

ANNALES

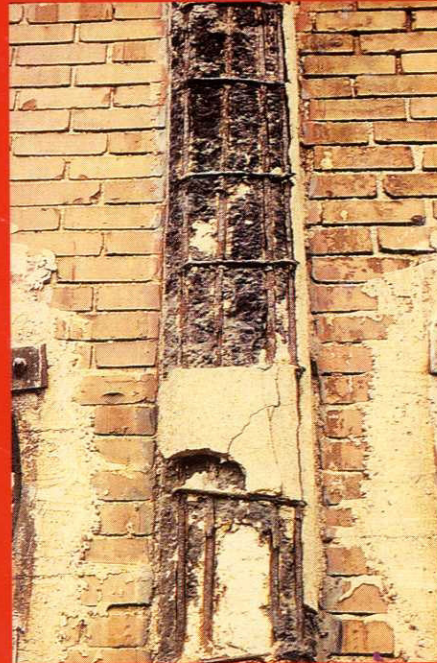
DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

FÉVRIER 1998 - N° 1

PRIX : 180 F



**La réglementation
parasismique**



**Diagnostic
des ouvrages
en béton armé.
Facteurs
de vieillissement
des ouvrages**



**Renforcement
des poutres
en béton armé
à l'aide
de lamelles
composites :
étude
expérimentale -
prédimensionnement**



ISSN : 1270-9840
CPPAP : 1002T77866
ISBN : 2-86911-669-1



9 782869 116696

RÉDACTION

Secrétariat :

Catherine BIGOT - Tél. 01 40 69 53 05
Patricia MONMAHOU - Tél. 01 40 69 53 09
Fax 01 47 23 54 16

6-14, rue La Pérouse - 75784 Paris Cedex 16

Comité de Rédaction :

Conception - Calcul - Normalisation et réglementation

MM. Boutin, Bosc, Fouré, Grenier, Lorrain,
Trumtel, Virlogeux
Rédacteur en chef : M. Thonier

Matériaux

MM. Acker, De Larrard, Hamelin,
Maso, Millereux, Morlier, Pera,
Gallias, Trinh
Rédacteur en chef : M. Cabrillac

Sols et fondations

MM. Breysse, Gourc, Gouvenot, Habib,
Hurtado, Le Roux, Mestat, Shahrouh, Sieffert
Rédacteur en chef : M. Isnard

Méthodes, réalisations et procédés de construction

MM. Culica, Devillebichot, Mangin, Miramond,
Thonier
Rédacteur en chef : M. Chassagnette

Réhabilitation - Restructuration du bâtiment

MM. Bard, Culica, Mmes Lego, Osmani
Rédacteur en chef : M. Absi

Physique du bâtiment et environnement du bâtiment

MM. Allard, Cyssau, Duthoit, Sarrat
Rédacteur en chef : M. Fauconnier

Maintenance - Diagnostic - Réparation

MM. Buyle-Bodin, Chassagnette, Godart,
Mathieu, Milotte, Trinh
Rédacteur en chef : M. Absi

Ethique et droit

Rédacteur en chef : M. Raspaud

ABONNEMENT

Editions ESKA,
5, avenue de l'Opéra - 75001 PARIS
Tél. : 01 42 86 55 98 - Fax : 01 42 60 45 35

PUBLICITÉ

À la rédaction

IMPRESSION

Imprimerie Bayeusaine

ZI - 7, rue de la Résistance - 14401 Bayeux
Tél. 02 31 51 10 51 - Fax 02 31 21 13 98

sommaire

conception - calcul - normalisation et réglementation

| | |
|---|----|
| La réglementation parasismique | 5 |
| <i>DAT-FNB (Direction des Affaires Techniques de la Fédération Nationale du Bâtiment)</i> | |
| Etat des travaux « EUROCODES 2 et 6 » | 11 |
| <i>(Rédigé à partir des documents AFNOR - Groupe de Coordination des Eurocodes Structuraux)</i> | |

matériaux

| | |
|---|----|
| Influence des types d'argiles sur les propriétés physico-mécaniques du béton de terre stabilisée au ciment | 15 |
| <i>A. GUETTALA (Institut de Génie Civil, Centre Universitaire Mohamed Khider, Algérie)</i> | |
| <i>M. GUENFOUD (Institut de Génie Civil, Centre Universitaire de Guelma, Algérie)</i> | |

maintenance - diagnostic - réparation

| | |
|---|----|
| Diagnostic des ouvrages en béton armé. Facteurs de vieillissement des ouvrages | 27 |
| <i>G. TACHÉ, D. VIÉ (CEBTP)</i> | |
| Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale - prédimensionnement | 39 |
| <i>C. DJELAL, E. DAVID, F. BUYLE-BODIN (Laboratoire d'Artois Mécanique et Habitat, Equipe Matériaux et Structures de Béthune)</i> | |
| <i>Y. GICQUEL (SIKA, Service Technique)</i> | |

prévention - sinistres

| | |
|-------------------------------------|----|
| Sinistres évités (Fondations) | 49 |
| <i>(Fiches SOCOTEC)</i> | |

résumé de thèse

| | |
|--|----|
| Contribution à l'étude du couplage thermique entre un jet d'air et un local climatisé | 71 |
| <i>A. MESLEM</i> | |

bloc notes

| | |
|--|----|
| <i>Recommandations aux auteurs</i> | 79 |
| <i>Résumés/Abstracts</i> | 4 |
| <i>Bulletin d'abonnement</i> | 80 |

La réglementation parasismique

DAT-FNB - p. 5

La réglementation relative à la maîtrise du risque sismique vient de connaître une évolution importante.

Pour aider les ingénieurs à s'orienter dans la complexité de cette nouvelle réglementation parasismique, cet article décrit les changements survenus depuis 1991 ; les textes législatifs et techniques en vigueur sont listés.

Ensuite, les tableaux synthétiques sont présentés pour guider le concepteur, en fonction de l'emplacement géographique du site et du type de bâtiment à construire ; ils permettent pour chaque construction de déterminer les règles à appliquer pour la conception et définir les coefficients à utiliser.

Enfin, sont abordés les résultats d'une étude de l'impact de la nouvelle réglementation parasismique sur le coût des bâtiments

Influence des types d'argiles sur les propriétés physico-mécaniques du béton de terre stabilisée au ciment

A. Guettala, M. Guenfoud - p. 15

La construction en terre est une technique à la fois très ancienne et très répandue. Les raisons en sont simples : le matériau est partout abondant et son utilisation ne fait pas appel à des technologies complexes.

