de la mise en œuvre de la pente ;
- Mettre en œuvre la forme de pente maçonnée à l'aide de guides (par exemple des cordeaux lestés) en s'assurant qu'elle soit bien régulière et sans dépression.

Le choix de l'orientation de la pente dépend principalement de la direction d'arrivée des pluies dominantes lors de la saison des pluies, en recherchant une orientation sous le vent ; en cas d'impossibilité, des adaptations sont alors nécessaires : allongement des gouttières, installation de chutes de large section, protection renforcée des pieds de murs, etc.

Attention : Pour les toitures de grandes dimensions couvrant plusieurs voûtes et/ou de grande longueur, il est recommandé de diviser la toiture, et donc les pentes, en plusieurs surfaces séparées par des murets maçonnés, facilitant ainsi le bon traitement des pentes et les articulations entre elles.

Insérer fiches « S4 – 9.1 ; 9.2a, b »

4.9.3 Gouttières

Les gouttières doivent permettre une parfaite évacuation des eaux de pluie depuis la toiture. Elles doivent donc être particulièrement soignées, en tenant compte des spécificités suivantes :

- Privilégier les formes plates plutôt que rondes, et les larges sections afin de faciliter les raccords d'étanchéité et de réduire les risques d'obturation ;

- Utiliser des matériaux de bonne qualité et éviter les raccords. La tôle galvanisée pliée est généralement une bonne solution ;
- L'enduit de finition de la toiture doit venir mourir en recouvrement des gouttières ;
- Les gouttières doivent être solidement scellées avec une pente minimum de 2 % (2 cm/m) ; elles doivent résister à l'arrachement en cas de vent violent ;
- Le débord des gouttières par rapport à la façade doit être de 45 cm minimums ; un débord supérieur est possible, notamment en cas d'orientation défavorable (face au vent) ou d'étage ;
- Les bas de murs à l'aplomb des gouttières, y compris le sol, doivent être protégés correctement, contrôlés et entretenus régulièrement.

Insérer fiches « S4 – 9.3a, b »

4.9.4 Bâche plastique et couche de mortier de terre

Ces deux postes sont généralement réalisés en même temps, la couche de terre permettant de fixer la bâche plastique au fur et à mesure de sa pose ; à terme la bâche est protégée du rayonnement solaire.

Le terme bâche plastique embrasse une grande diversité de produits, sachant qu'il s'agira souvent au Sahel de rouleaux de film polyane noir disponible à-peu-près partout. Il faut toutefois privilégier les produits de bonne épaisseur, de bonne résistance et suffisamment larges pour faciliter la pose qui se fait généralement par bandes successives.

La pose des bandes commence toujours par le bas de pente, au droit des gouttières, puis progresse vers le haut de pente. Chaque nouvelle bande recouvre la précédente d'au moins 20 cm. La pose doit se faire avec soin afin d'éviter tout percement de la bâche.

La couche de mortier de terre est appliquée progressivement, en recouvrement des bandes plastiques au fur et à mesure de leur pose jusqu'à recouvrement complet de la toiture, à l'exception de réservations périphériques de 20 à 30 cm de largeur qui recevront les maçonneries des murets d'acrotères ou des balustrades.

L'épaisseur de la couche de mortier de terre fait 6 à 8 cm et son application se fait à l'état mou. Pour les caractéristiques du mortier, voir les sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés ».

Insérer fiches « S4 – 9.4a, b »

4.9.5 Murets d'acrotère et balustrades

Les murets d'acrotère sont des ouvrages de faibles hauteur adaptés aux toitures inaccessibles, alors que les balustrades sont hautes (100/110 cm) et permettent la sécurisation des toitures accessibles.

Dans un cas comme dans l'autre, ces ouvrages contribuent grandement à la durabilité des toitures et des murs en assurant la transition entre eux (passage de la verticalité à l'horizontalité) et en participant de la bonne gestion des facteurs érosifs (eau de pluie, vent).

Les murets d'acrotère et les balustrades employés par le *concept technique Voûte Nubienne* sont des ouvrages maçonnés. Ils sont généralement réalisés en briques et mortier de terre crue, auquel cas les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées. Mais ils peuvent aussi être réalisés en briques spéciales. Ils sont dans tous les cas traités selon les règles de l'art applicables aux maçonneries de petits éléments, y compris en termes de contrôle des alignements, niveaux et aplombs.

Insérer fiches « S4 – 9.5 ; 9.6 »

4.9.6 Finitions

La dernière étape de traitement de la toiture consiste en l'application d'un revêtement de finition antiérosif au-dessus de la couche de terre recouvrant la bâche plastique. De très nombreuses solutions techniques sont possibles, à l'exclusion des enduits sable-ciment qui sont proscrits car trop rigides, sujets à fissuration et entraînant presque toujours des désordres liés à l'eau.

De façon non exhaustive, on retiendra les grandes catégories suivantes de revêtements possibles :

- Les enduits « traditionnels » à base de terre, qui peuvent être appliqués à l'état plastique, ou à l'état humide en cas de compactage ;
- Les enduits stabilisés au bitume, qui offrent une bonne tenue dans le temps et sont bien maîtrisés par les artisans VN ;
- Les enduits stabilisés à la chaux, qui offrent aussi une bonne tenue dans le temps ; mais la chaux est rarement disponible au Sahel et ses méthodes d'application sont souvent mal maîtrisées.

Pour aller plus loin : voir la section « 6.1 Enduits ».

Insérer fiche « S4 – 9.7 »

4.10 PROTECTIONS D'ACROTÈRES ET DE BALUSTRADES

4.10.1 Principes

Les acrotères et balustrades sont des ouvrages essentiels du *concept technique Voûte Nubienne* (voir 4.9.5 *Murets d'acrotères et balustrades*) qui, de par leur position, sont particulièrement exposés aux risques d'érosion. Selon la nature des matériaux qui les constituent, il peut s'avérer utile de les agrémenter d'ouvrages rapportés de protection qui prennent généralement la forme de couronnements traités en matériaux « durs » moins sujets à l'érosion. Il existe de très nombreuses options de matériaux et de formes, les choix opérants généralement en fonction des ressources locales. Deux catégories se dégagent :

- Les ouvrages en maçonnerie de petits éléments préfabriqués : briques de ciment ou de terre cuite ; pierres taillées ; etc. > facilité d'approvisionnement/production et de pose ; solutions économiques ;
- Les ouvrages coulés en place : presque toujours des bandeaux en béton armé > plus complexes à mettre en œuvre (coffrage indispensable) mais plus résistant ; solutions moins économiques.

Dans un cas comme dans l'autre, les ouvrages peuvent être soit débordant de part et d'autre de la maçonnerie coiffée – auquel cas les enduits viennent mourir en sous face des débords –, soit à l'aplomb de la maçonnerie coiffée – auquel les enduits les recouvrent.

Une légère pente orientée vers la toiture doit toujours être prévue afin d'assurer le drainage, et en cas de débords, une goutte d'eau est intégrée en sous-face côté façade à minima.

4.10.2 Cas VN courant n°1 : couronnement en dalles préfabriquées en béton de ciment

Le couronnement en dalles préfabriquées en béton de ciment est une solution simple et économique développée par AVN. Elle permet une protection efficace des murets d'acrotère et balustrades réalisées en briques de terre.

Les principales étapes et recommandations de traitement sont les suivantes :

- 1/ Production du moule métallique en tubes carrés creux soudés aux dimensions données à la fiche technique ;
- 2/ Préparation du béton selon le dosage recommandé de 250 kg de ciment par m³ ;
- 3/ Production des dalles au sol, sur une surface lisse et propre ; adapter la quantité en fonction des longueurs d'ouvrages à couvrir ; laisser sécher avant utilisation ;
- 4/ Préparation du support : creuser la partie supérieure des joints verticaux pour accueillir le mortier de pose ; nettoyer ;
- 5/ Préparation du mortier de pose selon le dosage recommandé de 400 kg de ciment par m³ ;
- 6/ Arrosage du support puis pose et réglage des dalles d'angles ;
- 7/ Mise en place des cordeaux, arrosage du support et pose des dalles de remplissage.

Insérer fiches « S4 – 10.1 ; 10.2 ; 10.3a, b »

4.10.3 Cas VN courant n°2 : couronnement en béton armé coffré

Le couronnement en béton armé coffré est un ouvrage réalisé selon les règles courantes de mise en œuvre des bétons, en tenant compte du fait que de par sa position et son rôle il n'est que peu sollicité sur le plan structurel et ne nécessite donc pas de prévoir des dosages en ciment élevés.

