

VOLUME 3

ETUDE DES COMPOSANTS

	page
1) LE BLOC	1
2) LE MORTIER	11
3) L'ENDUIT	13

1) LE BLOC

1,1) Production traditionnelle à Iférouane

Les gens produisent leurs blocs à côté du lieu de la future maison. Comme il existe des maisons sur toute l'étendue de la ville, presque toutes les terres ont été utilisées (voir plan page suivante).

Pour notre analyse, on a classé les sols ainsi :

- S1: sol sableux
- S3: sol silteux
- S5: sol mélangé
- S7: sol argileux

Les gens ne peuvent pas choisir leur terre (le transport est cher), mais ils reconnaissent la différence de qualité.

S'ils en avaient la possibilité, ils prendraient tous le sol type S5 et abandonneraient les trois autres pour les raisons suivantes:

- S1 : trop friable,
- S3 : trop cassant et s'use trop vite à la pluie,
- S7 : très solide mais consomme trop d'eau et d'extraction pénible.

On remarque donc qu'il y a concordance entre la sélection des sols par l'analyse et la sélection pratiquée traditionnellement par les populations.

La production est avant tout une histoire de famille.

Il n'y a pas de législation municipale pour gérer le patrimoine minéral, seule l'extraction au milieu des routes et des places, en zone urbaine, est devenue interdite.

Le projet PCGRNAT a déjà amélioré la production par:

- l'aménagement de bassins cimentés et enterrés d'environ 10 m³, approvisionnés régulièrement en eau. Pour l'instant, il en existe trois: près de S1, S5 et S7.

- la distribution de moules en fer dont l'entretien est facile et qui, de plus, simplifient le démoulage des blocs et introduisent une normalisation dans leurs dimensions:

- pour les murs..... 40x18x15
- pour les arches..... 40x18x10
- pour les toitures... 20x15x6

La qualité des briques fabriquées par des méthodes traditionnelles varie énormément, selon la façon dont l'ouvrier est payé et la fonction de la brique: par exemple, on ne s'inquiète pas de la qualité d'une brique pour un mur de concession.

TAMGAK

KORI

N

JARDINS

ITMIA

TEMET

S1

S2

S3

S6

S7

S4

S5

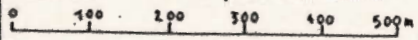
AVIATION

ARLT

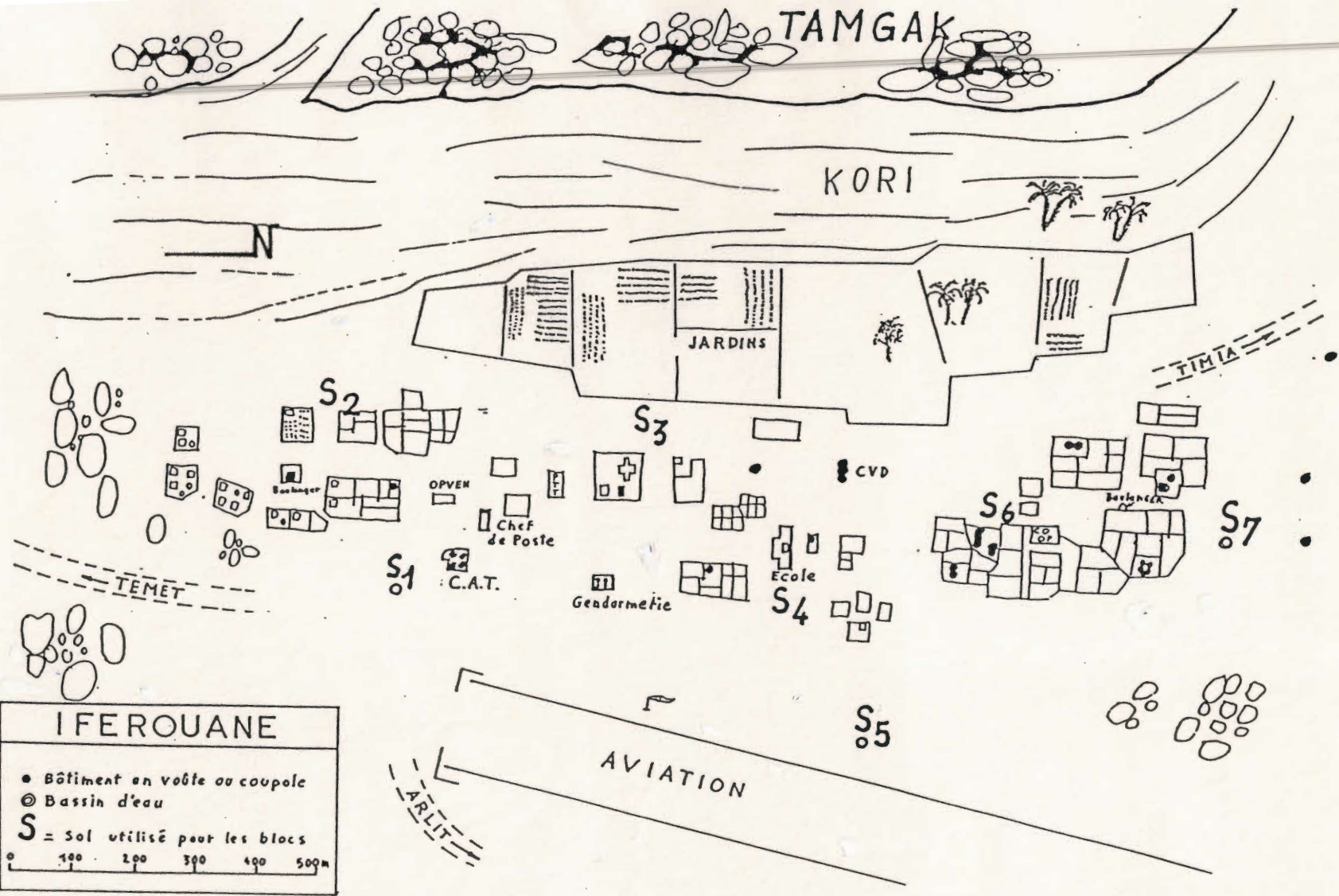
IFEROUANE

- Bâtiment en voûte ou coupole
- ⊙ Bassin d'eau

S = Sol utilisé pour les blocs



VOLUME 3 : ETUDE DES COMPOSANTS



1,2) Besoin d'un contrôle de qualité

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

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

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

(Les deux premiers critères dépendent surtout de la manière de mouler les blocs).

Nous avons déjà vu que la sélection d'un sol par l'analyse permet de savoir à l'avance si les blocs auront la qualité demandée.

Mais la prévision n'est pas suffisante, il faut être assuré de la qualité tout au long de la production et, bien sûr, après séchage complet des blocs.

D'où la nécessité d'une "analyse de contrôle" et de "tests d'acceptation".

1,3) L'analyse de contrôle

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

a) Contrôle du sol

* Comment on contrôle

Objectif

Le site de production a déjà été choisi pour les qualités de la terre. Mais il est indispensable de vérifier que les caractéristiques du sol ne changent pas au fur et à mesure que la carrière s'étend.

Méthode

Pratiquer l'essai du cigare sur la terre malaxée. Pour un opérateur expérimenté, cet essai suffit à lui seul pour vérifier la texture (au toucher), la bonne quantité d'eau (par la tige de fer, 2 cm) et, bien sûr, la cohésion (par la bonne longueur de rupture).

Fréquence

Chaque jour, c'est à dire chaque fois que l'on prépare un nouveau tas, bien malaxer pour le lendemain.

Matériel

Une tige de fer à béton (\varnothing 10, long. 50 cm).

* Quand la réponse au contrôle est négative

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

Si on décide de conserver le site parce qu'il est facile d'accès et proche d'une réserve d'eau, on peut améliorer la texture du sol existant en le mélangeant avec d'autres sols rapportés. Ainsi, on ajoutera:

- un sol argileux, si c'est la cohésion qui manque,
- un sol sableux, s'il y a trop de cohésion,
- un sol grossier (gros sable), si la texture est trop fine.

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

b) Contrôle de l'eau

L'eau doit être propre: ni salée, ni infectée.

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

1,4) Les tests d'acceptation

Dans le cadre d'Iférouane, le plus gros client est le projet PCGRNAT.

Les briquetiers, habitués à travailler pour des maçons de la famille, traitent maintenant avec une administration. Le langage familial fait place au langage contractuel, clair et précis.

Mais, dans la réalité, ce n'est pas toujours très simple et il arrive que des lots de blocs doivent être refusés.

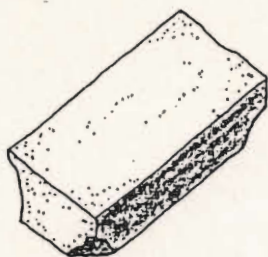
Pour éviter tout litige, on pratique des tests d'acceptation qui aident le briquetier à vérifier si ses blocs correspondent bien aux critères de qualité définis d'un commun accord entre lui et le responsable du chantier.

Le plus difficile est de se mettre d'accord pour définir les limites de qualité à partir desquelles on n'accepte plus le bloc.

Par économie de transport, il vaut mieux faire ces tests sur le site de production.

1,5) Définition des critères de qualité et exécution des tests

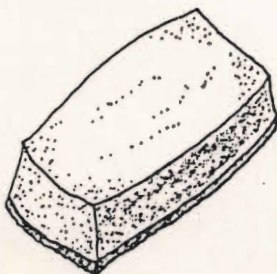
a) Aspect des arêtes



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

A vérifier dès le démoulage.

b) Dimensions



Ce sont celles d'un bloc nettoyé aux arêtes vives. Quel que soit le retrait du sol, les longueurs-largeurs-hauteurs restent constantes.

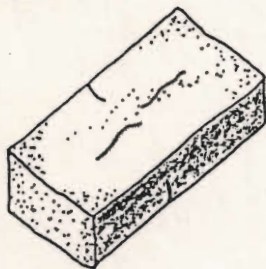
On tolère une marge de 5%, plus particulièrement pour la largeur, qui augmente au milieu du bloc si la terre de moulage est trop humide (affaissement et gonflement latéral).

Tout bloc, non nettoyé de son sol support, est refusé.

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

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

c) Fissures



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

Toute autre fissure entraîne le rejet du bloc.

A vérifier en fin de séchage.

d) Résistance mécanique à sec

Dans le cas de bâtiments traditionnels en terre (toiture-terrasse supportée par des murs d'un étage), la descente de charge se fait verticalement dans le centre du mur. Dans la maçonnerie, la contrainte maximale de compression (T_c) ne dépasse pas 1 kg/cm^2 .

Par contre, dans les bâtiments en coupoles, et surtout en voûtes, la poussée de la toiture déplace la descente de charge vers le côté extérieur du mur, augmentant la T_c dans la maçonnerie.

Cette T_c peut être supérieure à plusieurs dizaines de kg/cm^2 . Or, un bloc d'adobe a une résistance à la compression (R_c) limitée.

Sur le terrain, il est difficile d'effectuer un test de compression pour contrôler la résistance d'un bloc car, pour cela, on a besoin d'un matériel sophistiqué. Par contre, grâce à la rupture en flexion, on peut obtenir un module de rupture (M_r) égal à 1/10 de R_c , et cela avec un matériel rudimentaire. A la suite de nombreux tests de rupture réalisés dans la région, nous avons constaté qu'il était raisonnable de demander aux briquetiers au moins 3 kg/cm^2 de M_r . (Un M_r supérieur imposerait des qualités trop exigeantes pour les sols.)