Le traitement des sols au ciment montrant des réponses différentes suivant la nature des minéraux argileux, nous nous sommes attachés à les vérifier. Dans ce but, nous avons sélectionné différents types de sols susceptibles de constituer un éventail représentatif des espèces argileuses les plus abondantes et pouvant constituer des matériaux de construction pour l'habitat en terre.

A travers les réalisations d'éprouvettes de terre traitée au ciment compressées avec un compactage statique, nous avons pu constater l'évolution des réactions sol-ciment sous un aspect mécanique. Cette démarche nous a permis de mettre en évidence l'aptitude au traitement des sols et de proposer un classement des plus favorables aux moins favorables dans l'ordre suivant : Kaolinite, Illite, Montmorillonite.

Diagnostic des ouvrages en béton armé, facteurs de vieillissement des ouvrages

G. Taché, D. Vié - p. 27

La corrosion des armatures est la principale cause des désordres apparaissant sur les structures en béton armé. A partir des données expérimentales obtenues à l'aide d'outils modernes de diagnostic et en se basant sur les principales lois relatives au vieillissement du béton, le CEBTP a développé un modèle de prévision de la durée de vie des ouvrages.

Cette approche probabiliste permet de mieux appréhender les méthodes de réparation ou d'entretien des bâtiments.

Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale-prédimensionnement

C. Djelal, E. David, F. Buyle-Bodin, Y. Gicquel - p. 39

La réparation d'ouvrages en béton armé à l'aide de plaques d'acier collées, également connue sous le nom de procédé l'Hermite, est une technique couramment employée. L'utilisation de matériaux composites représente cependant une alternative intéressante puisque le problème de la corrosion ne se pose plus. Nous avons décidé d'expérimenter ce procédé dans notre laboratoire. Nous avons renforcé six poutres par collage de plaques à base de fibres de carbone. Les lamelles composites longitudinales ont amélioré le comportement en flexion de ces poutres.

Des lamelles latérales ont été collées sur deux poutres afin de contenir le phénomène de peeling-off caractéristique de la rupture des poutres renforcées. Elles ont augmenté la résistance en cisaillement et retardé la rupture mais le caractère ductile de celle-ci a toujours été observé.

Suite à l'échec d'un calcul de béton armé classique pour la prévision du comportement de ces poutres renforcées, nous avons modifié des hypothèses et procédé à un calcul itératif afin de déterminer le moment ultime en flexion. Cette seconde méthode, bien que plus précise, ne permet cependant pas de s'affranchir de la modélisation du comportement à l'interface béton-lamelles.

New earthquake design regulations

DAT-FNB - p. 5

Regulations relative to the control of seismic risks have recently undergone a significant change.

To guide engineers through the complexity of these new earthquake design regulations, this article describes the changes occurring since 1991, with a listing of the legislative and technical publications in effect.

Summary tables are then presented to guide the designer, according to the geographical location of the site and the type of building to be constructed. For each type of construction, they make it possible to determine the rules to be applied for the design, and to define the coefficients to be used.

Finally, the article deals with the results of a study on the impact of new earthquake design regulations on the cost of buildings.

Influence of types clay physical and mechanical properties of soil-cement

A. Guettala, M. Guenfoud - p. 15

The technique of earth construction is both very old and extremely widespread. The reasons for this are simple : the material is abundant everywhere, and can be used without complex technologies.

We believe beforehand that the treatment of soils in cement has yielded different responses according to the nature of clay minerals. We have decided to verify this. For the purpose, we have selected various types of soil likely to constitute a representative sample of the types of clay that are most abundant at the earth's surface and are likely to be used as building materials for earth housing.

In the course of preparing specimens of compressed treated earth static compaction, we were able to follow the course of soil-cement reactions from the mechanical point of view (wet and dry, tensile and compressive strengths). This approach has enabled us to determine the treatability of the soils and to rank them from best to worst : Kaolinites, Illites, Montmorillonites.

Diagnostic of concrete structures. Ageing process of concrete

G. Taché, D. Vié - p. 27

Corrosion of the reinforcing steel is responsible of many durability problems. Based on experimental data obtained with modern diagnostic tools and with the aid of the major ageing process for concrete, CEBTP developed a model for prevision of building service life. This probabilistic approach allows to take the best choice of repair method or maintenance.

Strengthening of reinforced concrete beams using composite sheets : experimental study-design

C. Djelal, E. David, F. Buyle-Bodin, Y. Gicquel - p. 39

External bonding of steel plates to damaged reinforced concrete structures has been shown to be quite an efficient and a well-known repair technique (L'Hermite operating procedure). The use of composite materials represents an alternative to steel as it can avoid the corrosion of the plate. In our laboratory we have experimented this technique. We have strengthened six RC beams using carbon fibres sheets. Those epoxy-bonded sheets have improved the flexural behaviour of all beams.

Strips of a given spacing were also bonded on the shear spans of two beams in order to avoid the peeling-off failure. It was found that those strips increased the shear strength of the strengthened beams and postponed the failure which still showed ductility.

Since classical assumptions do not allow to predict the behaviour of those strengthened beams, we have modified some of the assumptions and performed iterations in order to reach the ultimate bending moment. Although this latest method is more accurate, it will become necessary to take into account the behaviour of the concrete-sheet interface in a model.

INFLUENCE DES TYPES D'ARGILES SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSICO-MÉCANIQUES DU BÉTON DE TERRE STABILISÉE AU CIMENT

Abdelhamid GUETTALA, Maître Assistant et Directeur des Etudes*
Mohamed GUENFOUD, Maître de Conférences**

1. INTRODUCTION

La prospérité d'un pays dans le domaine de la construction dépend de l'utilisation de ses ressources locales et de leur développement intégré au processus d'évolution de la société. Cela pourrait expliquer en grande partie la crise que connaissent les pays du tiers monde. Certains affirment même qu'à la fin du XX^e siècle ces pays importeront autant de ciment que de céréales [20]. En Algérie l'écart entre l'offre et la demande pour différents matériaux de construction est assez important : 65 % pour le ciment, 37 % pour l'acier et 50 % pour les céramiques [15]. Le prix des matériaux de construction a enregistré une croissance de 177,5 % au cours de la période 88-91, tandis que le prix du ciment a vu une croissance de 243 % [21]. Les matériaux de construction représentent à eux-seuls près de 40 % du prix de revient de la construction [14]. Un million six cent mille logements doivent être construits d'ici l'an 2000 pour le cas de l'Algérie [16].

Ce manque de matériaux de construction et l'inflation de leur prix rendent l'utilisation des matériaux locaux dans la construction de plus en plus nécessaire.