Les principales étapes et recommandations de traitement sont les suivantes :

- 1/ Préparation du support : creuser la partie supérieure des joints verticaux pour accueillir le béton ; nettoyer ;
- 2/ Mise en place du coffrage aux dimensions requises selon les règles de l'art ; ils sont généralement traités en bois, mais peuvent aussi être en acier ;
- 3/ Préparation et mise en place du ferrailage (2 ou 3 filants de diamètre 8 + étriers de diamètre 6) : utiliser des cales et assurer un enrobage minimum de 3 cm ;
- 4/ Préparation du béton selon le dosage recommandé de 250 kg de ciment par m³ ;
- 5/ Arrosage du support puis coulage et réglage du béton ;
- 6/ Arrosage régulier du béton pendant le séchage ;
- 7/ Décoffrage après 24 à 48h selon les conditions météo.

Insérer fiche « S4 – 10.4 »

4.11 ESCALIERS

4.11.1 Références normatives

Les règles normatives de conception, dimensionnement et exécution des escaliers s'appliquent aux escaliers utilisés par le *concept technique Voûte Nubienne* ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur et en particulier :

- « *Les escaliers – conception, dimensionnement, exécution : escaliers en bois, métal, verre, maçonnerie, pierre naturelle* », CSTB 2022, collection Guide Pratique.

4.11.2 Spécificités VN

Dans le cas spécifique du *concept technique Voûte Nubienne* tous les types d'escaliers sont possibles a priori, mais les plus courants et ceux décrits dans ce guide sont les escaliers massifs en maçonnerie de brique et mortier de terre crue, qui peuvent être construits tant en extérieur qu'en intérieur. Dans ce second cas, plus complexe, il faut porter une attention particulière aux espaces réservés nécessaires à rez-de-chaussée et à l'étage, ainsi qu'aux arrêts de voûtes nécessaires permettant de former la trémie et de laisser passer l'escalier.

Quelques notions utiles sont rappelées ici :

Notions de dimensionnements :

- Pour obtenir des escaliers ergonomiques : 2 hauteurs de marche + 1 giron = +/- 63 cm
- > Escalier confortable : hauteur de marche 17 cm et giron 30 cm
- > Escalier courant : hauteur de marche 19 cm et giron 25 cm
- > Escalier raide : hauteur de marche 21 cm et giron 19 cm

- Lorsque les escaliers doivent être adaptés aux Personnes à Mobilité Réduite (PMR) et aux principaux Établissements Recevant du Public (ERP) : Giron minimal = 28 cm / hauteur de marche maximale = 17 cm

Notions de conception :

- Vu le volume massif des escaliers maçonnés, réaliser des réservations de type niches couvertes avec des arcs permet des économies de matériaux non négligeables tout en générant des volumes exploitables : rangements, assise, passages, etc. ;
- Les marches sont particulièrement exposées à l'érosion. Pour limiter leur dégradation, il est recommandé de les traiter soit dans la masse avec des matériaux durs (briques de ciment ou de pierre, béton coulé, etc.), soit avec de simples revêtements durs (chape carrelée par exemple).

Notions d'exécution :

- Il est fréquent que les escaliers extérieurs soient adjacents avec un seul mur de bâtiment ; dans ce cas, si l'escalier est construit en même temps que le bâtiment, les maçonneries du mur et de l'escalier sont appareillées ensemble ; par contre si l'escalier est construit à postériori, des ancrages doivent être réalisés afin d'assurer un appareillage à minima.

4.11.3 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiches « S4 – 11.1 ; 11.2 ; 11.3 ; 11.4 »

4.12 CONSTRUIRE UN ÉTAGE

4.12.1 Règles

Les règles de dimensionnements et de mise œuvre d'un étage ne diffèrent pratiquement pas de celles données pour le rez-de-chaussée. Il faut donc se référer à tous les paragraphes précédents, à l'exclusion des fondations et soubassements qui sont absents en étage, en tenant compte des règles spécifiques données ci-après.

4.12.1.1 Règle 1 : superposition

Les murs d'un étage doivent toujours s'appuyer sur les murs d'un rez-de-chaussée, en respectant les typologies de murs : un mur porteur prolonge un mur porteur / un mur pignon ou de refend prolonge un mur pignon ou de refend.

Pour le cas des cloisons lourdes en étage, elles doivent toujours s'appuyer sur un mur de refend à rez-de-chaussée. Ledit mur de refend peut accueillir un grand arc si besoin.

4.12.1.2 Règle 2 : conditions de reprise des poussées à rez-de-chaussée

L'étage doit être repris à rez-de-chaussée par des voûtes adjacentes. En cas d'impossibilité, le ou les murs porteurs du rez-de-chaussée sont épaissis jusqu'à 80 cm minimum.

4.12.1.3 Règle 3 : Hauteur de Naissance de Voûte (HNV)

La HNV en étage ne doit pas dépasser 150 cm.

4.12.1.4 Règle 4 : Dimensionnement des ouvertures

Les règles de dimensionnement des ouvertures fixées à la section « 4.4 OUVERTURES » s'appliquent. Il est recommandé de superposer les ouvertures de l'étage à celles du rez-de-chaussée.

4.12.2 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S4 – 12.1 »

4.13 AGRANDIR UN BÂTIMENT VN EXISTANT

Un bâtiment VN existant peut être agrandi de trois principales façons, consistant toujours en un ajout de nouvelles pièces.

Ces ajouts sont des opérations lourdes et délicates qui doivent être réalisées avec soin et prudence par des ouvriers ayant l'expérience de ce type de travail.

4.13.1 Cas n°1 : ajout d'une voûte dans le prolongement ou perpendiculairement à une voûte existante

La nouvelle voûte construite prend ici entièrement appui sur de nouveaux murs porteurs et semelles de fondations. Le mur partagé avec le bâtiment existant ne lui sert donc jamais de porteur direct, mais uniquement d'accroche d'un ou de plusieurs angles.

Points de vigilance et recommandations pour ce mode d'agrandissement :

- La nouvelle maçonnerie doit toujours reprendre les mêmes appareillages que dans l'existant, en utilisant les mêmes dimensions de briques et de joints permettant de produire les mêmes types de rangs et d'assurer de bons alignements.
- Il est recommandé d'utiliser la même Hauteur de Naissance de Voûte que dans l'existant afin de faciliter les raccords de toiture.

- Les angles des nouveaux murs porteurs doivent correctement s'accrocher à l'existant. Les règles d'appareillage s'appliquent et imposent de creuser des réservations dans l'existant 1 rang sur 2 afin de garantir un bon ancrage. Attention, car cette opération est susceptible de fragiliser l'existant ! Si besoin prévoir des renforts provisoires.
- Les raccords de toiture doivent être bien réfléchis et traités avec le plus grand soin. Selon les cas, un simple raccord donnera satisfaction, ou bien ce sont toutes les couches de finitions de la toiture existante (depuis la forme de pente) qui devront être reprises de concert avec la nouvelle toiture.

Important : *en cas de risque ou de complexité jugés trop élevés (manque d'expérience du maçon ; toitures difficiles à raccorder correctement ; etc.), il est recommandé de construire une nouvelle structure complète et totalement indépendante de l'existant, depuis les fondations. La nouvelle maçonnerie venant s'appuyer sur l'existant forme alors un double mur. Dans ce cas, il est important de traiter avec soin l'étanchéité du joint de séparation dans sa partie haute afin d'empêcher toute infiltration.*

Insérer fiche « S4 – 13.1 »

4.13.2 Cas n°2 : ajout d'une voûte adjacente à une voûte existante

La nouvelle voûte construite partage ici un mur porteur avec la voûte existante. De nombreuses réservations permettent les ancrages des angles, l'appui linéaire de la voûte, et les ancrages du contrefort central étendu. Il s'agit donc d'une opération lourde !

Points de vigilance et recommandations pour ce mode d'agrandissement :

- La nouvelle maçonnerie doit toujours reprendre les mêmes appareillages que dans l'existant, en utilisant les mêmes dimensions de briques et de joints permettant de produire les mêmes types de rangs et d'assurer de bons alignements.
- Les nouveaux murs pignons, et éventuels refends, doivent correctement s'accrocher à l'existant. Les règles d'appareillage s'appliquent et imposent de creuser des réservations dans l'existant 1 rang sur 2 afin de garantir un bon ancrage. Attention, car cette opération est susceptible de fragiliser l'existant ! Si besoin prévoir des renforts provisoires.
- La Hauteur de Naissance de Voûte de l'extension doit être identique à celle de l'existant. Il faut la repérer sur le mur porteur partagé, et démonter partiellement le contrefort existant en escalier. Cela permettra l'élargissement du contrefort après achèvement de la nouvelle voûte.
- S'il existe dans le mur porteur partagé des ouvertures de types niche, fenêtre ou porte, elles doivent être bien repérées à l'avance et les voutains doivent être mis en évidence. Une fois cette opération réalisée, les voutains doivent être partiellement démontés puis élargis afin qu'ils épousent la courbe de la nouvelle voûte.
- Après achèvement des voutains, creuser le mur porteur partagé dans sa longueur à Hauteur de Naissance de Voûte sur une vingtaine de centimètres de profondeur et une quarantaine de centimètres de hauteur afin de créer l'assise de la nouvelle voûte.
- Mettre en œuvre la voûte comme préconisé à la section « 4.7 VOÛTES ».