Ainsi les blocs ont au minimum une résistance à la compression de 30 kg/cm^2 .
 Bien sûr pour les calculs de structure, cette R_c est minoré d'un coefficient de 12.
 Ainsi $R_c = 30 / 12 = 2,5 \text{ kg/cm}^2$

Le coefficient (de 12) se détaille ainsi:

- Coefficient de sécurité: x 3
 - perte de qualité à la production,
 - perte de qualité à la construction,
 - surcharges anormales.
- Coefficient de réduction: x 2 (4)??
 - nature du matériau,
 - résistance du mortier.
- Coefficient de saturation: x 2
 - résistance humide/résistance à sec.

[Attention: ces chiffres sont spécifiques au contexte du projet PCGRNAT:
 Présence de contrôles. Pas de problème de flambement de mur.]

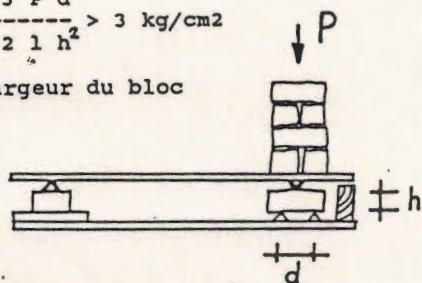
* Test de rupture en flexion:

Matériel:

Deux planches de $120 \times 35 \times 4$ et quatre cornières de $30 \times 3,5 \times 3,5$.

$$M_r = \frac{3 P d}{2 l h^2} > 3 \text{ kg/cm}^2$$

l = largeur du bloc



Charger avec des gros blocs $40 \times 18 \times 15$ de $18,5 \text{ kg}$
 Nombre de bloc minimum à charger pour avoir $M_r = 3$

Bloc testé	d cm	nombre de bloc à charger	M_r kg/cm ²
$40 \times 18 \times 15$	25	18	3,08
$40 \times 18 \times 10$	25	8	3,08
$20 \times 15 \times 6$	15	4	3,08

Méthode:

Chaque production journalière est stockée distinctement et soigneusement.
 Prélever trois blocs, au hasard, dans chaque production journalière (après deux semaines de séchage minimum), et leur faire subir le test de rupture. Ces trois blocs devront répondre aux trois critères précédents: pas d'arête creuse, bonnes dimensions et pas plus d'une fissure au milieu.

- . Si 1 sur 3 est $< 3 \text{ kg/cm}^2$: recommencer sur 3 autres blocs.
- . Si encore 1 sur 3 est $< 3 \text{ kg/cm}^2$: refuser le stock journalier.

e) Résistance à l'érosion de l'eau

* Objectif:

Retrouver les blocs silteux, impropres à la construction (car peu résistants à l'eau), mais qui pourtant répondent aux quatre autres critères. Ce test n'est pas systématique et dépend de la région. Il s'adresse surtout aux petits blocs de toiture 20x15x6.

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

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

* Méthode: (à réaliser en fin de séchage)

Prendre, au hasard, un bloc du stockage journalier dont la terre semble silteuse. Prendre aussi un bloc considéré par les deux partenaires comme satisfaisant.

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



Peser les deux blocs (P1).

Les poser sur deux tubes en fer au dessus du réservoir d'eau du site de production.

Verser successivement 10 arrosoirs de 12 litres d'eau, d'une hauteur de 1,10 m.

Après séchage complet, peser délicatement le reste des blocs (P2) et noter le type d'érosion, notamment les fissures.

Calculer le pourcentage de l'érosion (E):

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

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

En aucun cas, un critère d'érosion n'est fixé par un pourcentage de perte car ce pourcentage peut être trop différent d'une localité à une autre.

Ce test par comparaison directe reste très persuasif.

1,6) Comment corriger quand les tests d'acceptation sont négatifs

a) Aspect des arêtes

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

b) Dimensions

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

Il faut donc mieux contrôler la quantité d'eau.

Plus la terre est argileuse, plus il faut de l'eau.

Plus le moule est petit, plus il faut mouiller la terre pour faciliter le démoulage.

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

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

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

c) Fissures

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

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

d) Résistance mécanique à sec: $M_r 3 < \text{kg/cm}^2$

Il y a quatre raisons majeures:

* La texture est bonne, mais pas la structure (l'argile reste en petits blocs concentrés, elle n'est pas diffusée dans la matière).

Il faut augmenter le temps et l'énergie de malaxage.

* La structure n'est pas assez dense: la face cassée des blocs révèle des cavités d'air.

Il faut bien triturer et tasser la terre dans le moule, pour évacuer le maximum d'air.

* La texture est trop sableuse.

Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle:
changer de carrière, ou mélanger la terre avec un sol argileux.

* La texture est trop silteuse (le squelette est trop fin).

Il faut être plus vigilant à l'analyse de contrôle. Mieux vaut changer de carrière.

e) Résistance à l'érosion à l'eau

Quand on utilise ce test, le bloc est déjà considéré comme valable car il a subi avec succès les autres tests. Mais on a un doute pour son aptitude face à l'eau.

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

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

- soit la surface de la carrière n'a pas été nettoyée de sa couche de surface,
- soit la carrière devient silteuse et il vaut mieux la quitter, si possible.

(Voir tableau récapitulatif en annexe I)

1,7) Relation entre la qualité des blocs et leur utilisation

1,71) Les blocs de toiture

Pour mieux comprendre l'incidence d'un sol sur la qualité d'un bloc, voici quelques résultats d'analyses et de tests faits pour des blocs de toiture (20 x 15 x 6). Ces blocs sont fabriqués à partir des quatre "sols type" d'Iférouane, ainsi que de certains mélanges de ces sols.

Sol	Texture	Analyse de contrôle		Tests		Utilisation
		Cigare	T.E.M.	Mr	E	
S1	Sableux	4 cm	19 %	1,3	100 %	Non
S3	Silteux	8 cm	22 %	2,8	87 %	Non
S5	Mélangé	8 cm	16 %	7	42 %	Oui
S7	Argileux	25 cm	22 %	11	40 %	Non fissuré
S1+S7	Sab.arg.	8 cm	21 %	6	44 %	Oui
S1+7% h.d.v.	Sableux	8 cm		0,5	3 %	Non

a) Choix du sol pour les blocs de toiture

Pour le projet, un bloc de toiture doit être résistant.

En se basant sur la résistance à sec, on a choisi uniquement le sol argileux de type S7.

Il donne un petit bloc très compact et très dur, dont la fabrication demande beaucoup d'eau (T.E. = 22%) et beaucoup d'énergie à l'extraction (pénible à la pioche).

Ce choix comporte deux inconvénients:

- Problème de gonflement-retrait

Certes, dans la zone d'Iférouane il n'y a pas ce danger puisqu'il ne pleut pas beaucoup et que l'argile est stable (fissurations limitées).

Mais Iférouane est un centre de formation pour des maçons provenant d'autres régions où les pluies sont plus importantes et où, peut-être, l'argile est de type "gonflante". Donc il y est risqué de leur apprendre à bâtir des toitures avec des blocs argileux.

- Sol argileux rare et difficile d'accès à Iférouane

Les poches de sol argileux sont rares à Iférouane et situées au sud de la ville.

Le transport étant difficile, ce choix de sol pénalise la population, surtout celle du nord.

Or, les résultats des tests indiquent qu'il existe d'autres sols disponibles pour la fabrication de blocs de toiture, ce sont:

- Le sol S5, naturellement mélangé et en grande quantité.

Résistance mécanique à sec ($M_r = 7$) doublement supérieure à la limite imposée. Erosion à l'eau aussi performante que le sol S7, mais sans risque de fissure car plus stable (42% contre 40% de perte).-

- Un mélange des sols S1 et S7

Le sol sableux S1 est amélioré par un apport de sol argileux S7 (le bon pourcentage du mélange est obtenu par l'essai du cigare de 8 cm). Les caractéristiques de "S1 + S7" se rapprochent de celles du sol mélangé S5.

Ces deux types de sols "S5" et "S1 + S7" offrent la possibilité à une plus large partie de la population de fabriquer des blocs de toiture. Et ce, avec moins d'eau de malaxage et moins d'efforts d'extraction que pour le sol S7.

b) Conséquences pour Iférouane

Il est possible d'économiser les réserves d'argile pour l'avenir, en la mélangeant à des sols sableux (les plus répandus à Iférouane).

C'est une économie en eau de près d'un quart qui est faite si on utilise "S5" au lieu de "S7" (T.E.M de S5 = 16% contre T.E.M de S7 = 22%).

1,72) Les blocs de mur

Dans les bâtiments en voûtes et coupes, la base des murs et les fondations doivent reprendre la poussée de toiture. Il est donc impératif de réserver les meilleurs blocs pour ces endroits-là, c'est à dire, tous les blocs dont le $M_r > 3\text{kg/cm}^2$.

Pour les bâtiments classiques, un $M_r > 2\text{kg/cm}^2$ est suffisant.

Enfin, pour tous les autres blocs dont le M_r est inférieur à ces 2 valeurs, seule la destination à de petits murs de clôture est tolérée.

[Attention: le remplacement de la toiture-terrasse d'un bâtiment existant par une coupole ou une voûte ne doit être entrepris qu'avec extrême précaution.]

1,8) Temps minimum de séchage

Sur deux sites de production, l'un avec un sol mélangé et l'autre avec un sol argileux.

9 blocs de toiture $20 \times 15 \times 6$ ont été produits chaque jour durant 20 jours. Au 21ème jour, ils ont tous subi le test de rupture et leur T.E. a été calculée (le temps de séchage variant de 1 à 21 jours).

- 9 blocs :
- * 3 blocs à la T.E. normale.
 - * 3 blocs à la T.E. plus élevée.
 - * 3 blocs à la T.E. plus faible.

3 blocs $40 \times 18 \times 10$ ont aussi été faits uniquement à la T.E. normale et avec le sol mélangé. (Avec l'autre sol: fissures).

Conclusion - d'après résultats recueillis en saison froide:

Pour les gros blocs $40 \times 18 \times 15$, 7 jours suffisent pour obtenir la résistance exigée ($M_r = 3\text{kg/cm}^2$).

Pourtant, le bloc n'est pas tout à fait sec:

- * 1 % d'eau après 3 semaines de séchage,
- * 0,5 % d'eau après 2 mois.

Il ne faut que 4 jours pour les blocs $40 \times 18 \times 10$ et seulement 3 pour les petits blocs $20 \times 15 \times 6$.

2) LE MORTIER

2,1) Rôle du mortier de pose

Certes, il sert à coller les blocs entr'eux pour bâtir les murs. Mais une fois sec, il doit surtout rendre le mur monolithique.

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

La résistance du mur dépend en grande partie de la qualité du mortier.

Un mauvais bourrage des joints verticaux diminue de 20% à 50 % la résistance à la compression d'un mur et supprime toute résistance au cisaillement.

2,2) Caractéristiques d'un mortier de terre

Les règles fondamentales de la maçonnerie s'appliquent aussi pour le matériau terre.