Dans ce domaine, le matériau terre est incontestablement le plus facilement exploitable. De plus, il a été ancestralement très utilisé dans l'habitat de par le monde et a montré une grande durabilité pour certaines conditions climatiques.

Néanmoins, il semble aujourd'hui que ce matériau mérite une certaine revalorisation. Il fût en effet victime de la dépréciation générale subie par les architectures mineures d'une part et de son caractère instable d'autre part. Le travail de justification sera long car il faudra beaucoup expérimenter et convaincre. Les qualités architecturales des constructions vernaculaires devront être retrouvées ; les exemples ne manquent pas dans le sud-ouest de l'Amérique du nord, en Afrique du Nord, au Moyen-Orient, aux confins du Sahara ou en Afrique Occidentale [18]. Des peintures murales retrouvées en Egypte montrent le procédé de fabrication de la brique séchée au soleil tel qu'il était appliqué il y a plus de 6 000 ans [12]. Quelques

* Institut de Génie Civil de Biskra (Algérie).

** Institut de Génie Civil de Guelma (Algérie).

monuments funéraires, religieux et militaires construits en terre pendant les périodes historiques peuvent encore être visités de nos jours (Egypte, Irak, Espagne, Yémen du sud, Mali, Mexique, etc.) [12]. Une estimation de l'O.N.U fait ressortir qu'en 1976 la moitié de la population mondiale vivait dans des maisons en terre.

En Algérie, l'utilisation de la terre est une tradition très ancienne. Elle était employée non seulement dans les campagnes mais également dans les villes. « *Actuellement, malgré la tendance à utiliser le béton de ciment, plus de 50 % des habitations du Sahara Algérien sont encore en toub* » [13]. Presque toutes les constructions dites traditionnelles sont faites avec de la terre associée à d'autres matériaux d'appoint tels que les ajouts végétaux (paille ...) ou minéraux, mais elles présentent une faible résistance à l'action de l'eau. Grâce aux nouvelles techniques de stabilisation par le ciment, la chaux ou le bitume nous pouvons obtenir une nette amélioration par rapport aux blocs de terre comprimée. Le béton de terre stabilisée (BTS) pourrait conduire [18] à un mélange de meilleure résistance à la compression, de bonne cohésion et de meilleure durabilité et faire de la terre un matériau d'avenir.

Mais, la terre n'est pas homogène dans ses caractéristiques minéralogiques et géotechniques. Son comportement à terme, dans la construction, est lié à sa composition minéralogique ainsi qu'à l'action de l'eau sur les éléments constitutifs du matériau.

Il n'y a pas de mode de mise en œuvre aussi parfait soit-il, qui tenant compte de la composition, de la granularité, du compactage, etc., rende le matériau inerte à toute influence climatique extérieure. Le soleil et la pluie ont une incidence sur la tenue du matériau. L'action du vent exacerbe souvent les conséquences des variations thermiques et hydriques.

La nécessité d'obtenir un matériau durable doit conduire à envisager un traitement qui, tout en assurant au matériau une résistance mécanique suffisante, tende à diminuer sa sensibilité à l'eau. Ces deux conditions indispensables devront être précédées d'études paramétriques liées à la minéralogie et la granulométrie du matériau à traiter, en conséquence de quoi le type et les proportions de liant, la quantité d'eau nécessaire seront adaptées aux conditions de mise en œuvre du matériau.

Dans le cadre de cette étude nous avons recherché à apporter une amélioration au matériau de différentes manières : addition de liant, correction granulométrique, compactage ou combinaison de ces méthodes. La stabilisation par adjonction de liant est obtenue par introduction de ciment. La correction granulométrique est faite par un sable roulé et, pour ce qui est du compactage, le mode statique a été utilisé.

Dans les études de stabilisation examinées dans la littérature [9, 11, 18], l'accent est mis beaucoup plus sur les critères granulométriques, les limites d'ATTERBERG et dans une moindre mesure sur la composition minéralogique. Cette étude a donc pour objectif de mettre en valeur l'influence de la nature des argiles sur le comportement des bétons de terre stabilisée vis-à-vis de l'eau, et d'améliorer la connaissance des terres et de leur stabilisation afin de prévoir, autant que faire se peut, les réactions des terres stabilisées compte tenu de certaines de leurs caractéristiques essentielles. Il s'agit surtout de réaliser une meilleure sélection des matériaux afin que la brique compressée en béton de terre stabilisée puisse être ajoutée à la liste des matériaux nouveaux vendus sur le marché.

2. CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. Caractéristiques physiques des sols

Trois échantillons de sols de la région de Biskra (Algérie) ont été soumis à plusieurs essais en laboratoire, suivant les normes ASTM [3].

2.1.1. Densité des grains

Elle est évaluée à partir de l'essai au pycnomètre sur des échantillons secs écrêtés à 2 mm (ASTM D 854 58). Les résultats des essais sont rassemblés dans le tableau 1.

2.1.2. Analyse Granulométrique

La dimension des grains est mesurée par deux techniques différentes suivant la nature des éléments constituants (graviers, sables, limons, argiles) :

- analyse granulométrique par tamisage (ASTM D 422-63) ;
- analyse granulométrique par sédimentation (ASTM D 422).

Sur la figure 1, nous avons représenté les courbes granulométriques des sols utilisés et reporté le fuseau limite proposé pour les blocs de terre comprimée [9, 10]. Au vu de ces courbes, nous constatons que les échantillons (2) et (3) sont proches de la limite inférieure du fuseau ; par contre l'échantillon (1) se situe à l'extérieur du fuseau limite.

2.1.3. Classification géotechnique des sols étudiés

Selon la classification du « triangle des textures » de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomiques) (P. DOAT et al.) [18], on peut tirer les classifications suivantes : les échantillons n^{os} 2 et 3 sont des terres sablo-

Tableau 1 : Masse volumique des sols.

| Echantillons | Masse spécifique $d < 0,08 \text{ mm}$ γ_s (kg/m ³) | Masse spécifique γ_s (kg/m ³) | Masse volumique apparente (échantillon remanié) ρ (kg/m ³) |
|------------------------|--|--|---|
| N° 1 (Branis) | 2 500 | 2 500 | 1 117 |
| N° 2 Ouled Djellal (A) | 2 480 | 2 460 | 1 132 |
| N° 3 Ouled Djellal (B) | 2 600 | 2 520 | 1 150 |