- Après fermeture de la voûte, le contrefort de mise en charge est complété afin d'épouser la courbure de la nouvelle voûte et de la mettre en charge. Les règles de la section « 4.8 CONTREFORTS » s'appliquent.
- Les raccords de toiture doivent être bien réfléchis et traités avec le plus grand soin. Selon les cas, un simple raccord donnera satisfaction, ou bien ce sont toutes les couches de finitions de la toiture existante (depuis la forme de pente) qui devront être reprises de concert avec la nouvelle toiture.

Important : en cas de risque ou de complexité jugés trop élevés (manque d'expérience du maçon ; toitures difficiles à raccorder correctement ; etc.), il est recommandé de construire une nouvelle structure complète et totalement indépendante de l'existant, depuis les fondations. La nouvelle maçonnerie venant s'appuyer sur l'existant forme alors un double mur. Dans ce cas, il est important de traiter avec soin l'étanchéité du joint de séparation dans sa partie haute afin d'empêcher toute infiltration.

Insérer fiche « S4 – 13.2a, b »

4.13.3 Cas n°3 : ajout d'un étage

La nouvelle voûte construite se pose ici sur une voûte existante située à rez-de-chaussée. Pour connaître les règles de construction d'un étage, voir la section « 4.12 CONSTRUIRE UN ÉTAGE ».

Points de vigilance et recommandations pour ce mode d'agrandissement :

- Le principal challenge de l'opération consiste à réaliser une parfaite implantation de l'étage nouvellement créé sur la maçonnerie existante sur laquelle il va reposer. Il faut donc prendre toutes les mesures nécessaires, tirer des cordeaux et tracer les emprises des murs sur l'existant.
- La seconde étape consiste à déposer toutes les couches de finition de la toiture existante, jusqu'à retrouver la dernière assise des contreforts de mise en charge de la ou des voûtes du rez-de-chaussée. Cette dernière assise doit elle aussi être déposée, dans la limite de l'emprise des nouveaux murs à élever.
- La même opération est réalisée pour les murs pignons, les murs de refend et les cloisons lourdes le cas échéant.
- Une fois les décaissements réalisés, les assises doivent être correctement nivelées et les élévations peuvent débuter.
- Les ouvrages de toiture doivent être correctement repris et raccordés afin de rétablir les bonnes conditions de drainage et d'étanchéité.

Important : en cas de risque ou de complexité jugés trop élevés (manque d'expérience du maçon ; rez-de-chaussée jugés peu sûr ; etc.), il est recommandé de ne pas s'engager dans la construction d'un étage.

Insérer fiche « S4 – 13.3 »

SECTION 5. OUVRAGES CONNEXES

5.1 MENUISERIES

5.1.1 Références normatives

Les règles normatives relatives aux travaux de menuiserie des bâtiments s'appliquent au *concept technique Voûte Nubienne* ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur, et en particulier :

- NF DTU 36.5 Mise en œuvre des fenêtres et portes extérieures

5.1.2 Spécificités VN

5.1.2.1 Fixations

Les menuiseries sont des ouvrages souvent mobiles : ouverture/fermeture ; elles exercent donc des contraintes sur les murs auxquels elles sont fixées. Il faut d'autant plus tenir compte de ce facteur que les maçonneries en briques de terre crue sont tendres et donc relativement fragiles. Un traitement inadapté des fixations est susceptible d'entraîner des désordres, en particulier des problèmes de fissures et de descellements.

Des systèmes de fixation adaptés sont donc à prévoir. On retiendra en particulier :

- La fixation par scellement : utiliser des cadres fixes en acier avec des pattes de scellement surdimensionnées pénétrant profondément dans les murs, et scellées au mortier de ciment ou au béton, avec une mise en tension pendant le durcissement du béton à l'aide de fil de fer.
- La fixation par vissage : insérer des blocs spéciaux en béton léger pendant la construction des murs au droit des baies en vue de la fixation des cadres fixes par vissage.

Remarque : les fenêtres fixes en acier avec persiennes inclinables offrent l'avantage d'exercer peu de contraintes sur les murs. Cette solution est assez simple à mettre en œuvre tout en étant bien maîtrisée par les artisans locaux.

5.1.2.2 Mise hors d'eau des menuiseries extérieures

Les menuiseries extérieures doivent être mises hors d'eau, en prêtant particulièrement attention aux systèmes de joints et/ou de drainage, aux raccords entre les cadres fixes et les enduits et entre les cadres fixes et les appuis. Il n'y a toutefois pas là de spécificité VN particulière.

5.1.2.3 Pose au nu extérieur des murs

Ce type de pose assure une bonne solution de protection des tableaux et des appuis car ils ne sont pas exposés aux intempéries.

Par contre en cas de menuiseries mobiles (ouverture/fermeture), il faut faire attention à la prise au vent et il est recommandé de prévoir des systèmes de blocage et d'arrêt afin que les menuiseries ne viennent pas battre contre les murs et les enduits.

5.1.2.4 Pose au nu intérieur des murs

Ce type de pose permet principalement de réduire l'exposition solaire des menuiseries, en profitant de l'épaisseur des murs. Il faut dans ce cas porter une attention particulière à la protection des tableaux et des appuis qui se retrouvent très exposés aux pluies pour les baies exposées.

5.1.3 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S5 – 1.1 »

5.2 PETITE MAÇONNERIE

5.2.1 Principes

Sont regroupés sous cette catégories les ouvrages de petite maçonnerie suivants :

- Les cloisons
- Les étagères des niches

Ils sont traités selon les règles de l'art applicables aux maçonneries de petits éléments, notamment en termes de contrôle des alignements, niveaux et aplombs.

Lorsqu'ils sont réalisés en maçonnerie de briques et mortier de terre crue, les règles données aux sections « 3.1 Briques et mortiers » et « 3.2 Essais terres et matériaux transformés » s'appliquent et doivent être consultées.

5.2.2 Cloisons

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, les cloisons sont généralement de deux types :

- Les cloisons lourdes > les plus courantes sont celles réalisées en briques et mortier de terre crue ;
- Les cloisons légères > qui peuvent être obligatoires aux étages lorsqu'elles ne sont pas reprises par un mur à l'aplomb à rez-de-chaussée.

5.2.2.1 Cloisons lourdes

Les cloisons lourdes sont assimilables à des murs. Les matériaux lourds fréquemment utilisés au Sahel sont la brique de terre crue, la brique pleine ou creuse de ciment et la Brique de Latérite Taillée.

Les règles suivantes de mise en œuvre doivent être observées :

- À rez-de-chaussée : elles sont élevées sur une semelle de fondation ;
- En l'étage : elles sont obligatoirement élevées sur l'arrase d'un mur de refend présent à rez-de-chaussée ;
- Elles sont généralement solidaires (appareillage) des murs avec lesquels elles sont en contact, sans toutefois que cela ne soit une obligation ;
- Elles viennent « mourir » sous les voûtes ; elles sont donc toujours indépendantes des voûtes, et il est recommandé de laisser un vide de quelques centimètres entre les deux tiers supérieurs de la voûte et la cloison afin d'éviter de possibles désordres liés à des tassements différentiels.

Remarque : la mise en œuvre des cloisons lourdes peut intervenir aussi bien en phase de gros-œuvre qu'en phase de second-œuvre.

Insérer fiche « S5 – 2.1 »

5.2.2.2 Cloisons légères

Les matériaux légers fréquemment utilisés au Sahel sont la brique de terre crue allégée posée sur tranche et la brique creuse de ciment de petite largeur (10 cm maximum).

Les règles suivantes de mise en œuvre doivent être observées :

- À rez-de-chaussée ou en étage, elles ne sont pas fondées et sont indépendantes (pas d'appareillage) des murs, mais un système d'accroche peut s'avérer nécessaire afin d'assurer la stabilité de la cloison ;
- Elles viennent « mourir » sous les voûtes ; elles sont donc toujours indépendantes des voûtes, et il est recommandé de laisser un vide de quelques centimètres entre les deux tiers supérieurs de la voûte et la cloison afin d'éviter de possibles désordres liés à des tassements différentiels ;
- Elles sont généralement mises en œuvre sur un dallage de sol avec lequel elles sont donc solidaires ; des renforts de dallage peuvent-être prévus si besoin au niveau de la zone d'appui ;
- Elles sont toujours réalisées en phase de second-œuvre.

Insérer fiche « S5 – 2.2 »

5.2.3 Étagères des niches

L'épaisseur importante des murs porteurs offre la possibilité de réaliser des niches qui deviennent autant d'opportunités d'économie de matériaux et de rangements intégrés. Dans ce second cas, le recoupement du volume des niches par des étagères s'avère souvent utile et/ou nécessaire.