2,21) Résistance

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

* Si le mortier est plus résistant:

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

* Si le mortier est moins résistant:

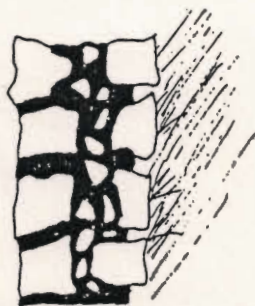
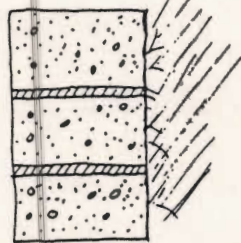
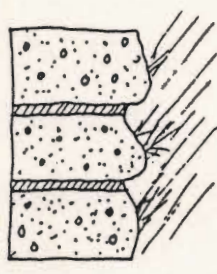
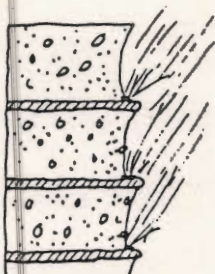
Les joints se creusent, laissant la face extérieure des blocs se détériorer. Le mur perd vite en épaisseur.

* Si le mortier est de même résistance:

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

* Cas d'un mur de pierre lié au mortier de terre:

Le mortier est moins résistant que le bloc, mais dans ce cas le bloc résiste à la pluie. Donc une fois que le joint s'est usé suffisamment loin dans le mur, l'eau ne peut plus aller l'éroder. L'ensemble reste stable.



2,22) Retrait

Il faut limiter le retrait du mortier.

- * L'épaisseur des joints est de 2 cm pour l'adobe.
- * La consistance ne doit pas être trop liquide (une mauvaise tendance pour faciliter le bourrage des joints verticaux).
- * La texture doit être légèrement plus sableuse que celle des blocs. (Si l'on augmente le taux d'argile pour améliorer l'adhésion, tous les joints seront fissurés après séchage).

2,3) Mortier de terre sur voûtes et coupoles

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

2,31) Inconvénient de ce mortier

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

A cause de ces fissures, le mortier est moins résistant que les blocs, ce qui peut entraîner une usure rapide de la toiture.

2,32) Recommandations

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

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

3) L'ENDUIT

3,1) Enduit traditionnel d'Agadez

Quelques rares maisons du sud d'Iférouane ont été recouvertes d'un enduit de terre très efficace, dont la préparation et l'application sont venues d'Agadez.

3,11) Préparation de l'enduit

- *Le mélange:*

20 brouettes de terre argileuse,
7 brouettes de fumier de boeuf,
2 sacs de 100 litres de balle et tige de mil.

- *Le pourrissage:*

Dans la cour de la maison, creuser une fosse.
Y jeter le mélange et le saturer en eau.
Laisser pourrir durant 2 mois
Remuer de temps en temps.

3,12) Application de l'enduit

- *Préparation du support:*

Les maçons ont eu soin de laisser les joints creux entre les blocs pour améliorer l'accrochage.

Sans mouiller le mur, jeter la boue en une seule couche, épaisse de 5 cm.

L'enduit se fait au début de la saison des pluies (donc en période très chaude), le matin de 7h à 11h.

3,13) Vieillessement de l'enduit

L'enduit vieillira bien s'il a été arrosé dans l'après-midi du jour d'application. Mais eux ne le feront pas.

S'il ne pleut pas, il n'est pas réhydraté et il se fissure trop vite, se décolle du mur et risque de tomber par plaques.

S'il pleut, il travaille moins vite et les différences d'application, dûes aux quatre crépisseurs, sont camouflées: l'aspect devient uniforme.

Au fil du temps, les pluies creusent les fissures.

Après 25 ans, l'enduit est toujours là: son épaisseur est de 3 cm et il porte des fissures de 0,5 cm à 1 cm de large.

3,14) Utilisation de l'enduit par la population d'Iférouane

Dans cette zone, la pluviométrie est très faible (< 50 mm/an), et l'enduit d'Agadez nécessite un bon savoir faire, du temps, du travail et surtout beaucoup d'eau pour le pourrissage du mélange terre/paille/fumier.

De ce fait, les gens ont simplifié la méthode et modifié la préparation. La paille n'est plus utilisée, les gens se contentent d'un mélange: terre/fumier de chèvre (pas de boeuf).

Bien que tout le monde souhaiterait avoir un enduit qui durera très longtemps, les gens ne veulent pas faire le travail nécessaire pour préparer un tel enduit. Il faut aussi tenir compte du fait que le fumier de boeuf et la paille deviennent de plus en plus rares.

3,2) Enduit du Projet PCGRNAT

Pour protéger les bâtiments en voûtes et coupes, le Projet réhabilite l'enduit d'Agadez en le modifiant quelque peu:

- les fibres de blé remplacent les fibres de mil car dans l'oasis d'Iférouane, la culture du blé domine les autres;
- on utilise le fumier de chèvre car les boeufs sont rares;
- on l'applique en 2 couches, pour éviter les fissures,
 - la première de 2 cm d'épaisseur, sur support mouillé,
 - la deuxième de 0,5 cm d'épaisseur, un jour après la première, pour fermer les fissures.

Cet enduit est une solution pour la population, mais son entretien est indispensable pour la sécurité du bâtiment.

Actuellement, à Iférouane, les enduits du Projet ont quatre ans d'existence et peuvent encore très bien remplir leur fonction de protection, d'étanchéité et d'esthétisme.

A Tchintelloust, 80 km plus au sud, les pluies ont été plus fortes, les enduits ont beaucoup plus souffert: ils sont à refaire au niveau des endroits exposés du bâtiment (arêtes de mur, allèges de fenêtre).

Un enduit plus durable reste à trouver pour mieux protéger les voûtes et les coupes.

3,3) Choix d'un enduit

L'enduit choisi doit rester accessible à la population.

L'utilisation d'un enduit "sable/ciment armé d'un grillage de poule" est certes efficace (dans la mesure où les inévitables fissures sont contrôlées), mais réservée à une minorité de gens riches. Il reste aussi le problème que ce type d'enduit est dangereux pour les toitures (par ce que l'eau qui s'infiltre par des fissures, ne pouvant s'évacuer, sature le toit, menant à un effondrement éventuel).

La recherche s'oriente donc vers la stabilisation du matériau terre à l'aide de substances, elles aussi faciles à se procurer.

Le ciment et la chaux, coûteux et devant être importés, sont à éviter.

Restent l'huile de vidange (en quantité croissante avec le parc automobile, et généralement brûlée ou jetée dans la nature) et les fibres végétales (essentiellement le fumier de chèvre ou de boeuf).

3,31) Principe de stabilisation

Stabiliser la terre pour obtenir un bon enduit extérieur, c'est modifier les caractéristiques de la structure terre-eau-air afin d'obtenir les propriétés durables:

- d'étanchéité,
- de souplesse,
- de résistance mécanique.

Les mécanismes de stabilisation de la terre sont nombreux. Voici les deux que nous utiliserons:

- l'imperméabilisation avec un produit hydrophobant, l'huile de vidange;
- l'armature avec les fibres du fumier de chèvre et de boeuf.

a) L'imperméabilisation avec l'huile de vidange

L'huile de vidange est un liquide épais, imperméable à l'eau. Associé à la terre, ce liquide peut colmater les vides, les pores, les fissures.

* Remarques

- Grâce à ce stabilisant, l'eau ne peut plus atteindre les plaquettes d'argile et les faire gonfler. Si elles ne gonflent pas, il ne peut plus y avoir les fissures dues au retrait (fissures pouvant attirer l'eau à l'intérieur du matériau sec, lors d'un prochain contact humide.)

- Plus la texture est fine, plus grande est la surface spécifique, donc plus importante est la quantité de stabilisant nécessaire. (Par le choix d'une bonne granulométrie, on peut réduire le volume des vides.)

- Ce stabilisant convient mieux pour des sols sableux, du fait de leur plus grande stabilité à l'eau.

- C'est l'argile qui colle les grains de sable entr'eux. Si on mélange la terre avec trop d'huile, les liaisons sable/argile sont impossibles et la cohésion chute, la terre imperméabilisée reste grasse et fragile.

- Si on met peu d'huile, les forces de cohésion entre argile et sable restent fortes. Le matériau sec est résistant mais l'argile, pas assez enrobée, peut gonfler en présence d'eau et ainsi créer une fissure d'infiltration lors du retrait.

* Conclusion

L'imperméabilisation est inversement proportionnelle à la résistance mécanique et dépend de la texture du sol.

b) L'armature avec du fumier de boeuf et de chèvre

L'étude du stabilisant "fumier" est intéressante pour comprendre d'où provient la qualité de l'enduit traditionnel. Pourquoi un pourrissage de 2 mois dans l'eau? Y a-t-il une différence de qualité dans l'enduit, suivant que l'on utilise du fumier de boeuf ou de chèvre?

Le fumier est considéré comme un amalgame de fibres végétales ayant subi une transformation biochimique lors de la digestion. Ces fibres jouent le rôle d'armature, consolidant les liens entre les particules. Ainsi, le mélange de terre résiste mieux aux contraintes mécaniques telles que la dilatation et l'action de l'argile (gonflement/retrait). La présence de substances biochimiques joue probablement un rôle dans la stabilisation des plaquettes d'argile.

3,32) Analyse en laboratoire

Avant de tester à l'extérieur différents enduits stabilisés sur quelques m² de voûtes ou coupoles, un premier travail de sélection est indispensable au laboratoire. Les critères de sélection reposent essentiellement sur l'essai de perméabilité et, éventuellement, sur un essai de compression simple.

a) Mélange Terre + Huile de vidange

* *Choix des sols*

La recherche du meilleur dosage en huile de vidange se fait sur 4 sols:

- Sol A: type S5 (mêlé), corrigé avec 18% de sable très fin (éolien); le mélange a une cohésion moyenne (essai du cigare = 8 cm).
- Sol B: type S5 corrigé avec 18% de sable grossier du kori (fluvial).
- Sol C: type S1 sable grossier, très peu cohésif (essai du cigare = 4 cm).
- Sol D: type S7 (argileux) très cohésif (essai du cigare = 30 cm).

Pourquoi ces 4 sols?

- Sols A et B.

Ils sont choisis pour mettre en évidence qu'une bonne imperméabilisation passe d'abord par une réduction du volume des vides (améliorée par la texture).

Les sols A et B diffèrent par les 18% de sable rajoutés. Or la grosseur des grains de sable n'est pas la même pour A et B. Donc la granulométrie est différente. Ce qui implique qu'un des deux sols a un volume de vide inférieur à l'autre.

(En principe, le sable éolien, très fin, comble mieux les vides entre les différents constituants d'un sol que ne le ferait le gros sable du kori. Donc, à un dosage identique en huile de vidange, le sol A devrait être plus imperméable que le sol B.)

Les sols A et B sont homogènes (ni trop sableux, ni trop argileux).

Il est maintenant intéressant d'étudier le comportement aux deux extrêmes: sol sableux et sol argileux.

- Sol C, sol sableux.

On va vérifier l'efficacité de l'imperméabilisation sur des grains inertes, au détriment bien sûr de la résistance mécanique.

Ce sol devrait présenter les plus hautes performances à l'essai de perméabilité et les plus basses à l'essai de compression.

- Sol D, sol argileux.

Compte tenu de la grande surface spécifique des petites particules, il faudra plus d'huile de vidange pour arriver aux mêmes performances d'imperméabilisation que pour les trois autres sols.

Mais, bien sûr, on gagne en résistance mécanique.

A surveiller, en phase de séchage des plaquettes, car il y a un risque de fissuration.

* Préparation des plaquettes-échantillons

Pour chaque sol, on réalise avec l'huile de vidange 10 mélanges avec un pourcentage croissant de 0% à 30% : (0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30%).

Avec chaque mélange, on moule:

- . 3 plaquettes 10 x 10 x 2 pour l'essai de perméabilité;
- . 3 éprouvettes cylindriques ($h = 5$ cm, $\varnothing = 3,5$ cm) pour l'essai de compression simple.