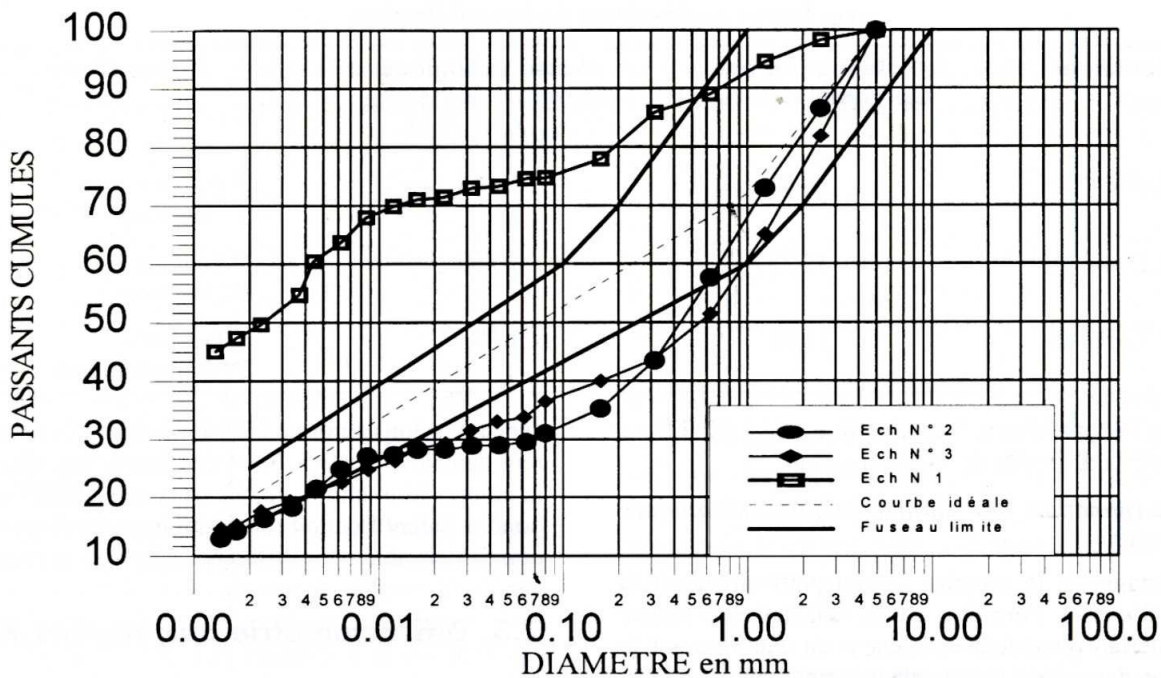


Figure 1. Courbes granulométriques pour les échantillons 1, 2 et 3 et fuseau limite pour le béton de terre stabilisée.

Tableau 2 : Classification des sols

| Echantillons | (%) de sable | (%) de limon | (%) d'argile | Nature du sol | Possibilité d'utilisation |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|------------------------------|
| Ech N° 1 | 25 | 26 | 49 | Terre argileuse | ne doit jamais être utilisée |
| Ech N° 2 | 68 | 16 | 16 | Terre sablo-argileuse | très bonne en général |
| Ech N° 3 | 64 | 18 | 18 | Terre sablo-argileuse | très bonne en général |

argileuses très bonnes en général pour la stabilisation ; par contre l'échantillon n° 1 est une terre argileuse pour laquelle on doit envisager une correction granulométrique avec du sable pour qu'elle soit utilisable (tableau 2).

La terre doit posséder, après façonnage, une bonne cohésion naturelle, c'est-à-dire que la teneur en argile doit être suffisamment élevée : supérieure à 10 %. Elle doit également contenir un squelette minéral (sable-gravier) assurant une action efficace du ciment [18].

2.1.4. Les limites d'Atterberg

Les limites d'ATTERBERG permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études sta-

tistiques ont été faites en vue de définir les limites d'ATTERBERG les mieux adaptées pour le béton de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol [18]. Les essais définis par CASAGRANDE s'effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4$ mm) suivant un procédé standard (ASTM D 423-66). Les résultats sont rassemblés dans le tableau 3.

D'après J. MICHEL [11] les meilleures terres pour la stabilisation sont celles pour lesquelles l'indice de plasticité est faible (cas des échantillons 2 et 3) et le produit ($I_p \times M$) du pourcentage de mortier par l'indice de plasticité voisin de 500 à 800. Dans notre cas le produit ($I_p \times M$) égale 720 et 644 respectivement pour les échantillons n° 2 et 3 ; par

Tableau 3 : Les limites d'Atterberg.

| Echantillons | W_L | W_p | I_p | W_r | W_a | C_a | $I_p \times M$ |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|----------------|
| Ech N°1 Branis | 53 HZ | 27 HZ | 27 ZL | 15 ZL | 14,5 | 0,54 I | 2 322 |
| Ech N° 2 O. Djellal (A) | 33 ZP | 18 ZP | 15 ZP | 11 ZP | 10 | 0,93 AM | 720 |
| Ech N° 3 O. Djellal (B) | 31 ZP | 17 ZP | 14 ZP | 10 ZP | 9,5 | 0,77 AM | 644 |

(ZL) : Zones limites

(ZP) : Zones préférentielles

(HZ) : Hors zones

(AM) : Activité moyenne

(I) : Inactif

Tableau 4 : Résultats de l'essai Proctor.

| Echantillons | Teneur en eau Optimale(TEO) % (1)* | Masse volumique maximale sèche γ_{max} (kg/m ³) (2)** | Appréciation |
|---------------------|------------------------------------|--|---------------------------------------|
| N° 1 (Branis) | 14,00 | 1 695 | 1* Excellent 2** Médiocre |
| N° 2 O. Djellel (A) | 12,75 | 1 750 | 1* Excellent 2** Médiocre |
| N° 3 O. Djellel (B) | 11,75 | 1 877 | 1* Excellent 2** Très satisfaisant |

contre pour l'échantillon n°1 ce produit est égal à 2 322 ce qui confirme la difficulté de sa stabilisation.

2.1.5. Détermination des caractéristiques mécaniques (Essai Proctor)

Le compactage est le premier moyen pour améliorer la résistance d'un sol. Pour être efficace, il doit être réalisé sur un matériau possédant une teneur en eau assurant la lubrification des grains du sol et leur permettant de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible [8]. Le but de l'essai Proctor est de déterminer cette teneur en eau appelée teneur en eau optimale (TEO) de compactage. Les résultats d'essais sont donnés par le tableau 4.

Ils montrent que la TEO pour les trois sols est excellente. La masse volumique sèche pour les échantillons de BRANIS et OULED DJELLAL (A) est assez médiocre ; par contre elle est très satisfaisante pour les échantillons de OULED DJELLAL (B).