Deux méthodes simples et économiques de réaliser des étagères maçonnées sont présentées ici :

Étagères maçonnées en briques et mortier de terre crue :

- Repérer les niveaux souhaités des étagères ;
- Creuser les réservations de part et d'autre du tableau ;
- Préparer les briques nécessaires : adapter le nombre et les tailles en fonction de la largeur de la niche ; les briques une fois installées doivent former un arc surbaissée autoportant ;
- Mettre en place les briques et les sceller au mortier de terre ;
- Nivelier la partie supérieure de chaque étagère avec du mortier et si besoin des morceaux de briques.

Étagères maçonnées préfabriquée en béton armé :

- Repérer les niveaux souhaités des étagères ;
- Creuser les réservations de part des d'autre du tableau ;
- Préfabriquer les étagères en béton armé aux dimensions souhaitées : les encastresments de part et d'autre du tableau doivent être de 10 cm minimums ; l'épaisseur est à adapter selon les goûts ;
- Mettre en place les étagères et les sceller au mortier de terre ou de ciment.

Remarque : dans un cas comme dans l'autre, des revêtements de finition peuvent venir en complément ; par exemple du carrelage.

Remarque : il est aussi possible de réaliser des étagères non maçonnées, par exemple en bois ou en acier. Dans ce cas, il est recommandé d'éviter les encastresments et de prévoir des pièces de type supports, fixées aux tableaux par vissage, en prêtant attention à la qualité des scellements.

Insérer fiche « S5 – 2.3 »

5.3 ÉLECTRICITÉ

5.3.1 Références normatives

Les règles normatives relatives aux travaux d'électricité des bâtiments s'appliquent au CT VN ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur, et en particulier :

- NF C15-100 Installations électriques à basse tension
- DTU 70.1 Installations électriques des bâtiments à usage d'habitation

5.3.2 Spécificités VN

Important : les travaux d'électricité doivent être réalisés par un électricien !

Idéalement l'électricien doit intervenir à différentes phases de la construction, et notamment au moment de la réalisation des fondations/soubassements pour le passage des gaines d'alimentation et de distribution basse les traversant.

Il est possible et conseillé d'éviter les saignées dans les voûtes ; pour cela, il faut faire passer les gaines par l'extrados de la voûte avant sa mise en charge.

En cas de saignées dans les voûtes, il faut veiller :

- À ce qu'elles soient toujours verticales, jamais horizontales ;
- À ce qu'elles soient réalisées toujours après la mise en charge des voûtes.

En cas de suspension de luminaires ou de ventilateurs plafonniers, prévoir un système d'accroche « externe » au moment de la construction, en faisant passer les gaines par l'extrados de la voûte comme indiqué plus haut.

Les maçonneries en briques de terre crue sont tendres. Il faut en tenir compte lors de la fixation des appareils électriques, en particulier des prises de courant qui sont soumises à arrachement : les scellements doivent être robustes.

Insérer fiche « S5 – 3.1 »

5.4 PLOMBERIE

5.4.1 Références normatives

Les règles normatives relatives aux travaux de plomberie des bâtiments s'appliquent au CT VN ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur et en particulier :

- *NF EN 806-1 806-2 et 806-3 Spécifications techniques relatives aux installations d'eau destinée à la consommation humaine à l'intérieur des bâtiments*
- *DTU 60.1 Plomberie sanitaire pour bâtiments*

5.4.2 Spécificités VN

Important : les travaux de plomberie doivent être réalisés par un plombier !

L'encastrement des conduites d'eau dans les murs en briques de terre crue n'est pas recommandé en raison des risques de fuites. Lorsque c'est possible, privilégier les installations en apparent.

En cas d'encastrement ou de traversée de maçonnerie, la prudence est de mise et les principes suivants doivent être respectés :

- Les raccords à l'intérieur des murs doivent se limiter aux cas indispensables, et être traités avec le plus grand soin ;

- Utiliser des gaines étanches en traversée de murs ou de voûtes (cas des étages), et toute autre astuce permettant de se prémunir contre les fuites à l'intérieure des maçonneries en terre crue, particulièrement lorsqu'elles sont porteuses.

Les maçonneries en briques de terre crue sont très tendres. Il faut en tenir compte lors de la fixation des appareils sanitaires, en particulier les appareils suspendus de type cumulus (chauffe-eau) qui pèsent très lourd : les scellements doivent être robustes.

Insérer fiches « S5 – 4.1 ; 4.2 »

5.5 TRAITEMENTS DES PLANCHERS INTÉRIEURS

5.5.1 Principes

De très nombreux traitements de planchers sont possibles, tous devant toujours respecter les deux grands principes suivants :

- Préparation soignée du support : selon les besoins, nivelage, remblayage, compactage, etc. afin de conférer au support les caractéristiques de portance requises et d'éviter les affaissements.
- Désolidarisation entre sol et murs : le sol doit être indépendant des murs car l'un et l'autre ne travaillent pas de la même façon. L'arrêt peut être traité de différentes façons, par exemple avec de la mousse ou du carton.

Remarque : selon les cas, l'installation d'une barrière capillaire sous le plancher peut être nécessaire.

Remarque : dans le cas des étages, si un dallage en béton est réalisé, la pose d'un film polyane est obligatoire avant le coulage du béton.

5.5.2 Exemples VN courants

Voir la fiche graphique :

- Remblai compacté + dallage en terre compactée
- Remblai compacté + dallage en béton armé brut ou avec chape de finition carrelée
- Remblai compacté + pavage

Insérer fiches « S5 – 5.1 »

SECTION 6. REVÊTEMENTS DE MURS, VOÛTES ET TOITURES

Les revêtements de murs, voûtes et toitures sont nombreux et variés, et se situent généralement dans le champ des trois familles suivantes :

- Les enduits
- Les badigeons et peintures
- Les revêtements de type carrelage

Selon leur nature et leur position, les revêtements répondent aux principaux besoins suivants :

- Protéger contre l'eau, et plus largement contre l'érosion ;
- Stabiliser la surface du support pour réduire la poussière ;
- Décorer, embellir, colorer, etc.

6.1 ENDUITS

6.1.1 Références normatives et techniques

Voir notamment :

- « Règles professionnelles : Enduits sur supports composés de terre crue – 63 fiches d'exemples de mise en œuvre », Éditions du Moniteur 2013
- NZS (New Zealand Standard) 4398:2020 : *Materials and construction for earth buildings / section 8 : Surface coatings*
- NF DTU 26.1 Travaux de bâtiment - Travaux d'enduits de mortiers
- « Argiles et biopolymères, les stabilisants naturels pour la construction en terre », CRAterre éditions 2017, ISBN 978-2-906901-88-9, (lien de téléchargement : <https://amaco.org/wp-content/uploads/2020/04/recettes-traditionnelles170105-web-md.pdf>)
- « Traité de construction en terre », CRAterre 2006, éditions Parenthèses, ISBN 978-2-86364-161-3 / section « 4. Stabilisation » et section « 12. Protection de surface »

6.1.2 Cas d'application

À l'extérieur, l'application d'un enduit sur les murs et sur la toiture est obligatoire ; ce dernier protège la maçonnerie contre l'eau en particulier, et plus largement contre l'érosion, et est donc garant de sa durabilité.

À l'intérieur, l'application d'un enduit est très courante mais n'est obligatoire que dans les pièces humides. Dans les pièces sèches, la principale fonction des enduits est décorative.

6.1.3 Contraintes d'application VN

Dans le cas du *concept technique Voûte Nubienne*, on distingue quatre (4) supports maçonnés, chacun impliquant des règles d'enduisage spécifiques :

Support	Niveau d'exposition	Contraintes d'application
Murs extérieurs	Moyen à élevé Pluie, vent, soleil Caractéristiques antiérosives devant être recherchées	Élevées Horaires > ne pas travailler aux heures d'exposition solaire les plus agressives Chaleur > travailler aux saisons/heures les moins chaudes Vent > travailler par faible vent Séchage > maîtrise du temps de séchage plus ou moins exigeante selon la nature de l'enduit
Murs intérieurs	Faible	Faibles Séchage > maîtrise du temps de séchage plus ou moins exigeante selon la nature de l'enduit
Intrados de la voûte	Faible	Faibles Séchage > maîtrise du temps de séchage peu exigeante
Toiture	Élevé Pluie, vent, soleil Caractéristiques antiérosives devant être recherchées	Élevées Horaires > ne pas travailler aux heures d'exposition solaire les plus agressives Chaleur > travailler aux saisons/heures les moins chaudes Vent > travailler par faible vent Séchage > maîtrise du temps de séchage plus ou moins exigeante selon la nature de l'enduit

Insérer fiche « S6 – 1.1 »

6.1.4 Règles générales

6.1.4.1 Perspiration de l'enduit

Il est communément admis que les enduits appliqués sur des supports en terre crue doivent se caractériser, notamment, par un bon niveau de perméabilité à la vapeur d'eau. En d'autres termes, il est recommandé d'éviter d'utiliser des enduits imperméables à la vapeur d'eau, en particulier les enduits sable-ciment, qui de par leur nature auront tendance à enfermer dans le support l'humidité qu'il pourrait contenir, et ainsi entraîner des pathologies liées à l'eau. Toutefois, il est important de rappeler que ces recommandations fondées doivent être nuancées en tenant compte des facteurs suivant :

- Facteur n°1 : considérer les caractéristiques climatiques > plus le climat est humide et la pluviométrie importante, plus les enduits doivent être perspirants / plus le climat est sec et la pluviométrie faible, plus la perspiration des enduits peut être réduite si nécessaire.
- Facteur n°2 : mitiger le manque de perspiration d'un enduit > lorsqu'un enduit est peu perspirant, toujours prévoir une bonne barrière capillaire à la base des supports en terre crue et assurer une bonne ventilation des pièces, en particulier des pièces humides.