Après séchage complet de quatre semaines à l'extérieur, les essais commencent à l'intérieur du laboratoire:

- . essais de perméabilité par séries de 5, sur un mois.
- . essais de compression simple, sur un jour.

* Résultats de l'essai de perméabilité

Pour la façon de procéder et l'objectif de l'essai, se rapporter au Volume II "le matériau terre", paragraphes 2,1 et 3,4.

Pour les quatre sols, les essais sur les dosages à plus de 20% ont été interrompus avant la fin de la perforation (trop longs, trop imbibés).

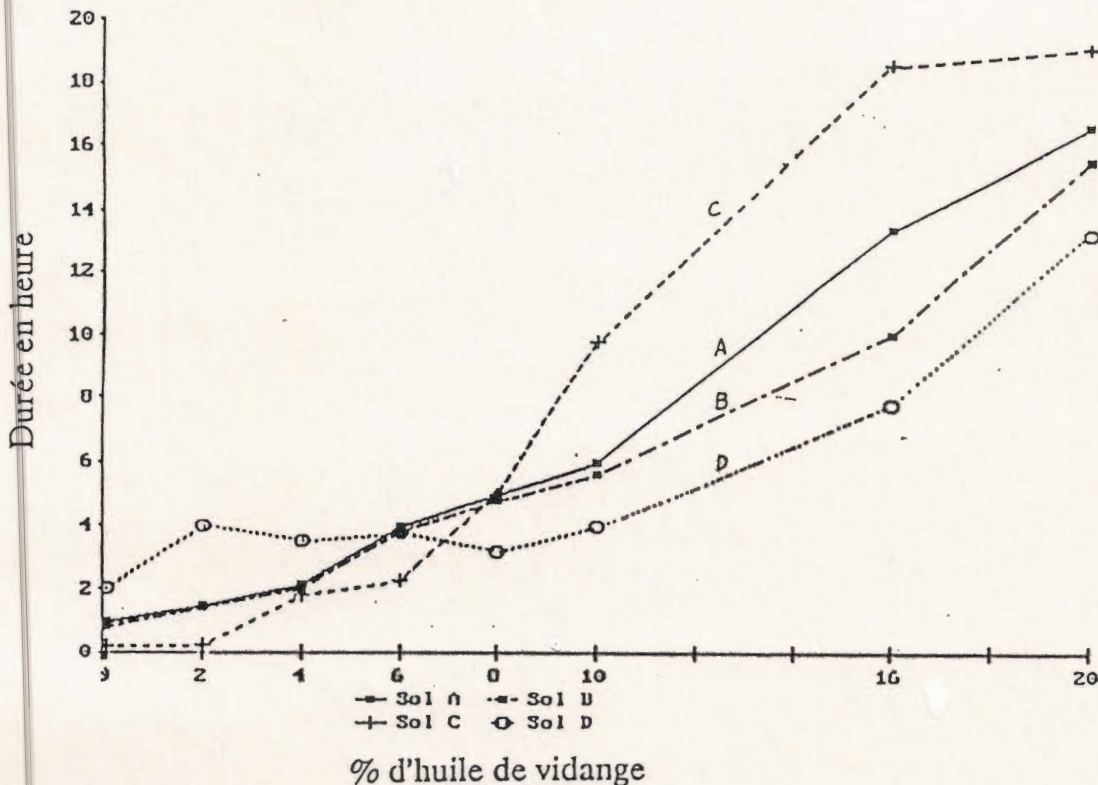
Pour la recherche du meilleur sol et dosage, cet essai doit montrer en combien de temps l'eau traverse la plaquette:

- soit par perforation (chute des gouttes d'eau),
- soit par absorption par la plaquette.

Etant donné qu'il est risqué de retourner la plaquette pour voir si l'eau absorbée a traversé plus vite que la perforation, on note le niveau d'absorption en fin de perforation (on note s'il reste des zones sèches ou si toute la plaquette est mouillée).

Le bon dosage est celui de la plaquette qui résiste le plus longtemps à la perforation sans être totalement mouillée.

DUREE / % D'HUILE DE VIDANGE



Résultats sur sol A

- . Début de l'impact: rapide 1', 9' (7%) et 25' (15%).
- . Ø du cratère: 20 mm.
- . Le bon dosage: 8%. Durée 5h00. Perforée mais encore des zones sèches dessous.
- . Aspect du mélange: correct à 6 et 8% (avant et après, il reste des parties non huilées).

Résultats sur sol B

- . Début de l'impact: rapide de 5' à 30'.
- . Ø du cratère: 14 mm (moins conique que sur sol A).
- . Il n'y a pas de bon dosage. Dès 1% et 2%, tout est imbibé. Durée: 1h25.
- . Aspect du mélange: correct jusqu'à 10%, ensuite restent des parties argileuses non huilées.

Résultats sur sol C

- . Début de l'impact: augmente beaucoup, suivant le dosage: 3'(4%), 12'(8%), 1h30(10%),..., 6h (15%).
- . Ø du cratère: 14 mm.
- . Le bon dosage: 6%, durée 2h15. Détient le record de durée: 21h (20%).
- . Bon aspect du mélange, quel que soit le dosage.

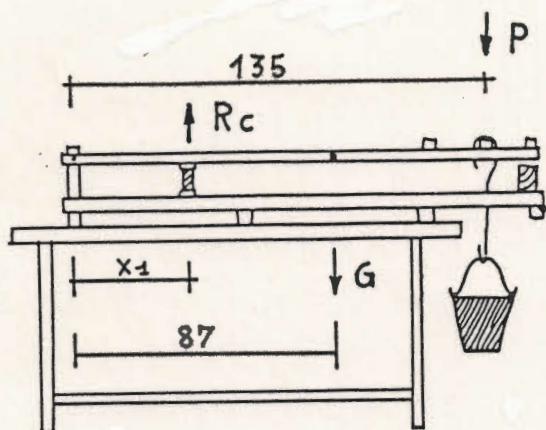
Résultats sur sol D

- . Début de l'impact: rapide de 3' à 45'.
- . Ø du cratère: 35 mm.
- . Le bon dosage: 4%. Durée 3h30. Mais fissures de retrait. Ces fissures disparaissent avec un dosage supérieur à 10%.
- . Très long à sécher.

Les résultats confirment nos hypothèses: le sol A, mélangé, plus compact (moins de vides) que le sol B, offre à 8% la meilleure imperméabilisation à l'eau.

** Résultats de l'essai de compression simple*

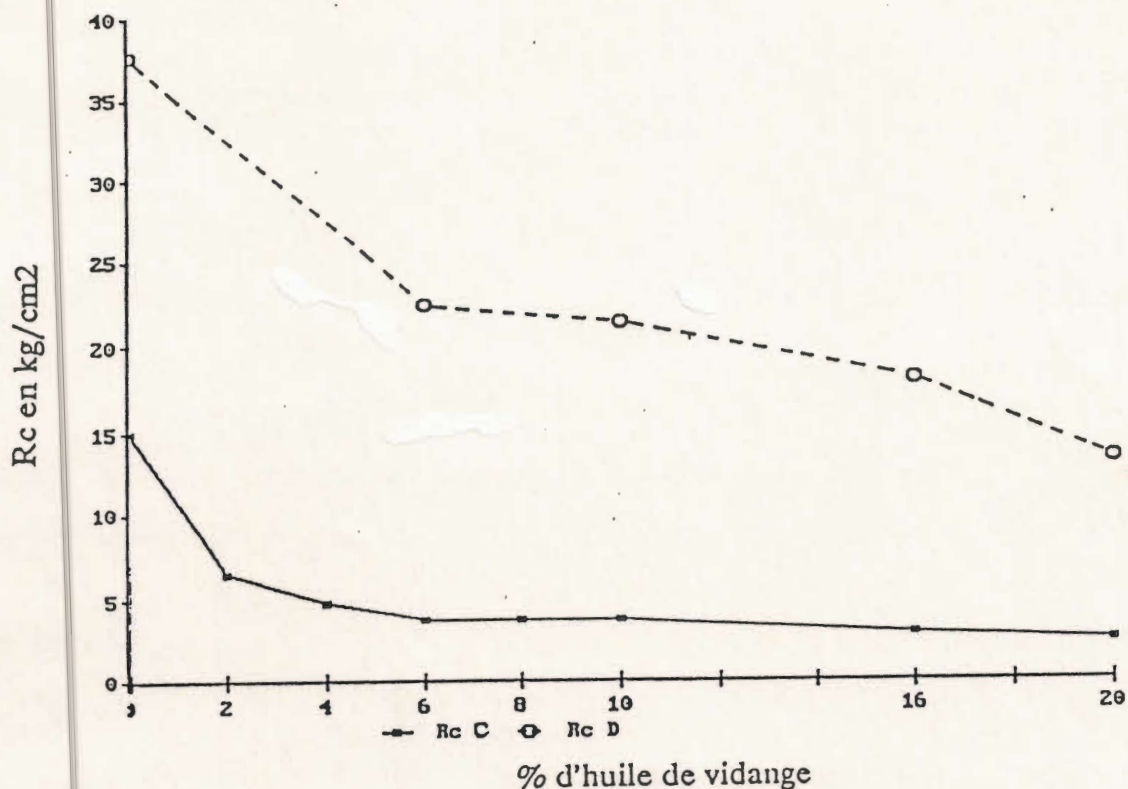
Les éprouvettes cylindriques de 3,5 cm de diamètre et de 5 cm de hauteur sont écrasées à l'aide du "casse-bloc", celui-ci posé sur une table et chargé différemment:



$$R_c = \frac{135 P + 87 G}{5 \times X1} \text{ en kg/cm}^2$$

Chaque éprouvette est surfacée au mortier de ciment, afin que les deux facettes soient lisses et parallèles.
Seuls les sols C et D sont testés.

RESISTANCE A LA COMPRESSION / % D'HUILE DE VIDANGE



La régression de la résistance à la compression, en fonction du pourcentage d'huile de vidange,

est brutale pour les 1ers dosages,
suit un palier pour les dosages à 6, 8 et 10%,
et rechute à nouveau vers la fin.

L'huile de vidange affecte donc plus brutalement la Rc du sol sableux que la Rc du sol argileux.

On peut donc dire qu'un dosage à 8% se situe dans la zone de palier.

Ceci offre une marge d'erreur lors du vrai mélange à l'extérieur, sans risque d'avoir des différences brutales de résistance dans l'enduit.

* Conclusion sur l'enduit de terre + huile de vidange

Pour tester, à l'extérieur, l'efficacité de l'enduit de terre stabilisé à l'huile de vidange, la terre est mélangée (essai de cigare à 8), sans gravier et stabilisée entre 6 et 8%.

Cette étude en laboratoire a permis de découvrir:

- . L'efficacité de l'essai de perméabilité. En effet, les triplets de plaquettes de même sol et même dosage ont souvent donné les mêmes valeurs de durée, à 10% près.
- . La relative fiabilité de l'essai de compression simple, malgré un appareil rudimentaire. En effet, les triplets d'éprouvettes de même sol et même dosage ont donné à peu près la même valeur, et les deux courbes sont cohérentes entr'elles.

Il sera important de contrôler la qualité du malaxage, en situation réelle.

b) Mélange terre + fumier

* Caractéristiques des 2 fumiers

Fumier de boeuf:

Il est sec, se présente sous forme de grosses boules très légères, de la taille d'un gros oeuf. Il s'effrite facilement en petits brins d'herbe de 0 à 2mm.
Broyé, sa densité est de 190 kg/m³.