Il en résulte que l'échantillon n°3 d'OULED DJELLAL (B) présente les caractéristiques les plus favorables à une stabilisation.

2.2. Analyse chimique des sols

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en éléments nocifs tels que les sulfates. Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). On associe sa présence à des dégradations de construction en terre. Le fort gonflement lié à l'hydratation de l'anhydrite et la solubilité des différents composés sont alors mis en cause. Dans le cas des BTS les sulfates peuvent également attaquer le ciment durci à l'intérieur du matériau particulièrement lorsque celui-ci est mis en contact avec de l'eau.

L'analyse des argiles a été effectuée dans la cimenterie de Hamma Bouziane (Wilaya de Constantine) par fluores-

cence X selon la norme NF6 P 15-467. Les résultats figurent dans le tableau 5. Nous constatons une diversité dans la composition chimique des trois sols étudiés qui correspond à l'identification minéralogique développée ci-après et indispensable pour différencier les sols argileux.

2.3. Diffractométrie aux rayons X

Elle permet une évaluation quantitative des phases cristallines (et accessoirement de leur degré d'orientation). L'application de cette méthode pour étudier la microstructure de l'argile est basée sur la mesure de l'intensité des rayons X réfléchis par des plans cristallographiques définis des minéraux argileux [6].

Les analyses ont été faites au laboratoire de géologie rayons X (IAP Boumerdès). L'appareil utilisé est un diffractomètre SIEMENS 500 couplé à un système informatique permettant l'exploitation des résultats. Les essais ont été effectués sur les tamisats au tamis de 80 microns. Les résultats résumés dans le tableau 6 montrent que le sol n°1 est composé essentiellement de montmorillonite (composé absorbant et gonflant), le sol n°2 d'illite (composé moins absorbant que le précédent) et le sol n°3 de kaolinite (non gonflant et non absorbant) et d'illite.

2.3.1. Matière organique

Dans le cas d'une stabilisation au ciment, la présence de matière organique est reconnue comme nocive : elle retarde la prise et provoque une baisse de résistance. En règle générale, et tant que des connaissances plus sûres n'auront pas été acquises, on admet [18] de ne pas utiliser de terre contenant plus que 2 % de matières organiques et de considérer comme risquée l'utilisation d'une terre contenant 1 % de matières organiques. Pendant le traitement des sols à l'eau oxygénée, nous avons constaté pour les trois sols que la réaction terre-eau oxygénée est lente et

Tableau 5 : Composition chimique des sols.

| Echan- tillons | Teneurs en (%) | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------------|------------------|-------------------|-------|------------------|-------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | CL | TiO ₂ | MnO | PF* |
| N°1 | 46,66 | 11,73 | 06,24 | 02,73 | 10,52 | 03,19 | 01,68 | 03,69 | 01,23 | 00,64 | 00,05 | 11,64 |
| N°2 | 21,00 | 03,18 | 01,95 | 01,71 | 30,76 | 09,97 | 00,57 | 00,16 | 00,12 | 00,26 | 00,02 | 30,29 |
| N°3 | 32,22 | 02,24 | 00,53 | 00,03 | 31,80 | 05,81 | 00,15 | 00,03 | 0,005 | 00,20 | 00,02 | 26,96 |

*PF : Perte au feu.

Tableau 6 : Composition minéralogique des sols.

| Echs | Minéraux argileux (%) | | | | I.M* | Minéraux non argileux (%) | | |
|------|-----------------------|--------|-----------------|----------|------|---------------------------|---------|----------|
| | Kaolinite | Illite | Montmorillonite | Chlorite | | Quartz | Calcite | Dolomite |
| N° 1 | 8 | 20 | 72 | - | - | 7 | 5 | 4 |
| N° 2 | - | 75 | - | 15 | 10 | 2 | 25 | - |
| N° 3 | 45 | 40 | - | - | 15 | 5 | 10 | - |

*IM : Interstratifiés.

que la matière organique est essentiellement constituée de débris végétaux libres à très faible pourcentage (0,15%).

2.3.2. Mesure de pH

Celle-ci a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure de pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évoluées [19]. Les résultats d'essais sont rassemblés dans le tableau 7. L'analyse des résultats montre que tous les sols étudiés ont un pH relativement neutre (donc l'absence de matières organiques évoluées). D'après N.M. VILENKINA [17], pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6, un prétraitement du sol est obligatoire. En général, on trouve des résistances meilleures pour les sols de pH plus grand.

Tableau 7. Le pH des sols.

| Echantillons | N° 1 | N° 2 | N° 3 |
|--------------|------|------|------|
| pH | 7,1 | 7,4 | 7,1 |

2.4. Caractéristiques physiques du sable

Il en résulte que le sable d'OUED DJEDI a été soumis à plusieurs essais en laboratoire, suivant les normes françaises AFNOR [2]. Les résultats d'essais sont exposés ci-dessous :

- Masse volumique apparente (ρ_0) de l'échantillon remanié : 1 600 kg/m³
- Masse spécifique (γ) : 2 720 kg/m³
- Equivalent de sable : ES visuel = 82, ES à piston = 83
- La composition granulométrique du sable a été déterminée par tamisage à sec et nous avons pu tirer les constatations suivantes :
 1. absence presque totale de fines particules (inférieures à 80 μ m) ;
 2. 65,5 % des grains de sable ont un diamètre compris entre 1,25 et 0,315 mm ;
 3. module de finesse du sable $M_f = 2,67$.

2.5. Ciment

Le liant utilisé est un ciment portland fabriqué à la cimenterie de Ain-Touta (Wilaya de Batna) et commercialisé comme étant un CPA 325. Nous avons remarqué un écart

dans les valeurs des résistances et nous avons tenu à faire une vérification en laboratoire, afin de déterminer la classe réelle du ciment utilisé dans notre recherche selon la normalisation AFNOR [2]. Les essais sur mortier normal ont montré que le ciment utilisé avait une résistance à 28 jours égale à 38,8 MPa.

3. CONDUITE DES ESSAIS

3.1. Moulage

Tous les essais ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4 cm x 4 cm x 16 cm. Un piston usiné spécialement nous a permis de compacter les mélanges dans les moules permettant la confection de trois éprouvettes chacun.

3.2. Teneur en sable

D'après [10, 18] les éléments fins argileux doivent être dissociés et ne pas s'agglomérer en mottes ou nodules. La présence de 50 % de nodules de grosseur supérieure à 5 mm est susceptible de réduire de moitié la résistance à la compression. Par exemple, si pour un sol très bien pulvérisé, stabilisé à 8 % de ciment on obtient une résistance à la compression à sec de 2,5 MPa (à 7 jours), il faudrait pour obtenir la même résistance avec le même sol, mais contenant lors du malaxage 30 % de nodules supérieurs à 5 mm, utiliser 15 % de ciment.