Niveaux de perspiration par types d'enduits les plus courants :

Types d'enduits	Niveaux de perspiration	Climat sec	Climat humide
Enduits terre et terre-paille	Excellent	Oui	Oui
Enduit sable-chaux	Excellent	Oui	Oui
Enduit sable-ciment-chaux	D'excellent à satisfaisant selon les dosages	Oui Barrière capillaire et bonne ventilation recommandées	Oui Barrière capillaire et bonne ventilation obligatoires
Enduit sable-ciment	Mauvais	Oui Barrière capillaire et bonne ventilation obligatoires	Éviter
Enduit stabilisé au bitume	Mauvais	Oui Barrière capillaire et bonne ventilation obligatoires	Éviter sur les murs Oui sur la toiture

6.1.4.2 Adhérence et souplesse de l'enduit

Il est attendu d'un enduit qu'il adhère correctement à son support. Cette caractéristique peut être vérifiée par des essais de résistance au cisaillement tels que décrits aux règles professionnelles « *Enduits sur supports composés de terre crue* ».

De façon générale, un mur en terre crue est sujet à de légères variations dimensionnelles en fonction de la variation du taux d'humidité ambiante. Les enduits souples sont donc à privilégier car ils seront plus en capacité d'accompagner les variations du support sans fissuration ni décollement.

Lorsque ces caractéristiques ne peuvent pas être assurées – comme par exemple lors de l'emploi d'un enduit sable-ciment qui en plus d'être raide aura tendance à mal adhérer au support en terre crue – des adaptations sont nécessaires. La plus connue et courante au Sahel consiste en la fixation d'une maille grillagée sur le support avant application de l'enduit : la maille empêche l'enduit de fissurer, tout en le maintenant bien accroché au support. Une autre alternative consiste à insérer des morceaux de matériaux durs dans le support, par exemple des cailloux, qui offriront une bonne surface d'accroche à l'enduit.

6.1.4.3 Conditions d'application

Quelle que soit la nature d'un enduit, certaines conditions d'application communes doivent être respectées :

- En extérieur, limiter l'exposition solaire directe au moment de la pose et aussi longtemps que possible après la pose ; par exemple pour une façade orientée Est et donc exposée au soleil plutôt le matin, appliquer l'enduit l'après-midi afin de bénéficier de l'ombre de l'après-midi et de l'obscurité de la nuit ;
- En extérieur, éviter d'appliquer un enduit par temps de grosse chaleur et/ou de grand vent ; si l'attente n'est pas possible, augmenter la fréquence d'arrosage de l'enduit après son application, en particulier pour les enduits à base de liants hydrauliques ;
- En extérieur comme en intérieur, s'assurer que les maçonneries supports ont suffisamment eu le temps de sécher avant d'appliquer l'enduit ;
- En extérieur comme en intérieur, bien préparer les supports : reboucher ou gratter si besoin, brosser/dépoussiérer ; bien mouiller juste avant l'application de l'enduit.

Important : le support (maçonnerie ou couche précédente) doit impérativement être correctement mouillé avant application de l'enduit afin qu'il ne pompe pas immédiatement toute l'eau contenue dans l'enduit (phénomène de dessiccation). Pour la première couche, attention toutefois à ne pas créer de ruissellement entraînant l'érosion de la surface du support terre crue, mais à arroser délicatement jusqu'à saturation du support.

Insérer fiche « S6 – 1.2 »

6.1.4.4 Durcissement et séchage de l'enduit

Un enduit doit correctement durcir et sécher après son application, ce processus nécessitant certains gestes qui varieront selon la nature de l'enduit, en particulier l'arrosage régulier.

Les enduits terre ne doivent pas être trop arrosés après leur application ; par contre les enduits à base de liants hydrauliques doivent être régulièrement et généreusement arrosés après leur application afin de ralentir leur séchage et de réduire les phénomènes de fissuration.

6.1.4.5 Entretien des enduits

Quelle que soit leur nature, les enduits doivent être inspectés chaque année, en particulier après la saison des pluies. Si un enduit extérieur est endommagé, il doit être réparé sans faute au plus tard avant la prochaine saison des pluies. Le maintien de la fonction de protection des supports, en extérieur tout particulièrement, est indispensable à la bonne durée de vie des bâtiments VN.

6.1.5 Cas VN courant n°1 : les enduits terre

Au Sahel, l'immense majorité des architectures vernaculaires étaient réalisées en terre crue et utilisaient des enduits terre, tant en revêtement intérieur qu'extérieur. Ces pratiques traditionnelles perdurent jusqu'à aujourd'hui sur l'ensemble de la bande sahélienne, en particulier dans les milieux paysans.

Les enduits terre sont perméables à la vapeur d'eau et particulièrement bien adaptés aux supports en terre crue. Ils sont également très adaptés aux réalités socio-économiques paysannes, offrant notamment la possibilité de traitements familiaux et/ou communautaires saisonniers à moindre coût. Ils restent donc une solution technique pertinente et nécessaire qu'il ne faut en aucun cas déprécier, mais bien au contraire encourager.

Attention : les enduits terre ne répondent toutefois plus toujours efficacement à certaines contraintes contemporaines imposant une réduction drastique de la fréquence des opérations d'entretien, notamment et particulièrement dans certains milieux urbains confrontés à des difficultés d'approvisionnement, ou avec certaines constructions communautaires/publiques sujettes à des lacunes en termes de gestion de l'entretien. Dans de tels cas, des alternatives techniques doivent être recherchées et privilégiées.

Dans le cas du concept technique Voûte Nubienne, on distingue trois catégories d'enduits terre en fonction du support d'application :

Désignation	Traitement
Enduits terre sur murs extérieurs	Pas de recette spécifique, mais quelques principes récurrents : - Se renseigner sur les éventuelles recettes traditionnelles locales ; - Malange terre argileuse + sable ; ratio 1/3 fréquent mais à adapter selon la nature de la terre utilisée et les ressources locales disponibles ;

	- Ajout fréquent de fibres, en particulier en cas de terre trop argileuse, pour réduire la fissuration, mais aussi pour accroître l'imperméabilité lorsque la paille a longuement fermenté (terre pourrie) ; - Ajout fréquent d'autres adjuvants afin de consolider la base en terre crue : matières d'origine végétale ou animale ; - Le mélange doit être bien travaillé à l'avance, avec une répétition des opérations de mouillage/malaxage jusqu'à obtention d'un produit bien homogène ; - Selon les adjuvants, un temps de maturation plus ou moins long (1 à 4 semaines) est généralement nécessaire ; - Il est souvent utile de placer le mélange sous une bâche plastique afin de favoriser le processus de maturation ; - Application en 1 ou 2 couches.
Enduits terre sur toitures	Deux approches dominantes : - 1/ Identique aux murs extérieurs ; - 2/ Mortier de terre graveleuse, compacté manuellement à l'état humide
Enduits terre sur murs et voûtes intérieurs	Pas de recette spécifique, mais quelques principes récurrents : - Se renseigner sur les éventuelles recettes traditionnelles locales ; - Malange terre argileuse + sable ; ratio 1/3 fréquent mais à adapter selon la nature de la terre utilisée et les ressources locales disponibles ; - Ajout possible de fibres, en particulier en cas de terre trop argileuse pour réduire la fissuration, mais aussi pour accroître l'imperméabilité lorsque la paille a longuement fermenté (terre pourrie) ; - Ajout possible d'autres adjuvants afin de consolider la base en terre crue : matières d'origine végétale ou animale ; - Le mélange doit être bien travaillé à l'avance, avec une répétition des opérations de mouillage/malaxage jusqu'à obtention d'un produit bien homogène ;

	- Selon les adjuvants, un temps de maturation plus ou moins long (1 à 4 semaines) est généralement nécessaire ; - Il est souvent utile de placer le mélange sous une bâche plastique afin de favoriser le processus de maturation ; - Application en 1 ou 2 couches.
--	--

Insérer fiche « S6 – 1.3 »

6.1.6 Cas VN courant n°2 : les enduits stabilisés au bitume

6.1.6.1 Principes

Les enduits stabilisés au bitume sont généralement utilisés en extérieur. Ils peuvent être appliqués sur les murs et sur la toiture.