Fumier de chèvre:

Il est sec, se présente sous forme de petites olives noires. Il s'effrite difficilement en petits brins d'herbe de 0 à 2 mm.
En boulettes, sa densité est de 330 kg/m³. Broyé, elle est de 320 kg/m³.

* Essai de perméabilité

Pour vérifier le bien fondé du temps de pourrissage, on réalise deux mélanges à partir d'un sol argileux:

- . mélange B, avec 50% en volume de fumier de boeuf;
- . mélange C, avec 50% en volume de fumier de chèvre.

On humidifie et on malaxe chaque jour ces deux mélanges, durant quatre semaines. Mais à un jour, une semaine, deux semaines, trois semaines et quatre semaines, on moule trois plaquettes des deux mélanges.

On les laisse sécher pour les tester ensuite à l'essai de perméabilité.

Résultat:

Temps de malaxage		1j	1s	2s	3s	4s
B	Durée h.	3.00	3.20	3.20	4.30	4.00
	Ø mm	30	25	25	25	25
C	Durée h	2.20	3.45	3.50	3.00	3.00
	Ø mm	25	15	12	10	10

(Résultat du sol non stabilisé: Durée = 1h00, Ø = 35 mm.)

On peut donc confirmer l'utilité du temps de malaxage.

De plus, on constate que le fumier de chèvre résiste un peu moins longtemps à la perforation, mais diminue bien mieux l'effet "perforateur et destructeur" des impacts de gouttes (\varnothing du cratère 2,5 fois plus petit).

** Conclusion sur l'enduit de terre + fumier*

Il semblerait que le fumier de chèvre arme mieux la terre, par ses petites fibres compactes, que ne l'arme le fumier de boeuf.

Le temps de pourrissage, nécessaire pour que les constituants biochimiques du fumier puissent agir comme stabilisants, est plus court avec le fumier de chèvre qu'avec celui de boeuf.

On peut donc préférer, pour l'extérieur, l'emploi du fumier de chèvre associé à trois semaines de pourrissage.

Pour confirmation, les deux mélanges seront testés à l'extérieur.

3,33) Analyse à l'extérieur

a) Le site

** Le bâtiment support*

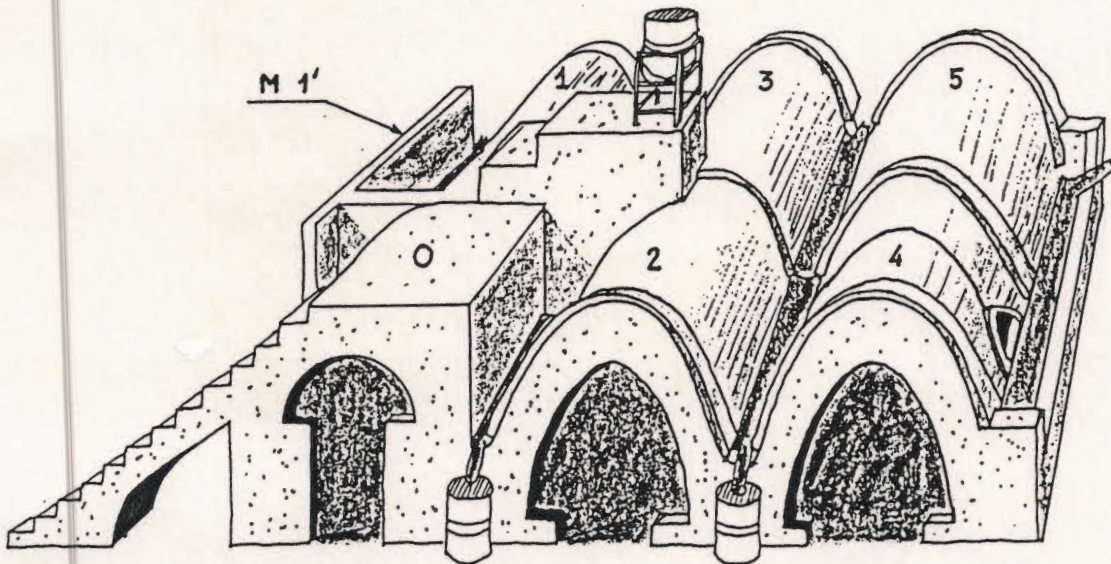
La structure qui sert de support aux différents enduits testés à l'air libre est un ensemble de six voûtes nubiennes en adobe, supportées par un tout petit soubassement.

Cet ensemble a servi uniquement dans sa phase de construction, comme exercice pratique pour un stage de formation aux techniques de construction sans bois.

En principe, ces voûtes sont détruites pour être maçonnées une nouvelle fois par d'autres stagiaires.

On a pu, grâce à un château d'eau, arroser artificiellement les différents enduits, observant leur usure jusqu'à parfois endommager la voûte elle-même.

Une plate-forme d'approvisionnement en eau a été façonnée sur le haut d'une des voûtes. C'est donc sur cinq voûtes et six petites façades que les enduits sont testés.



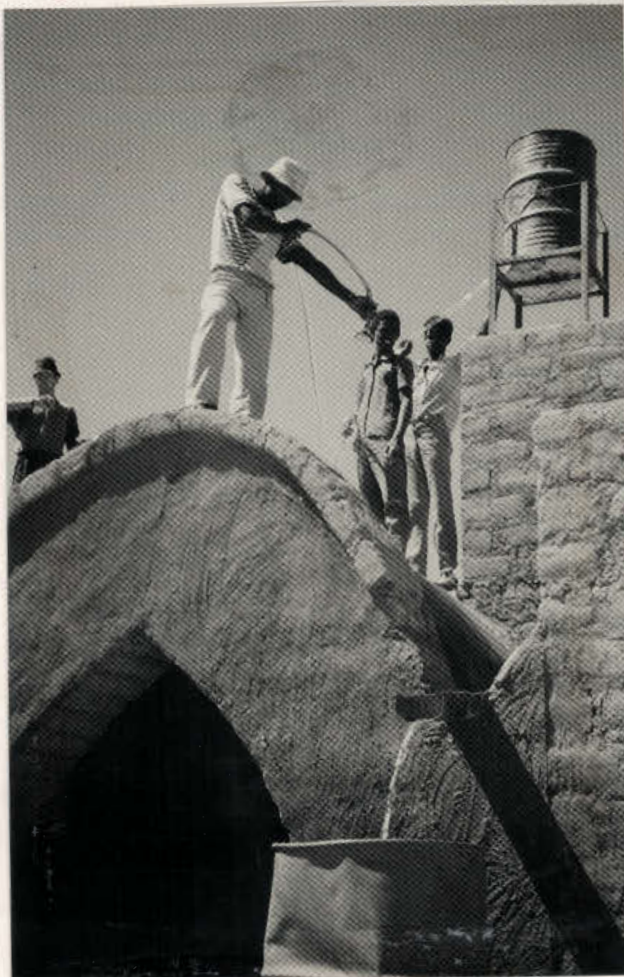
** Le matériel d'arrosage et de mesure*

Il comprend:

- . un fût de 200 l. d'eau fixé à 2 m au-dessus des voûtes, au centre de la structure. (On y accède par un escalier en terre),
- . 15 m de tuyau de jardin flexible ($\varnothing = 20$ mm) fixé à la base du fût,
- . un pommeau de douche fixé à l'extrémité du tuyau, pour diffuser le jet d'eau en pluie,
- . 6 fûts de 200l placés sous les gargouilles, pour récupérer l'eau d'arrosage,
- . un cône de pluviométrie,
- . une règle métallique de 3 m, étalonnée tous les 5 cm,
- . un mètre,
- . une montre avec les secondes,
- . un bloc-note, crayon, appareil-photo.

b) La méthode d'arrosage

** Le déroulement*



La séance d'arrosage dure un jour pour les toitures et un autre pour les murs. Le déroulement est le même pour les toitures que pour les murs.

Chaque séance comprend plusieurs cycles d'arrosage, jusqu'à détérioration évidente de chaque enduit.

A chaque cycle, on arrose successivement les 5 voûtes (ou les 6 murs), avec un temps d'arrosage identique pour chaque voûte (ou chaque mur).

Fréquence du cycle: 1 heure.

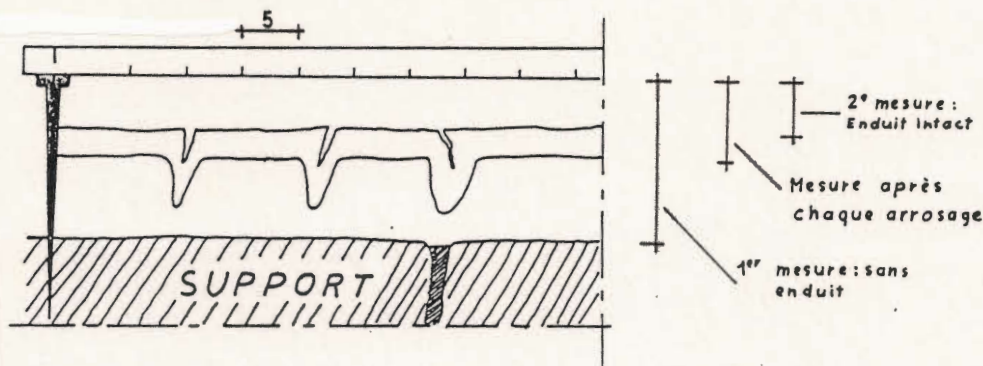
Pour chaque voûte (ou mur), on arrose toujours sur la même zone d'impact, en tenant le pommeau de la douche toujours à la même hauteur: 1,10 m.

Dès l'arrosage terminé, on procède aux mesures et à l'observation:

- . de la zone d'impact,
- . de la zone de ruissellement (1 m plus bas),
- . du dessous de la voûte (derrière le mur).

* Mesure de l'érosion

Pour chaque zone d'impact et de ruissellement, on peut placer au-dessus et au centre une règle droite étalonnée tous les 5 cm, celle-ci reposant à ses extrémités sur un piton fixe. La règle est maintenue à quelques centimètres au-dessus de l'enduit, toujours à la même place, après chaque arrosage. Il suffit de jauger la profondeur tous les 5 cm, comme l'indique la règle.



L'usure dépend du temps d'arrosage.

Pour que l'enduit le moins résistant puisse être mis en évidence, on fixe les premiers cycles à seulement 30 secondes d'arrosage pour toutes les voûtes.

Avec le cône de pluviométrie, placé à 1,10 m sous le pommeau de douche, un temps de 30 secondes indique 80 mm de précipitation. Cela correspond déjà à une pluie brutale.

Si en zone d'impact l'arrosage ne traduit pas la réalité de la pluie, en zone de ruissellement les réactions de l'enduit sont vraisemblables.

* Le personnel

- . 1 personne arrose, chronomètre le temps d'arrosage et mesure la profondeur d'usure.
- . 2 personnes tiennent la règle de mesure.
- . 1 personne observe et prend les notes.

Pendant que la dernière finit de prendre les notes, les trois autres ont le temps de remplir le réservoir avant le cycle suivant.

* Observation de l'érosion

L'observation est identique pour chaque enduit et support.

Il est conseillé d'utiliser une fiche comme celle montrée sur la page en face.