Après avoir procédé à l'écraillage des sols à 5 mm, nous avons remarqué que les sols présentent encore des mottes d'argile. Les essais préliminaires ont montré que la présence de ces mottes influe sur la structure du BTS (et fait chuter les résistances). Par ailleurs, d'après la courbe granulométrique idéale [18], 72 % des grains doivent être inférieurs à 1 mm, ce qui conduit à l'adoption d'un écraillage à 1 mm et à une correction granulométrique avec du sable. Afin d'étudier l'influence du sable et de déterminer la proportion optimale pour chaque sol, nous avons donc adopté quatre teneurs en sable, exprimées en pourcentage pondéral : 0, 25, 40, 50 %.

3.3. Optimisation de l'eau de compactage

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux compactés. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, (surtout lorsqu'ils sont fins), une variation de 2 à 3 % autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % [6].

Il est donc indispensable, pour obtenir une fabrication homogène, de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition. Nous avons ainsi fabriqué pour les trois sols étudiés une série d'éprouvettes dosées à des teneurs en eau croissantes et compactées à une pression constante de 1,5 MPa. La teneur en ciment a été fixée à 8 %.

3.4. Teneur en liant

Nous avons opté pour un traitement au ciment et retenu six teneurs en ciment différentes : 0, 3, 5, 8, 10 et 15 %. L'introduction graduelle et la limite de 15 % tiennent compte des contraintes économiques concernant les agglomérés de béton [8].

3.5. Préparation des mélanges

D'après J. MICHEL [11], les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Donc, après avoir séché le sol et le sable à l'étuve pendant 24 h à 63°C, les matériaux (sol + sable + ciment) ont d'abord été mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres avec une vitesse de 139 tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec a été effectuée pendant trois minutes et le malaxage avec l'eau pendant deux minutes environ. Le matériau a été mis en place et compacté juste après le malaxage.

3.6. Compactage des éprouvettes

Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble moule + mélange + piston, le plateau supérieur restant fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la pression voulue.

Un dispositif de centrage du moule est placé sur le plateau inférieur. La vitesse de compactage (contrôle manuel) est d'environ 0,1 MPa par seconde. Afin de compacter tout le corps des éprouvettes en une seule fois, des essais préliminaires sur chaque type de sol nous ont indiqué le volume nécessaire de mélange remanié à mettre en œuvre pour un moule composé de trois éprouvettes 4 cm x 4 cm x 16 cm.

3.7. Mode de conservation

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-ciment croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure est indispensable. Pendant cette période le matériau est maintenu en atmosphère humide.

Trois modes de conservation ont finalement été utilisés dans cette étude :

- atmosphère humide,
- atmosphère humide plus séchage,
- atmosphère humide plus immersion dans l'eau.

3.7.1. Atmosphère humide

Les éprouvettes ont été conservées jusqu'aux essais mécaniques dans une atmosphère humide (humidité relative de l'air > 70 %) pour favoriser au maximum l'hydratation du liant utilisé. A cet effet, nous avons utilisé le procédé suivant : après confection, les éprouvettes sont posées sur un plateau, le tout est couvert d'une feuille de plastique.

3.7.2. Atmosphère humide plus séchage

Les éprouvettes sont gardées en atmosphère humide, puis séchées pendant 24 h à 40-50°C avant l'écrasement. La raison qui nous a poussé à choisir ce mode de conservation est liée au fait que des essais préliminaires d'écrasement d'éprouvettes conservées pendant 7 jours en atmosphère humide uniquement, ont montré qu'il était difficile de mesurer leur faible résistance.

3.7.3. Atmosphère humide plus immersion dans l'eau

Afin de déterminer le comportement du BTS lorsqu'il est en contact avec l'eau, des éprouvettes ont été conservées durant 27 jours dans une atmosphère humide puis ont subi 24 h d'immersion complète dans l'eau à 20°C avant de subir les essais mécaniques au 28^e jour.

3.8. Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques ont été déterminées par des essais de compression et de traction par flexion.

Pour la compression, les éprouvettes sont chargées d'une manière continue et sans choc, avec une vitesse de montée en charge constante de 0,5 MPa par seconde jusqu'à rupture, à l'aide d'une presse de 300 KN équipée d'un dispositif de compression 4 cm x 4 cm ; la résistance est déterminée selon la norme ASTM D 2166-66.

Les résistances à la traction par flexion sont déterminées à l'aide d'une machine d'essai de flexion. La résistance en traction est calculée selon la norme ASTM D 1635-63.

4. INFLUENCE DE LA TENEUR EN SABLE

Afin d'étudier l'influence de la concentration en sable sur les résistances mécaniques et déterminer la concentration optimale en sable des mélanges sol-sable, plusieurs pourcentages de sable ont été utilisés pour chaque sol, avec une forte teneur en ciment (10 %) et une contrainte de compactage de 1,5 MPa ; les éprouvettes ont été conservées dans une atmosphère humide uniquement. Les essais de résistance mécanique à la compression à 28 jours (figure 2) montrent que la concentration en sable n'influe pas de manière importante sur la résistance en compression du béton de terre stabilisée (surtout pour le cas des échantillons 2 et 3), mais que cette concentration a une valeur optimale qui donne une résistance maximale. Ainsi, le

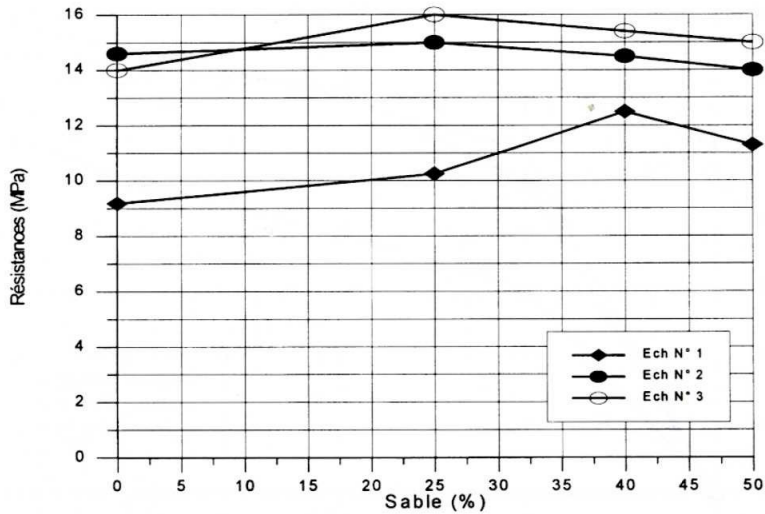


Figure 2. Influence de la teneur en sable sur les résistances mécaniques à la compression sous une contrainte de compactage de 1,5 MPa.

mélange optimal assurant la meilleure résistance à la compression est de 25 % de sable et 75 % de sol pour les échantillons 2 et 3 et de 40 % de sable et 60 % de sol pour l'échantillon 1. Sur la base de ces dosages optimisés en sable, a été réalisée la suite de toutes les expériences.

5. INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU

Après avoir déterminé la concentration optimale en sable pour chaque sol, nous avons fabriqué pour les trois terres ainsi corrigées une série d'éprouvettes dosées à des teneurs en eau croissantes, stabilisées avec 8 % de ciment, compactées à une pression de 1,5 MPa et conservées dans une atmosphère humide.

L'analyse des courbes des essais de résistance mécanique à la compression à 28 jours (figure 3) montre les teneurs en eau optimales (W_{opt}) pour les différents matériaux à partir desquelles on distingue deux zones :

- $W < W_{opt}$: mélange sec ; le compactage dans ce cas, se traduit par une élimination de l'air sous l'effet des contraintes pour rapprocher les éléments de phase liquide et solide.

- $W > W_{opt}$: mélange humide ; l'addition d'eau engendre des pressions interstitielles qui tendent à écarter les particules de sol et, donc, à augmenter sa porosité.

La figure 3 montre l'influence primordiale de la teneur en eau de compactage sur la masse volumique, et celle de la masse volumique sèche sur la résistance à la compression des éprouvettes. Un excès ou un défaut de 3 % d'eau au compactage peut réduire de moitié la résistance à la compression. Les résistances à la compression suivent, en fonction de la teneur en eau, pratiquement la même évolution que les masses volumiques sèches. La teneur en eau optimale (11%, pour les échantillons n°1 et 2 et 10% pour l'échantillon n°3) donne la résistance maximale et la masse volumique sèche maximale [5]

6. INFLUENCE DU TEMPS

Pour caractériser l'évolution des résistances mécaniques en fonction du temps, nous avons opté pour une composition stabilisée à 8 % de ciment (25 % de sable pour les échantillons 2 et 3 et 40 % de sable pour l'échantillon 1), compactée à 1,5 MPa, et conservée en atmosphère humide puis

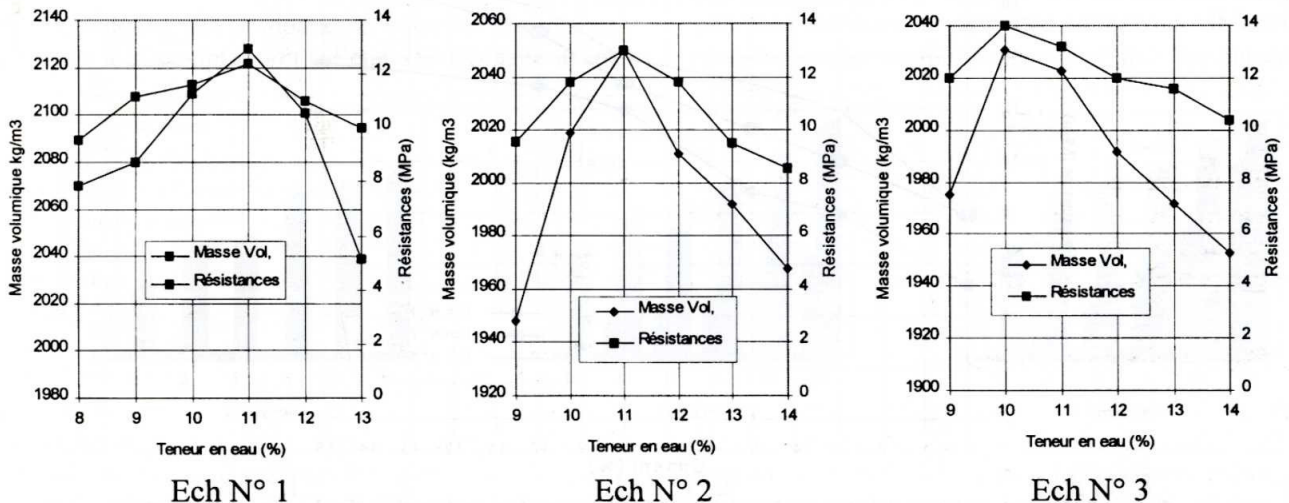


Figure 3. Optimisation de l'eau de compactage (terre plus 8% de ciment) pour une contrainte de compactage de 1,5 MPa.

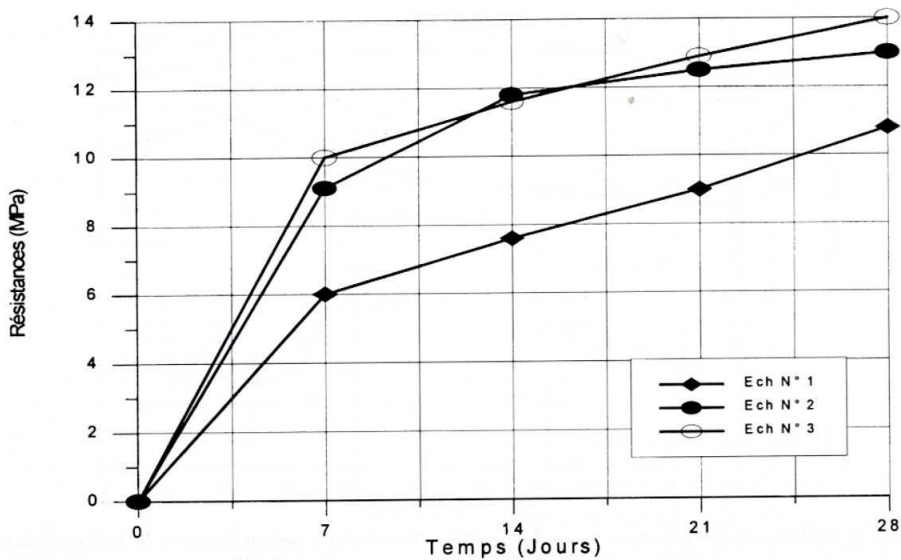


Figure 4. Evolution des résistances mécaniques à la compression en fonction du temps avec 8 % de ciment sous une contrainte de compactage de 1,5MPa.

séchée avant écrasement à 7, 14, 21, et 28 jours. L'analyse des courbes (figure 4) montre que les matériaux obtenus acquièrent des résistances croissantes en fonction du temps de conservation. On remarque que 70 % environ de la résistance à 28 jours est atteinte après une semaine pour les échantillons 2 et 3 ; par contre elle est de l'ordre de 50 % environ pour l'échantillon 1. La résistance à 21 jours atteint environ 90 % de la résistance à 28 jours, pour l'ensemble des échantillons.