La stabilisation de la terre au bitume améliore en particulier la résistance à l'eau et la cohésion ; elle fonctionne bien avec des terres plutôt sableuses ayant une teneur en argile plutôt faible. Les terres argileuses sont donc le plus souvent mélangée avec du sable.

La perspiration d'un enduit terre stabilisée au bitume est mauvaise ; il est donc recommandé de prévoir une barrière capillaire à la base des murs en terre crue et d'assurer une bonne ventilation des pièces.

Par contre les enduits terre stabilisée au bitume sont souples et adhèrent bien aux supports en terre crue.

La méthode de stabilisation préconisée ici est celle du cut-back, consistant en une fluidification du bitume par mélange à un solvant volatile : pétrole, gasoil, etc.

6.1.6.2 Mise en œuvre

Remarque : les quantités données aux tableaux des fiches techniques ont valeur informative. Elles doivent être ajustées au cas par cas.

- Préparation du mélange :

1/ Préparation du cut-back : au Sahel, le bitume se trouve plus fréquemment sous la forme de pains solides. Il faut donc commencer par liquéfier le bitume en le chauffant ; sont ensuite ajoutés d'une part le solvant (pétrole ou gasoil) et d'autre part l'huile morte.

2/ Préparation du mortier minéral : en parallèle, le mélange terre-sable pour les murs ou terre-sable-gravier pour les toitures est préparé pour former un mortier minéral bien homogène, de consistance plastique.

3/ Mélange du mortier et du bitume : le cut-back chaud est versé progressivement sur le mortier et malaxé jusqu'à obtenir un mélange parfaitement homogène ; attention aux risques de brûlure.

4/ Utilisation du mortier stabilisé : le mortier stabilisé peut être utilisé immédiatement ou conservé sous bâche pour une utilisation jusqu'à 24h après sa production.

- **Application de l'enduit sur mur :**

1/ Préparer le support comme indiqué à la section « 6.1.4.3 Conditions d'application ».

2/ Appliquer l'enduit sur le mur en 1 couche d'environ 20 mm d'épaisseur, depuis le haut vers le bas du mur. Chaque façade est traitée en une fois.

3/ L'enduit doit être serré à la taloche puis passé à l'éponge afin d'obtenir une surface régulière et lisse.

4/ Si besoin pendant le séchage, remouiller l'enduit et resserrer à la taloche pour refermer les fissures superficielles.

Insérer fiche « S6 – 1.4 »

- **Application de l'enduit sur toiture :**

1/ Préparer le support comme indiqué au « 6.1.4.3 Conditions d'application ».

2/ Appliquer sur l'ensemble de la toiture ou sur la partie traitée (cas des grandes toitures) des repères de mortier à intervalles réguliers de 4/5 cm d'épaisseur.

3/ Appliquer la couche de mortier de 4/5 cm d'épaisseur entre les repères et serrer l'enduit à la taloche.

4/ Traiter avec beaucoup d'attention les raccords au niveau des gouttières : l'enduit doit mourir sur la gouttière.

5/ Traiter avec beaucoup d'attention les remontées d'acrotères ou de balustrades : l'enduit doit remonter verticalement sur quelques centimètres en formant une courbe (pas d'arrête rentrante !).

4/ Si besoin pendant le séchage, remouiller l'enduit et resserrer à la taloche pour refermer les fissures superficielles.

Insérer fiche « S6 – 1.5 »

6.1.7 Cas VN courant n°3 : les enduits sable-ciment

6.1.7.1 Principes

Les enduits sable-ciment sont utilisés en extérieur et en intérieur, mais toujours exclusivement sur les murs. L'application sur les voûtes et sur les toitures est donc proscrite.

Les enduits sable-ciment sont résistants à l'eau, mais leur perspiration est mauvaise ; il est donc recommandé de ne les utiliser que sous des climats secs, de prévoir une barrière capillaire à la base des murs en terre crue et d'assurer une bonne ventilation des pièces.

Les enduits sable-ciment sont raides et adhèrent mal aux supports en terre crue ; il peut donc s'avérer nécessaire de prévoir des systèmes d'accroche, en particulier pour les applications en extérieur.

6.1.7.2 Mise en œuvre en extérieur

Remarque : les quantités données aux tableaux des fiches techniques ont valeur informative. Elles doivent être ajustées au cas par cas.

- Option n°1 : application sur une façade en Briques de Banco Surface Cailloux (BBSC)

1/ Préparation du support : respecter les règles communes données à la section « 6.1.4.3 Conditions d'application ». Les cailloux incrustés dans les briques doivent être bien visibles.

2/ Application des trois couches successives d'enduit – gobetis, charge, finition – en respectant la règle du dosage dégressif de la 1^{ère} à la 3^{ème} couche. Bien mouiller le support juste avant l'application de chaque couche.

3/ La couche de finition peut être traitée à la tyrolienne teintée dans la masse, ou talochée avant de recevoir une peinture.

Remarque : le support incrusté de cailloux est irrégulier. Le rattrapage des irrégularités implique que l'enduit complet soit assez épais par endroits ; de l'ordre de 30 mm.

Insérer fiches « S6 – 1.6 »

- Option n°2 : application avec une maille grillagée

1/ Préparation du support : respecter les règles communes données à la section « 6.1.4.3 Conditions d'application ».

2/ Fixation de la maille grillagée au support à l'aide de longs clous à tête plate espacés d'environ 15 cm les uns-des-autres ; préférer les mailles et les clous galvanisés ; incliner légèrement les clous têtes vers le haut ; la maille ne doit pas être en contact direct avec le support (si besoin utiliser des petites cales) afin de permettre son enrobage dans la 1^{ère} couche d'enduit.

3/ Application en 2 couches, en commençant directement par la charge – charge, finition – en respectant les règles de dosage dégressif entre la 1^{ère} et la 2nd couche. Bien mouiller le support juste avant l'application de chaque couche.

4/ La couche de finition peut être traitée à la tyrolienne teintée dans la masse, ou talochée avant de recevoir une peinture.

Remarque : la maille grillagée est un bon moyen de réduire les risques de fissuration liés à la raideur des enduits sable-ciment.

6.1.7.3 Mise en œuvre en intérieur

Remarque : les quantités données aux tableaux des fiches techniques ont valeur informative. Elles doivent être ajustées au cas par cas.

En intérieur, les conditions d'application sont moins contraignantes qu'en extérieur car les enduits ne sont généralement pas exposés au soleil direct ni au vent. Les enduits sable-ciment, s'ils sont correctement mis en œuvre, accrochent donc plutôt bien au support et ne nécessitent donc pas de systématiquement recourir à une maille grillagée.

1/ Préparation du support : respecter les règles communes données à la section « 6.1.4.3 Conditions d'application ».

2/ Application des trois couches successives d'enduit – gobetis, charge, finition – en respectant la règle du dosage dégressif de la 1^{ère} à la 3^{ème} couche. Bien mouiller le support juste avant l'application de chaque couche. La couche de finition n'est pas une obligation.

3/ La dernière couche est talochée avant de recevoir une peinture.

Insérer fiches « S6 – 1.7 »

6.1.8 Autres types d'enduits

Les autres types d'enduits présentés ici le sont à titre informatif. Si le contexte d'un projet donné devait s'avérer favorable à leur utilisation, des recherches documentaires devraient être menées au préalable. Liste non exhaustive.

- Les enduits à base de plâtre utilisés en intérieur > bon niveau de perspirance ; sensibilité à l'eau ; bonne capacité d'accroche aux supports terre crue.
- Les enduits à base de chaux utilisés en extérieur et en intérieur > bon niveau de perspirance ; bonne tenue à l'eau ; bonne capacité d'accroche aux supports terre crue.
- Les enduit à base d'un mélange ciment-chaux utilisés en extérieur et en intérieur > bon niveau de perspirance à partir d'un ratio ciment-chaux minimum de 5:1 ; bonne tenue à l'eau ; mauvaise capacité d'accroche aux supports terre crue.

6.2 BADIGEONS ET PEINTURES

6.2.1 Références normatives

Voir notamment :

- NF DTU 59.1 Travaux de bâtiment - Revêtements de peinture en feuille mince, semi-épais, ou épais
- « Traité de construction en terre », CRAterre 2006, éditions Parenthèses, ISBN 978-2-86364-161-3 / section « 12. Protection de surface »

6.2.2 Règles de base

Important : *il est recommandé que les travaux de badigeons et de peintures soient réalisés par un peintre !*

La principale règle à respecter est la bonne préparation du support avant l'application du badigeon ou de la peinture :

- Rebouchage des trous et fissures
- Ponçage des reprises
- Nettoyage soigné

Suivre ensuite les prescriptions d'application prévues pour le produit utilisé.