TEST D'ARROSAGE		Mur:	X	N°4
		Toiture:		
Nature de l'enduit		:	Sol naturel silteux (S6)	
Préparation du support		:	Nettoyé, mouillé	
Application		:	1 couche de 10 mm	
Cycle		Mesures et observations		
N° durée	heure	Impact	Ruissellement	
Sans enduit		5 ² 5 ¹ 4 ³ 5 5 ¹	4 4 ² 4 ¹ 4 4 ¹	
Avec enduit		4 4 ² 4 4 ¹ 4 ¹	3 ² 3 2 ³ 3 ¹ 3	
		Fissuré, lisse.	Fissuré, lisse.	
1 30 s	9h00	Sérieuse dégradation.	Sérieux léssivage.	
2 30 s	10h00	Elargissement des fissures.	Les plaques s'usent par les bords très ramolis.	
3 30 s	11h00	5 ¹ 5 ² 5 ¹ 5 ² 5	3 ⁷ 4 4 ² 3 ³ 4	
		Disparition de l'enduit.	Apparition des blocs.	

c) Les différents enduits testés (sur voûtes V et murs M)

Les voûtes et leurs façades sont protégées par le même enduit. On teste mieux l'étanchéité sur les voûtes, et la qualité de l'accrochage sur les murs. Il ne faut pas oublier que la vitesse de ruissellement est plus importante sur les murs.

* Les quatre enduits à base de fumier

N°1: Enduit à 40% de fumier de chèvre

(Essai de perméabilité: durée = 2h00, Ø = 12 mm.)

Sur V1, en deux couches (la deuxième, plus fine, sert à boucher les fissures de la première couche).

Sur M1, en 1 couche (sur la moitié droite du support, on améliore l'accrochage par des petits cailloux plantés dans le mur).

N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

Sur V5 et M7, en une couche. (Les graviers sont ajoutés pour vérifier s'ils changent la qualité de l'enduit. Les excellents enduits d'Agadez sont très graveleux: 0 des graviers = 15mm).

N°3: Enduit à 40% de fumier de chèvre + sable

Sur M1 et V5, en une couche. L'enduit est moins fissuré mais plus fragile aux chocs.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

(Essai de perméabilité: durée = 1h30, \varnothing = 15 mm)

Sur V3 et M3, en deux couches. Cette voûte est la seule à être maçonnée en deux couches de blocs. Les blocs de la deuxième couche sont posés à plat sur ceux de la première. Cette méthode, employée par le Projet, doit augmenter l'étanchéité de la voûte.

* *Les deux enduits à base d'huile de vidange*

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé

(Essai du cigare : 8 cm)

(Essai de perméabilité: durée = 6h00, \varnothing = 20 mm)

Sur V2, en deux couches. (La deuxième couche, plus fine, est appliquée après que la première soit totalement sèche - 2 jours - afin de boucher les fissures. La dernière couche est lissée. Epaisseur totale: 10mm.)

Sur M2, moitié droite, en une couche non lissée (épaisseur = 10 mm).

Sur M2, moitié gauche, en deux couches. (Première couche non lissée - épaisseur = 8 mm; et deuxième couche lissée - épaisseur = 4 mm.

Amélioration du support en plantant des petits cailloux dans le mur.)

N°6: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé sableux

(Essai au cigare = 5 cm)

(Essai de perméabilité: durée = 5h, \varnothing = 15 mm)

Sur V4, en deux couches (épaisseur = 10 mm), lissées.

* *Un enduit de terre non stabilisée: sol naturel*

N°7: Enduit à base de sol silteux-argileux non stabilisé

Ce sol est extrait au centre d'Iférouane: sol S6 (voir plan page 2).

(Essai de perméabilité: durée = 45', \varnothing = 25 mm)

Sur V4, en deux couches fines. (Certains maçons considèrent ce sol comme efficace pour les enduits extérieurs à Iférouane.)

* *Des voûtes sans enduit*

Il s'agit des voûtes V1 et V5.

V5 est plus surbaissée que V1.

En testant ces voûtes nues, on peut vérifier l'efficacité d'un enduit et, de plus, comparer les infiltrations sur ces deux types de voûtes.

d) Comportement des différents enduits sous l'arrosage

Abréviations utilisées:

I = Zone d'impact

R = Zone de ruissellement

C = Cycle (les cycles sont de 30 secondes pour les cinq premiers et de 1 mn pour les suivants).

* *Enduits sur les voûtes*

N°1: Enduit à 40% de fumier de chèvre

C1-I: Deuxième couche enlevée. Les fissures de la première couche réapparaissent. Dessous mouillé dix minutes après l'arrosage.

C2-R: Les fissures s'élargissent sous l'écoulement de l'eau.

C3-Dessous I: Six secondes pour observer une fuite d'eau au goutte à goutte.

C3-I et C3-R: L'aspect est identique. Les plaques d'enduit sèchent très vite en une croûte dure mais, dessous, la terre du mortier reste molle (mortier de pose trop argileux).

C4-I et C4-R: L'eau a dissous le mortier de pose entre certains blocs. Trous de lumière en R, l'enduit est plus vertical, l'eau s'infiltré moins et attaque moins la maçonnerie.

C6-Dessous I: Déluge. Perte en épaisseur. (I = 3mm, R = 7mm).

Conclusion:

Bien que l'érosion soit faible, l'enduit est condamné par ses fissures de retrait. Plus l'enduit est épais, plus les fissures sont larges, d'où une dégradation plus importante.

- N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

C1: Dessus, les petites fissures se rebouchent.

C3: Aspect uniforme. Ruissellement important.

C4: Dessous mouillé.

C6-I: Plus d'enduit, les blocs sont attaqués.

C6-R: Pas de fissure. Perte d'épaisseur (I = 15mm, R = 8mm).

Conclusion:

Il n'y a pas concentration de l'érosion sur les fissures, car l'enduit moins résistant s'use uniformément. La matière emportée comble les trous. Il protège plus longtemps le support mais, bien sûr, demande à être renouvelé en fonction de la violence des pluies.

N°3: Enduit à 40 % de fumier de chèvre + sable

C1: Dessus, les petites fissures se rebouchent.

C2: Aspect uniforme. Ruissellement important.

C3: Dessous mouillé.

C6-I: Plus d'enduit, les blocs sont attaqués. C6-R: Pas de fissure.

Conclusion:

Il n'y a pas concentration de l'érosion sur les fissures car l'enduit moins résistant s'use uniformément. La matière emportée comble les trous. Il protège la toiture plus longtemps mais demande un entretien plus fréquent.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

C1: Lessivé dessus. Mouillé dessous, malgré les deux couches de blocs.

C3-I et C3-R: Aspect identique au N°1 sauf que les pièces du puzzle sont plus petites, donc, il y a plus de fissures. La largeur des fissures est de 2 à 4 mm en I et très fine en R.

C3-Dessous I: Le goutte à goutte commence.

C6-I et C6-R: Moins de paille dans l'eau d'écoulement qu'au N°1.

C6-Dessous I: Déluge. Perte de matière (I = 8mm, R = 6mm).

Conclusion:

Comportement identique au N°1. Il semble qu'il y ait moins de fibres qu'avec le fumier de chèvre, donc qu'il soit moins armé.

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé

C1: L'eau glisse sur la surface qui reste lisse et non fissurée.

C2: Un point orangé apparaît, $\varnothing = 8\text{mm}$.

C3: Le \varnothing du module argileux augmente ($\varnothing = 12\text{mm}$).

C4-I: Traces de fissures. Blanchissement des grains de sable.

C5-I et C5-R: Peu déformable au marteau. En R, quelques modules apparaissent.

C6: Un module s'est dissous. Perte d'épaisseur (I = 2mm, R = 2mm).

C7: A la place du module, il y a un trou en contact avec le bloc. A cet endroit, l'enduit fait 5 mm d'épaisseur.

C8-Dessous: Mouillé.

C9-I: Deux trous dans l'enduit de $\varnothing = 30\text{mm}$ dus à des modules dissous.

C9-R: Un vernissage brillant s'en va par pellicules. Il apparaît une surface rugueuse, mouchetée de blanc et d'orangé. Traces de fissures légèrement creusées: (10mm de large, 4mm de profondeur). L'eau de ruissellement est toujours propre.

Conclusion:

Cet enduit est beaucoup plus efficace que le précédent. Son grand défaut vient des modules argileux qui gonflent, se dissolvent et provoquent une brèche dans l'enduit.

N°6: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé sableux

C6-I et C6-R: Perte d'épaisseur (I = 1mm, R = 1mm).

C9: Comportement et aspect identiques au N°5. Mouchetage uniforme, mais aucun cratère dû au module n'atteint encore le support.

C9-Dessous: Aucune trace d'humidité.

Conclusion:

La terre est moins argileuse, donc les problèmes de fissures creusées et de modules argileux sont retardés.

N°7: Voûte sans enduit

C1: Infiltration immédiate et écoulement à grosses gouttes à l'intérieur.

C2: Les joints, trop argileux, se dissolvent très vite. Les blocs sont très vite désolidarisés.

C6: L'eau traverse plus qu'elle ne ruisselle. Sur la voûte V5, plus surbaissée, la zoned'impact est plus horizontale, d'où une infiltration plus importante. Un bloc tombe.

(Le lendemain, peu de fissures dans les blocs, mais beaucoup dans les joints).

Conclusion:

Mise en évidence de l'importance d'un mortier mélangé, suffisamment collant mais pas trop argileux. Les multiples fissures de retrait dans les joints ont grandement facilité l'infiltration d'eau. Cette faible résistance à l'eau des voûtes a bien aidé l'absorption des enduits. Les voûtes étaient comme transparentes par le dessous, la surface interne étant immédiatement mouillée .

Par conséquent, un test d'arrosage a été fait sur une petite voûte en blocs très sableux, maçonnée avec un mortier à la limite de coller. Bien que la structure ait une résistance mécanique faible, les résultats du test ont été positifs. Certes, l'eau goutte à l'intérieur de la voûte mais les joints sont légèrement creusés par rapport aux blocs et l'usure est uniforme. Il n'y a pas de fissure de retrait.

* *Enduits sur les murs*

Le comportement des enduits de murs est quasiment le même que celui des enduits de voûtes, au cours des cycles d'arrosage. C'est pourquoi, pour chaque enduit, seul le bilan est indiqué.

N°1: Enduit à 40% de fumier de chèvre

L'aspect en surface ne change pas en I ni en R. L'enduit ressemble à un puzzle dont les pièces feraient de 5 à 10cm de Ø. Entre les fissures, les plaques sont très résistantes à l'eau (peu d'usure en surface et sur les bords). En fait, elles cachent l'eau qui s'infiltré par les fissures, derrière les plaques, et ronge le support.



Résultat:

- . l'eau traverse le mur de 40cm en R, au troisième cycle;
- . une plaque d'enduit tombe en R car le support, trop mouillé, ne peut contenir le poids de la plaque et la force de l'écoulement d'eau;
- . du côté où l'accrochage a été amélioré par des cailloux plantés dans le mur, aucune plaque ne tombe.

N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

Aspect identique à l'enduit N°1 sauf que les pièces du puzzle sont plus petites et que les fissures sont donc plus nombreuses.

De plus, à chaque cycle, davantage de cailloux sont lessivés et, lorsqu'ils tombent, commence une érosion grave: un trou se forme, l'eau de ruissellement s'y engouffre et traverse rapidement le mur par un joint de mortier mal tassé.

N°3: Enduit à 40% de fumier de chèvre + sable

L'enduit, peu fissuré et peu résistant, s'use uniformément, ne permettant pas la dégradation dramatique d'une zone.

L'eau n'a pas traversé le mur, excepté lorsque la zone d'impact a été totalement dénudée par la violence du jet d'eau.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

Comportement similaire à celui de l'enduit N°1, bien qu'ici les plaques d'enduit entre les fissures soient moins résistantes et s'usent sur leur bord, élargissant ainsi les multiples orifices.

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur un sol mélangé sableux

Côté droit: enduit d'une seule couche, non lissé.

Ce sont les modules argileux qui engendrent la dégradation de l'enduit. Chaque module a donné naissance à un trou qui s'élargit de 10 à 80 mm de Ø, surtout en zone de ruissellement où l'eau entaille littéralement l'enduit à partir d'un trou (succession de petites cascades).

Côté gauche: enduit en deux couches, lissé.

En fin de séance (neuvième cycle), les modules argileux commencent à apparaître: 8mm, tous les 10 cm. La dégradation va seulement débuter.

N°7: Enduit de terre naturelle (sol S6)

En 3 cycles, l'enduit de 10mm a littéralement fondu de I jusqu'au sol. L'érosion s'est faite par les fissures, en rongant les bords des plaques très peu résistantes à l'eau.

3,4) Bilan sur les enduits

3,41) Règles élémentaires de maçonnerie

Les tests d'arrosage confirment les règles élémentaires de maçonnerie concernant la nature et la pose d'un enduit.

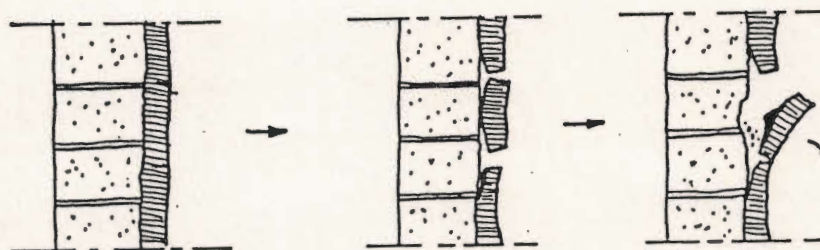
a) Les fissures sont la cause majeure de dégradations

Elles proviennent:

* Du taux d'argile dans la terre. Mieux vaut un enduit pas trop argileux pour diminuer la fissuration. Moins résistant aux chocs, il s'use uniformément. On a de bons exemples avec l'enduit N°3 et, bien sûr, l'enduit N°5 à 7% d'huile de vidange.

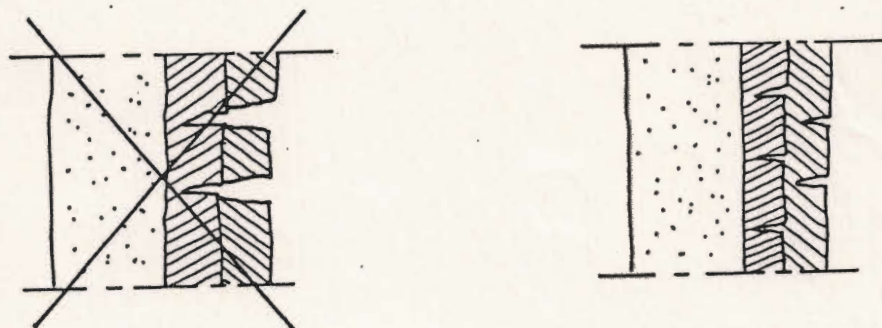
* Des conditions climatiques du jour de pose. Il faut éviter les grosses chaleurs et compenser l'évaporation par l'aspersion d'eau.

* De l'épaisseur de l'enduit. Plus la couche est épaisse, plus la fissure est ouverte en surface. Des grandes plaques d'enduit, lourdes, se trouvent désolidarisées. En tombant, elles arrachent un peu de support. Il ne faut pas plus de 1,5 cm d'épaisseur. Et il devient impératif de supprimer les graviers.



b) En plusieurs couches, l'enduit est plus étanche.

En principe, deux couches suffisent. La deuxième peut fermer les fissures de la première, à condition que la première ait fini de se fissurer. Sinon, ses fissures entraînent des fissures plus graves dans la seconde couche.



c) L'accrochage de l'enduit est indispensable

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

On doit toujours préparer le support:

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

3,42) Critique des essais et tests

a) Essais et tests en laboratoire

Le travail en laboratoire ne tient pas compte du retrait. Pour donner des réponses au problème de fissuration des enduits, il aurait fallu l'étaler sur plusieurs m².

b) Essais et tests à l'extérieur

La mesure de l'érosion est fastidieuse et peu précise, c'est pourquoi il n'est donné qu'un résultat global au sixième cycle d'arrosage.

Ce résultat ne reflète pas l'usure essentielle: l'évolution des fissures (largeur, profondeur). Mieux vaut utiliser la photo comportant une échelle de grandeur.

De plus, les cycles d'arrosage étant très rapprochés, on ne connaît pas assez la réaction au mouvement de "gonflement/retrait".



N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

Sur V5 et M7, en une couche. (Les graviers sont ajoutés pour vérifier s'ils changent la qualité de l'enduit. Les excellents enduits d'Agadez sont très graveleux: 0 des graviers = 15mm).

N°3: Enduit à 40% de fumier de chèvre + sable

Sur M1 et V5, en une couche. L'enduit est moins fissuré mais plus fragile aux chocs.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

(Essai de perméabilité: durée = 1h30, \varnothing = 15 mm)

Sur V3 et M3, en deux couches. Cette voûte est la seule à être maçonnerie en deux couches de blocs. Les blocs de la deuxième couche sont posés à plat sur ceux de la première. Cette méthode, employée par le Projet, doit augmenter l'étanchéité de la voûte.

** Les deux enduits à base d'huile de vidange*

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé

(Essai du cigare : 8 cm)

(Essai de perméabilité: durée = 6h00, \varnothing = 20 mm)

Sur V2, en deux couches. (La deuxième couche, plus fine, est appliquée après que la première soit totalement sèche - 2 jours - afin de boucher les fissures. La dernière couche est lissée. Epaisseur totale: 10mm.)

Sur M2, moitié droite, en une couche non lissée (épaisseur = 10 mm).

Sur M2, moitié gauche, en deux couches. (Première couche non lissée - épaisseur = 8 mm; et deuxième couche lissée - épaisseur = 4 mm.

Amélioration du support en plantant des petits cailloux dans le mur.)

N°6: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé sableux

(Essai au cigare = 5 cm)

(Essai de perméabilité: durée = 5h, \varnothing = 15 mm)

Sur V4, en deux couches (épaisseur = 10 mm), lissées.

** Un enduit de terre non stabilisée: sol naturel*

N°7: Enduit à base de sol silteux-argileux non stabilisé

Ce sol est extrait au centre d'Iférouane: sol S6 (voir plan page 2).

(Essai de perméabilité: durée = 45', \varnothing = 25 mm)

Sur V4, en deux couches fines. (Certains maçons considèrent ce sol comme efficace pour les enduits extérieurs à Iférouane.)

* *Des voûtes sans enduit*

Il s'agit des voûtes V1 et V5.

V5 est plus surbaissée que V1.

En testant ces voûtes nues, on peut vérifier l'efficacité d'un enduit et, de plus, comparer les infiltrations sur ces deux types de voûtes.

d) Comportement des différents enduits sous l'arrosage

Abréviations utilisées:

I = Zone d'impact

R = Zone de ruissellement

C = Cycle (les cycles sont de 30 secondes pour les cinq premiers et de 1 mn pour les suivants).

* *Enduits sur les voûtes*

N°1: Enduit à 40% de fumier de chèvre

C1-I: Deuxième couche enlevée. Les fissures de la première couche réapparaissent. Dessous mouillé dix minutes après l'arrosage.

C2-R: Les fissures s'élargissent sous l'écoulement de l'eau.

C3-Dessous I: Six secondes pour observer une fuite d'eau au goutte à goutte.

C3-I et C3-R: L'aspect est identique. Les plaques d'enduit sèchent très vite en une croûte dure mais, dessous, la terre du mortier reste molle (mortier de pose trop argileux).

C4-I et C4-R: L'eau a dissous le mortier de pose entre certains blocs. Trous de lumière en R, l'enduit est plus vertical, l'eau s'infiltré moins et attaque moins la maçonnerie.

C6-Dessous I: Déluge. Perte en épaisseur. (I = 3mm, R = 7mm).

Conclusion:

Bien que l'érosion soit faible, l'enduit est condamné par ses fissures de retrait. Plus l'enduit est épais, plus les fissures sont larges, d'où une dégradation plus importante.

- N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

C1: Dessus, les petites fissures se rebouchent.

C3: Aspect uniforme. Ruissellement important.

C4: Dessous mouillé.

C6-I: Plus d'enduit, les blocs sont attaqués.

C6-R: Pas de fissure. Perte d'épaisseur (I = 15mm, R = 8mm).

Conclusion:

Il n'y a pas concentration de l'érosion sur les fissures, car l'enduit moins résistant s'use uniformément. La matière emportée comble les trous. Il protège plus longtemps le support mais, bien sûr, demande à être renouvelé en fonction de la violence des pluies.

N°3: Enduit à 40 % de fumier de chèvre + sable

C1: Dessus, les petites fissures se rebouchent.

C2: Aspect uniforme. Ruissellement important.

C3: Dessous mouillé.

C6-I: Plus d'enduit, les blocs sont attaqués. C6-R: Pas de fissure.

Conclusion:

Il n'y a pas concentration de l'érosion sur les fissures car l'enduit moins résistant s'use uniformément. La matière emportée comble les trous. Il protège la toiture plus longtemps mais demande un entretien plus fréquent.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

C1: Lessivé dessus. Mouillé dessous, malgré les deux couches de blocs.

C3-I et C3-R: Aspect identique au N°1 sauf que les pièces du puzzle sont plus petites, donc, il y a plus de fissures. La largeur des fissures est de 2 à 4 mm en I et très fine en R.

C3-Dessous I: Le goutte à goutte commence.

C6-I et C6-R: Moins de paille dans l'eau d'écoulement qu'au N°1.

C6-Dessous I: Déluge. Perte de matière (I = 8mm, R = 6mm).

Conclusion:

Comportement identique au N°1. Il semble qu'il y ait moins de fibres qu'avec le fumier de chèvre, donc qu'il soit moins armé.

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé

C1: L'eau glisse sur la surface qui reste lisse et non fissurée.

C2: Un point orangé apparaît, $\varnothing = 8\text{mm}$.

C3: Le \varnothing du module argileux augmente ($\varnothing = 12\text{mm}$).

C4-I: Traces de fissures. Blanchissement des grains de sable.

C5-I et C5-R: Peu déformable au marteau. En R, quelques modules apparaissent.

C6: Un module s'est dissous. Perte d'épaisseur (I = 2mm, R = 2mm).

C7: A la place du module, il y a un trou en contact avec le bloc. A cet endroit, l'enduit fait 5 mm d'épaisseur.

C8-Dessous: Mouillé.

C9-I: Deux trous dans l'enduit de $\varnothing = 30\text{mm}$ dus à des modules dissous.

C9-R: Un vernissage brillant s'en va par pellicules. Il apparaît une surface rugueuse, mouchetée de blanc et d'orangé. Traces de fissures légèrement creusées: (10mm de large, 4mm de profondeur). L'eau de ruissellement est toujours propre.

Conclusion:

Cet enduit est beaucoup plus efficace que le précédent. Son grand défaut vient des modules argileux qui gonflent, se dissolvent et provoquent une brèche dans l'enduit.

N°6: Enduit à 7% d'huile de vidange sur sol mélangé sableux

C6-I et C6-R: Perte d'épaisseur (I = 1mm, R = 1mm).

C9: Comportement et aspect identiques au N°5. Mouchetage uniforme, mais aucun cratère dû au module n'atteint encore le support.