6.2.3 Badigeons de chaux

Les badigeons de chaux utilisés comme finition intérieure sont assez courants au Sahel et bien adaptés aux supports en terre crue, particulièrement aux enduits à base de terre. Ils sont perméables à la vapeur d'eau.

Ils sont généralement réalisés avec de la chaux mélangée à de l'eau, à raison d'1 volume de chaux pour 2 à 3 volumes d'eau. Du sel peut être ajouté à la préparation pour faciliter la carbonatation de la chaux et pour un effet répulsif contre les termites. L'application se fait en 2 à 3 couches.

6.2.4 Peintures

Les peintures industrielles sont d'usage très courant au Sahel. Selon leurs natures, elles peuvent être plus ou moins adaptées comme finition sur les enduits courants du *concept technique Voûte Nubienne*, en intérieur comme en extérieur.

Les peintures acryliques à l'eau sont les plus accessibles et courantes au Sahel. Elles donnent de bons résultats tant sur les supports en terre crue que sur les supports en ciment. Elles sont indiquées en intérieur comme en extérieur.

Les peintures à l'huile ne sont pas indiquées sur les supports en terre ; mais sur des enduits ciment elles peuvent convenir. Il est toutefois recommandé de privilégier les peintures à l'eau.

De façon générale, il est recommandé d'éviter les peintures étanches.

6.2.5 Fiches du Manuel du Maçon

Insérer fiche « S6 – 2.1 »

6.3 CARRELAGES

6.3.1 Références normatives

Les règles normatives relatives aux travaux de pose de carrelage s'appliquent au concept technique VN ; il faut donc se référer à la documentation technique en vigueur et en particulier :

- NF DTU 52.1 - Travaux de bâtiment - Revêtements de sol scellés
- NF DTU 52.2 - Travaux de bâtiment - Pose collée des revêtements céramiques et assimilés - Pierres naturelles

Il existe par ailleurs de très nombreuses normes relatives aux caractéristiques des carrelages, permettant de définir les types d'usages auxquels ils sont destinés. À chacun de se renseigner en la matière, le présent guide n'ayant pas vocation à éclairer ce sujet.

6.3.2 Spécificités VN

Important : les travaux de pose de carrelage doivent être réalisés par un carreleur !

Concernant la pose de carrelage au sol, aucune spécificité VN n'est à signaler.

Concernant la pose de carrelage sur les murs, il est recommandé :

- De limiter la pose aux seules pièces humides ;
- Dans les pièces humides, de limiter la pose aux seules surfaces où des rejaillissements sont attendus : au droit de la douche ; devant le lavabo sur quelques rangs ; devant le plan de travail de la cuisine sur quelques rangs ; etc.

La pose de carrelage sur les voûtes est proscrite.

Remarque : pour rappel, une bonne ventilation des pièces humides est indispensable.

SECTION 7. ANNEXES

7.1 FICHES CONTRÔLE / AUTO-CONTRÔLE

7.1.1 Fondations superficielles

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Fondations en maçonnerie de pierres crues liées au mortier	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des matériaux utilisés.		
3	Dimensions des fouilles.		
4	Qualité du blocage des pierres dans les fouilles et les unes par rapport aux autres.		
5	Remplissage des vides par le mortier.		
6	Niveau et nivellement de l'arrase.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Fondations en pisé	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité du mélange utilisé.		
3	Dimensions des fouilles.		
4	Épaisseur des couches.		
5	Taux de compactage.		
6	Niveau et nivellement de l'arrase.		

7.1.2 Soubassements

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Soubassement en maçonnerie de briques spéciales	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des matériaux utilisés.		
3	Dimensions du soubassement partiel ou complet.		
4	Supports correctement préparés.		
5	Appareillages respectant les règles de l'art : pas de superposition de joints.		
6	Humidification des briques spéciales avant leur pose.		
7	Joints horizontaux réguliers, bien remplis et dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur.		
8	Joints verticaux réguliers, bien remplis et dans le champ de 2 à 5 cm d'épaisseur.		
9	Soubassement aligné, de niveau et d'aplomb.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Soubassement en béton cyclopéen	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des matériaux utilisés.		
3	Dimensions du soubassement partiel ou complet.		
4	Supports correctement préparés.		
5	Qualité du coffrage.		
6	Enchâssement des pierres dans le bain de mortier et enrobage.		
7	Soubassement aligné, de niveau et d'aplomb.		

7.1.3 Murs

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Murs en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Épaisseurs des murs minimales respectées.		
7	Supports correctement préparés.		
8	Appareillages respectant les règles de l'art : pas de superposition de joints.		
9	Joints horizontaux réguliers, bien remplis et dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur.		
10	Joints verticaux réguliers, bien remplis et dans le champ de 2 à 5 cm d'épaisseur.		
11	Murs alignés, de niveau et d'aplomb.		

7.1.4 Ouvertures

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Ouvertures	OK	PAS OK
1	Respect des règles pour les ouvertures dans les murs porteurs extérieurs.		
2	Respect des règles pour les ouvertures dans les murs porteurs extérieurs.		
3	Respect des règles pour les ouvertures dans les murs pignon et de refend.		
4	Appareillages respectant les règles de l'art au droit des tableaux de baies : pas de superposition de joints.		
5	Qualité de traitement des appuis d'ouvertures.		

7.1.5 Câble-compass

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Câble-compass	OK	PAS OK
1	Qualité du câble tressé.		
2	Installation du câble : à l'axe de la voûte ; à la Hauteur de Naissance de Voûte ; de niveau ; tendu.		
3	Présence des 3 cordeaux mobiles sur le câble et longueur requise.		

7.1.6 Voutains et arcades

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Voutains et arcades en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Qualité du coffrage : solidité ; forme ; niveau et alignement.		
7	Supports correctement préparés.		
8	Pose correcte des briques : inclinaison ; brique contre brique à l'intrados ; joint à l'extrados.		
9	Appareillages respectant les règles de l'art : décalage.		

7.1.7 Voûte

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Voûte en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité – très collant.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Angle correct au démarrage.		
7	Forme de la voûte régulière de son démarrage jusqu'à sa fermeture.		
8	Pose correcte des briques : inclinaison ; brique contre brique à l'intrados ; joint à l'extrados.		
9	Appareillages respectant les règles de l'art : décalage.		

7.1.8 Contreforts

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Contreforts en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Épaisseurs des contreforts respectées.		
7	Maçonnerie épousant la courbe de la voûte côté voûte.		
8	Supports correctement préparés.		
9	Appareillages respectant les règles de l'art : pas de superposition de joints.		
10	Joints horizontaux réguliers, bien remplis et dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur.		
11	Joints verticaux réguliers, bien remplis et dans le champ de 2 à 5 cm d'épaisseur.		
12	Contreforts alignés, de niveau et d'aplomb.		

7.1.9 Toiture

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Forme de pente maçonnée en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Réservations de gouttières creusées.		
7	Élévation du muret en haut de pente à la hauteur requise.		
8	Qualité de la maçonnerie de la pente.		
9	Qualité de la pente.		
10	Lissage de la pente.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Gouttières	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des gouttières : matériaux ; forme ; longueur et largeur.		
3	Position des gouttières : niveau ; alignement ; pente.		
4	Qualité du scellement des gouttières.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Bâche plastique et couche de mortier de terre	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité de la bâche plastique.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
	Mise en place des bandes de bâche plastique : 1 ^{ère} bande en bas de pente ; la bande suivante recouvre la bande précédente ; le plastique ne débord pas sur le mur ; le plastique n'est pas percé.		
4	Couche de terre : application progressive au fur et à mesure de la pose des bandes ; épaisseur entre 6 et 8 cm ; arrêt entre 20 et 30 cm avant les limites de la toitures (emprise muret d'acrotère ou balustrade).		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Muret d'acrotère et balustrade en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des briques utilisées : régularité – éventuelle fissuration acceptable – résistance.		
3	Qualité du mortier utilisé : teneur en eau (pâte molle) – homogénéité.		
4	Bonne cohésion briques/mortier.		
5	Humidification des briques avant leur pose.		
6	Supports correctement préparés.		
7	Appareillages respectant les règles de l'art : pas de superposition de joints.		
8	Joints horizontaux réguliers, bien remplis et dans la moyenne de 3 cm d'épaisseur.		
9	Joints verticaux réguliers, bien remplis et dans le champ de 2 à 5 cm d'épaisseur.		
10	Muret ou balustrade aligné, de niveau et d'aplomb.		