C9-Dessous: Aucune trace d'humidité.

Conclusion:

La terre est moins argileuse, donc les problèmes de fissures creusées et de modules argileux sont retardés.

N°7: Voûte sans enduit

C1: Infiltration immédiate et écoulement à grosses gouttes à l'intérieur.

C2: Les joints, trop argileux, se dissolvent très vite. Les blocs sont très vite désolidarisés.

C6: L'eau traverse plus qu'elle ne ruisselle. Sur la voûte V5, plus surbaissée, la zoned'impact est plus horizontale, d'où une infiltration plus importante. Un bloc tombe.

(Le lendemain, peu de fissures dans les blocs, mais beaucoup dans les joints).

Conclusion:

Mise en évidence de l'importance d'un mortier mélangé, suffisamment collant mais pas trop argileux. Les multiples fissures de retrait dans les joints ont grandement facilité l'infiltration d'eau. Cette faible résistance à l'eau des voûtes a bien aidé l'absorption des enduits. Les voûtes étaient comme transparentes par le dessous, la surface interne étant immédiatement mouillée .

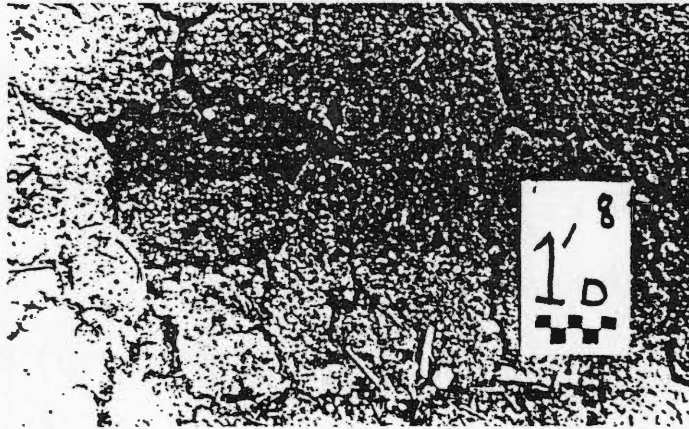
Par conséquent, un test d'arrosage a été fait sur une petite voûte en blocs très sableux, maçonnée avec un mortier à la limite de coller. Bien que la structure ait une résistance mécanique faible, les résultats du test ont été positifs. Certes, l'eau goutte à l'intérieur de la voûte mais les joints sont légèrement creusés par rapport aux blocs et l'usure est uniforme. Il n'y a pas de fissure de retrait.

* Enduits sur les murs

Le comportement des enduits de murs est quasiment le même que celui des enduits de voûtes, au cours des cycles d'arrosage. C'est pourquoi, pour chaque enduit, seul le bilan est indiqué.

N°1: Enduit à 40% de fumier de chèvre

L'aspect en surface ne change pas en I ni en R. L'enduit ressemble à un puzzle dont les pièces feraient de 5 à 10cm de Ø. Entre les fissures, les plaques sont très résistantes à l'eau (peu d'usure en surface et sur les bords). En fait, elles cachent l'eau qui s'infiltré par les fissures, derrière les plaques, et ronge le support.



Résultat:

- . l'eau traverse le mur de 40cm en R, au troisième cycle;
- . une plaque d'enduit tombe en R car le support, trop mouillé, ne peut contenir le poids de la plaque et la force de l'écoulement d'eau;
- . du côté où l'accrochage a été amélioré par des cailloux plantés dans le mur, aucune plaque ne tombe.

N°2: Enduit à 40% de fumier de chèvre + gravier

Aspect identique à l'enduit N°1 sauf que les pièces du puzzle sont plus petites et que les fissures sont donc plus nombreuses.

De plus, à chaque cycle, davantage de cailloux sont lessivés et, lorsqu'ils tombent, commence une érosion grave: un trou se forme, l'eau de ruissellement s'y engouffre et traverse rapidement le mur par un joint de mortier mal tassé.

N°3: Enduit à 40% de fumier de chèvre + sable

L'enduit, peu fissuré et peu résistant, s'use uniformément, ne permettant pas la dégradation dramatique d'une zone.

L'eau n'a pas traversé le mur, excepté lorsque la zone d'impact a été totalement dénudée par la violence du jet d'eau.

N°4: Enduit à 40% de fumier de boeuf

Comportement similaire à celui de l'enduit N°1, bien qu'ici les plaques d'enduit entre les fissures soient moins résistantes et s'usent sur leur bord, élargissant ainsi les multiples orifices.

N°5: Enduit à 7% d'huile de vidange sur un sol mélangé sableux

Côté droit: enduit d'une seule couche, non lissé.

Ce sont les modules argileux qui engendrent la dégradation de l'enduit. Chaque module a donné naissance à un trou qui s'élargit de 10 à 80 mm de Ø, surtout en zone de ruissellement où l'eau entaille littéralement l'enduit à partir d'un trou (succession de petites cascades).

Côté gauche: enduit en deux couches, lissé.

En fin de séance (neuvième cycle), les modules argileux commencent à apparaître: 8mm, tous les 10 cm. La dégradation va seulement débiter.

N°7: Enduit de terre naturelle (sol S6)

En 3 cycles, l'enduit de 10mm a littéralement fondu de I jusqu'au sol. L'érosion s'est faite par les fissures, en rongant les bords des plaques très peu résistantes à l'eau.

3,4) Bilan sur les enduits

3,41) Règles élémentaires de maçonnerie

Les tests d'arrosage confirment les règles élémentaires de maçonnerie concernant la nature et la pose d'un enduit.

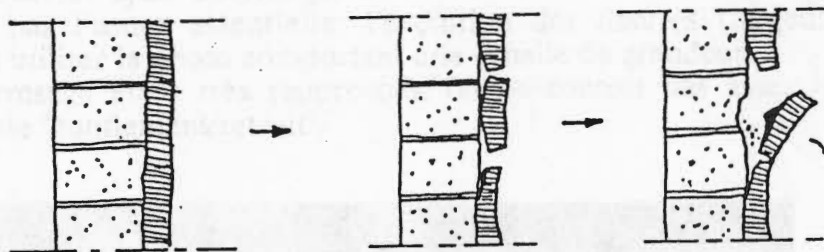
a) Les fissures sont la cause majeure de dégradations

Elles proviennent:

- * Du taux d'argile dans la terre. Mieux vaut un enduit pas trop argileux pour diminuer la fissuration. Moins résistant aux chocs, il s'use uniformément. On a de bons exemples avec l'enduit N°3 et, bien sûr, l'enduit N°5 à 7% d'huile de vidange.

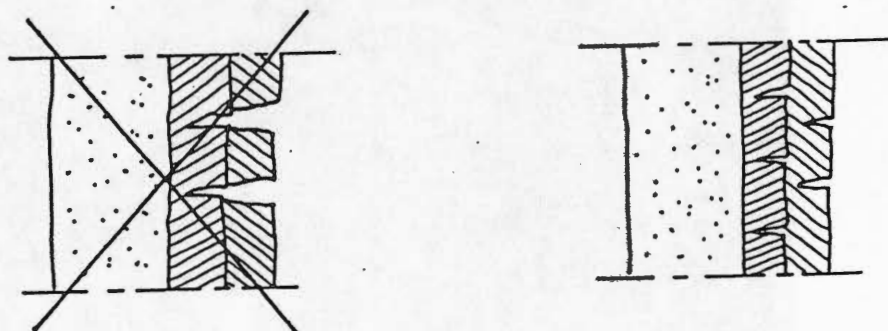
- * Des conditions climatiques du jour de pose. Il faut éviter les grosses chaleurs et compenser l'évaporation par l'aspersion d'eau.

- * De l'épaisseur de l'enduit. Plus la couche est épaisse, plus la fissure est ouverte en surface. Des grandes plaques d'enduit, lourdes, se trouvent désolidarisées. En tombant, elles arrachent un peu de support. Il ne faut pas plus de 1,5 cm d'épaisseur. Et il devient impératif de supprimer les graviers.



b) En plusieurs couches, l'enduit est plus étanche.

En principe, deux couches suffisent. La deuxième peut fermer les fissures de la première, à condition que la première ait fini de se fissurer. Sinon, ses fissures entraînent des fissures plus graves dans la seconde couche.



Il ne faut pas oublier que les meilleurs tests sont les intempéries et le temps qui passe sur de vrais bâtiments enduits.

3,43) Les meilleurs enduits

A l'issue des tests, deux enduits sont sélectionnés pour étanchéifier des toitures en voûtes et coupoles: un enduit à base de fumier de chèvre et un enduit avec huile de vidange.

a) L'enduit à base de fumier de chèvre

C'est le mélange qu'utilise déjà le projet.

** Préparation de l'enduit*

40% en volume de fumier de chèvre: crotin + paille de la litière. Peut éventuellement être amélioré avec de la paille coupée en morceaux de 5 cm, quand on en dispose;

un sol sablo-argileux (essai au cigare: 10 cm) sans gros gravier ($\varnothing = < 5\text{mm}$); mélanger trois semaines à l'avance et garder mouillé, pour une meilleure participation de toute l'argile et des substances biochimiques.

** Préparation du support*

Le risque de décollement est moins grand pour les toitures que pour les murs. Comme on l'a vu précédemment, il est toujours bon de gratter les joints, de piquer et balayer les supports et d'incruster des cailloux sur les murs, mais pas sur les toitures.

** Application*

Il faut toujours mouiller le support avant de jeter l'enduit.

L'application se fait en deux couches et, de préférence, sur un gobetis d'accrochage. Première couche: de 1 à 1,5 cm. A adapter suivant l'importance des fissures. Laisser bien fissurer et sécher.

Deuxième couche: inférieure à 1 cm. Surface irrégulière pour ralentir la vitesse d'écoulement qui participe à l'érosion.

b) L'enduit à 7% d'huile de vidange

Il est, de loin, le plus performant.

** Préparation du support*

Choisir un sol mélangé fin, peu cohésif (max. = 2mm, cigare = 5cm); bien détremper la terre concassée durant deux semaines pour limiter la présence de modules argileux;

procéder au mélange sur de petites quantités, pour être sûr de pouvoir tout huiler correctement:

100l de terre mouillée à la T.E.M. (2 brouettes de 50 l.),
7l d'huile de vidange (10 boîtes de conserve de 800 ml remplies à 2 cm du bord).

Si le sol n'est pas propre, mélanger directement dans les deux brouettes avec 3,5l d'huile de vidange pour chacune (cela évite d'avoir des modules de terre brute qui éclatent l'enduit sous l'action de l'eau).

Mélanger à la pelle ou avec des gants, jusqu'à ce que la couleur soit uniforme.

** Préparation du support*

Procéder comme cela a déjà été indiqué: gratter, balayer, piqueter murs et toitures. Incruster des cailloux dans les murs.

** Application*

Comme pour l'enduit à base de fumier de chèvre, il faut d'abord mouiller le support.

On procède ensuite à l'application de l'enduit en deux couches.

Première couche: ép. 1 cm, non lissée.

Deuxième couche: ép. 0,5 cm, lissée.

Cet enduit, restant souple, peut être retouché longtemps après son application. On peut "serrer" l'enduit (en lissant à l'aide d'une taloche une zone fissurée, qu'on a préalablement mouillée, tout en appuyant pour écraser et boucher les fissures). On peut même le couvrir d'une nouvelle couche, à n'importe quel stade de son vieillissement à condition de le préparer comme un support d'origine.

Maintenant, il reste à observer le comportement de cet enduit dans le temps.