7.1.10 Protections d'acrotères et balustrades

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Protection d'acrotères et balustrades en dalles préfabriquées	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des matériaux utilisés : ciment, sable, gravier, eau.		
3	Vérification des dalles préfabriquées : qualité ; quantité ; dalles spéciales ; etc.		
4	Préparation du support : joints verticaux creusés ; nettoyage ; arrosage.		
5	Pose des dalles : traitement des angles ; goutte d'eau côté façade ; pente côté toiture ; alignement ; nivellement ; scellement et remplissage des joints.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Protection d'acrotères et balustrades en béton coffré	OK	PAS OK
1	Matériaux et matériel à pied d'œuvre.		
2	Qualité des matériaux utilisés : ciment, sable, gravier, eau.		
3	Préparation du support : joints verticaux creusés ; nettoyage.		
4	Mise en place du coffrage : stabilité ; alignement ; nivellement ; pente côté toiture ; etc.		
5	Installation de la goutte d'eau côté façade : position ; fixation ; linéarité ; etc.		
6	Installation du ferrailage : vérification des filants et épingles ; vérification des calles ; vérification de l'enrobage (3cm).		
7	Préparation du support : arrosage.		
8	Préparation et coulage du béton dosé à 250 kg.		
9	Cure du béton : arrosage régulier.		
10	Décoffrage après 24 à 48h.		

7.1.11 Escaliers

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Escaliers maçonnés en briques et mortier de terre crue	OK	PAS OK
1	Tous points de contrôle / auto-contrôle courants d'une maçonnerie en adobes et mortier de terre crue.		
2	Mesures et implantation de l'escalier		
3	Traçage de l'escalier		
4	Traitement des revêtements de marches		

7.1.12 Construire un étage

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Construire en étages : points de vigilance	OK	PAS OK
1	Murs de l'étage à l'aplomb des murs de rez-de-chaussée, en respectant les typologies de murs.		
2	Étage repris à rez-de-chaussée par voûtes adjacentes, ou murs de 80 cm d'épaisseur à rez-de-chaussée en l'absence de voûtes adjacentes.		
3	Hauteur de naissance de voûte à l'étage inférieure ou égale à 150 cm.		
4	Superposition des murs intérieurs : mur de refend sur mur de refend ou grand arc ; cloison lourde sur mur de refend ou grand arc ; cloison légère sur vide.		
5	Respect des règles de dimensionnement des ouvertures.		
6	Ouvertures en étages à l'aplomb des ouvertures à rez-de-chaussée (recommandation).		
7	Appliquer tous les points de contrôle / auto-contrôle des étapes de construction VN pour le nouveau bâti.		

7.1.13 Agrandir un bâtiment VN existant

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Ajout d'une voûte dans le prolongement ou perpendiculairement	OK	PAS OK
1	État du bâti existant satisfaisant ; confirmation que l'extension est possible.		
2	Position et qualité des appareillages entre l'extension et l'existant, à toutes les étapes de la construction où des accroches sont requises : fondations ; murs ; contreforts de mise en charge des voûtes.		
3	Traitement et raccords entre étanchéité existante et nouvelle étanchéité.		
4	Appliquer tous les points de contrôle / auto-contrôle des étapes de construction VN pour le nouveau bâti.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Ajout d'une voûte adjacente à une voûte existante	OK	PAS OK
1	État du bâti existant satisfaisant ; confirmation que l'extension est possible.		
2	Hauteur de naissance de voûte repérée/marquée.		
3	Position et qualité des appareillages entre l'extension et l'existant, à toutes les étapes de la construction où des accroches sont requises : fondations ; murs ; voutains ; contreforts de mise en charge des voûtes.		
4	Démontage partiel soigné du contrefort adjacent à l'extension.		
5	Reprise des voutains en les élargissant côté extension.		
6	Taille du mur en courbe là où la nouvelle voûte va venir s'appuyer (assise).		
7	Traitement et raccords entre étanchéité existante et nouvelle étanchéité.		
8	Appliquer tous les points de contrôle / auto-contrôle des étapes de construction VN pour le nouveau bâti.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Ajout d'une voûte en étage	OK	PAS OK
1	État du bâti existant satisfaisant ; confirmation que l'extension est possible.		
2	Étanchéité existante déposée.		
3	Démontage des couches supérieures des contreforts ; assises des nouveaux murs porteurs trouvées et validées.		
4	Appliquer tous les points de contrôle / auto-contrôle de la fiche « construire en étage ».		
5	Appliquer tous les points de contrôle / auto-contrôle des étapes de construction VN pour le nouveau bâti.		
6	Reprise complète des étanchéités.		

7.1.14 Pose de menuiseries

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Pose courante de menuiseries	OK	PAS OK
1	Contrôler la qualité de la menuiserie avant sa pose.		
2	Contrôler la méthode de fixation de la menuiserie avant sa pose : par scellement ou par vissage.		
3	Contrôler la qualité de la fixation : la menuiserie doit être parfaitement et solidement fixée à la maçonnerie.		
4	Pour les menuiseries extérieures, contrôler la mise hors d'eau.		

7.1.15 Petite maçonnerie

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Cloisons lourdes	OK	PAS OK
1	Si implantée à rez-de-chaussée, vérifier que la cloison est fondée ; Si implantée en étage, vérifier que la cloison prend appui sur un mur de refend situé à rez-de-chaussée.		
2	Vérifier que la cloison est correctement appareillée aux murs avec lesquels elle est en contact.		
3	Vérifier que la cloison est indépendante de la voûte (la cloison « meure » sous la voûte).		
4	Contrôler que les règles courantes de maçonnerie de petits éléments sont respectées : non alignement des joints ; aplomb ; alignement ; etc.		

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Cloisons légères	OK	PAS OK
1	Vérifier que la cloison est indépendante des murs mais stable.		
2	Vérifier que la cloison est indépendante de la voûte (la cloison « meure » sous la voûte).		
3	Vérifier que la zone d'appui est correctement traitée pour reprendre la cloison sans affaissement.		

7.1.16 Électricité

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Électricité : spécificités VN	OK	PAS OK
1	Gaine d'alimentation en place (fondation ou soubassement).		
2	Limitation des saignées ; maximisation des passages de gaines intérieures par le sol.		
3	Respects des règles de saignées : saignées verticales systématiques recommandées ; interdiction des saignées horizontales dans les voûtes ; si saignées verticales dans les voûtes, uniquement après mise en charge.		
4	Procéder aux essais de vérification de l'installation.		
5	Scellement et fixation des appareils électriques satisfaisants.		

7.1.17 Plomberie

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Plomberie : spécificités VN	OK	PAS OK
1	Qualité des matériaux utilisés.		
2	En cas d'encastres : qualité des encastres et des raccords.		
3	En cas de traversée de maçonnerie : installation des gaines étanches.		
4	Procéder aux essais de vérification de l'installation.		
5	Scellement et fixation des appareils sanitaires satisfaisants.		

7.1.18 Traitement des sols

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Traitement des sols	OK	PAS OK
1	Vérification de la qualité du support : nivelage, remblayage, compactage, etc. Le support doit avoir les caractéristiques de portance requises afin d'éviter les affaissements.		
2	Vérification de la désolidarisation entre sol et murs.		

7.1.19 Enduits

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Enduits	OK	PAS OK
1	Contrôler le respect des contraintes d'application selon le support : intérieur, extérieur, murs, voûte, toiture... Rappel : pas d'enduit sable-ciment sur voûte et toiture !		
2	Contrôler le respect des conditions d'application : exposition solaire, chaleur, vent, préparation du support...		
3	Contrôler le mode de préparation/application selon le type d'enduit : dosages, nombre de couches... À répéter pour chaque couche.		
4	En cas d'enduit peu perspirant, s'assurer qu'une barrière capillaire a bien été installée à la base des murs et que les pièces sont bien ventilées.		
5	Contrôler l'adhérence de l'enduit au support : faire des essais.		
6	Contrôler la maîtrise du durcissement/séchage de l'enduit selon sa nature.		

7.1.20 Badigeons et peintures

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Badigeons et peintures	OK	PAS OK
1	Contrôler la bonne préparation du support avant l'application du badigeon ou de la peinture : rebouchage des trous et fissures ; ponçage des reprises ; nettoyage soigné.		

7.1.21 Carrelages

N°	Points de contrôle / auto-contrôle Carrelage mural	OK	PAS OK
1	Carrelage uniquement dans les pièces humides.		
2	Dans les pièces humides, carrelage uniquement là où des rejaillissements sont attendus : au droit de la douche ; devant le lavabo sur quelques rangs ; devant le plan de travail de la cuisine sur quelques rangs ; etc. Rappel : pas de pose de carrelage sur les voûtes.		
3	Vérifier que les pièces humides sont bien ventilées.		



Guide de bonnes pratiques du concept technique Voûte Nubienne
Version 0.1 / Février 2025

© La Voûte Nubienne
www.lavoutenubienne.org