7. INFLUENCE DE LA TENEUR EN CIMENT

Nous avons fabriqué pour les trois terres utilisées une série d'éprouvettes dosées à des teneurs en ciment croissantes (0, 3, 5, 8, 10 et 15 %), avec un dosage optimisé en sable, compactées à une pression de 1,5MPa et conservées en atmosphère humide, (essais de résistance mécanique à 28 jours après séchage ou immersion).

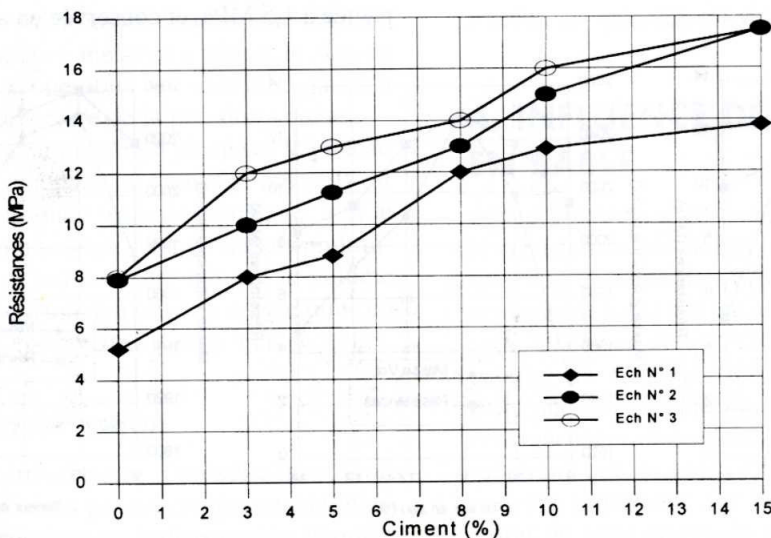


Figure 5. Evolution des résistances mécaniques à la compression en fonction du dosage en ciment sous une contrainte de compactage de 1,5 MPa.

7.1. Résistance mécanique à la compression à l'état sec

A partir des résultats obtenus à 28 jours après séchage, on peut constater une évolution de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation de la teneur en ciment. L'analyse des courbes (figure 5) montre que les échantillons 2 et 3 donnent les meilleures résistances à la compression. Nous remarquons que l'augmentation de la résistance est rapide pour les faibles teneurs en ciment et qu'ensuite elle évolue lentement (A. GUETTALA et al. [4]).

On remarque que les résistances mécaniques initiales (sans ciment) sont relativement fortes. Ceci est dû d'une part à la présence de l'argile dans les sols étudiés qui donne une bonne cohésion et à la technique d'écraillage à 1 mm (voir paragraphe 3.2.), et d'autre part à la technique de compactage utilisée. D'autres études [1, 9] donnent des résultats similaires pour les sols non stabilisés au ciment.

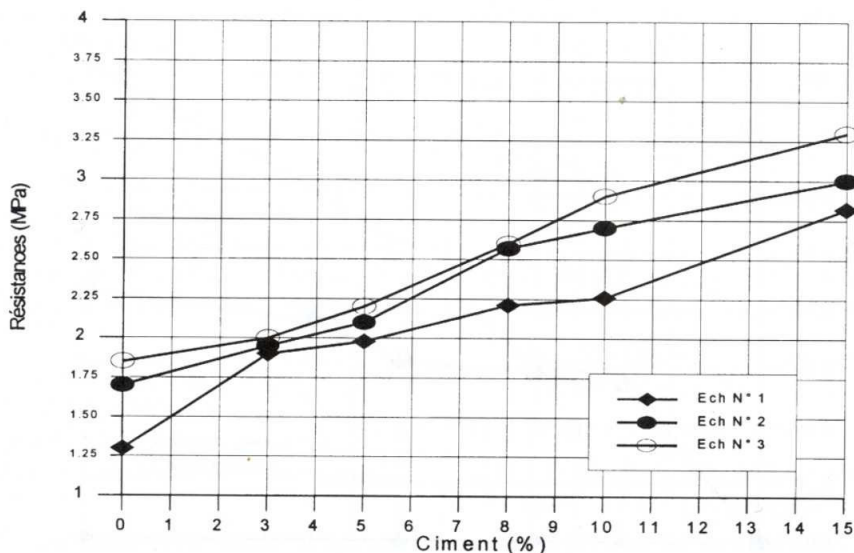


Figure 6. Evolution des résistances mécaniques à la traction en fonction du dosage en ciment sous une contrainte de compactage de 1,5 MPa.

7.2. Résistance mécanique à la traction à l'état sec

A partir des résultats obtenus à 28 jours après séchage, on peut constater une évolution de la résistance à la traction en fonction de la teneur en ciment similaire à celle de la résistance à la compression. L'analyse de la figure 6 montre que l'échantillon 3 donne les meilleures résistances à la traction. Le rapport résistance à la compression/résistance à la traction se situe entre 5 et 6 pour l'ensemble des échantillons. L'augmentation des résistances mécaniques en fonction de la teneur en ciment s'explique du fait que l'augmentation en ciment entraîne l'évolution du pH de la solution pour que l'hydratation des minéraux du clinker puisse avoir lieu. Plus la teneur en ciment est élevée dans le mélange cru, plus la concentration de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lors du durcissement est grande. Cette augmentation de teneur en ciment améliore les caractéristiques mécaniques par la multiplication des liaisons cristallines.

7.3. Résistance mécanique à la compression à l'état humide

La figure 7 donne une comparaison entre les résistances mécaniques à la compression à l'état sec (séchage avant

écrasement) et à l'état humide (immersion avant écrasement) pour les trois échantillons. On remarque que pour l'échantillon 1, même à 15 % de ciment, on a une résistance à la compression à l'état humide quasi nulle (cas d'une argile de type Montmorillonite : minéral actif potentiellement gonflant). L'échantillon 2 composé essentiellement d'illite (minéral peu gonflant) donne des résistances à l'état humide importantes variant entre 2,9 et 7,5 MPa. L'échantillon 3 composé essentiellement de kaolinite (minéral stable et peu ou pas gonflant) donne des résistances à l'état humide assez importantes variant entre 3,2 et 15 MPa, quand il est stabilisé avec un dosage en ciment variant entre 3 et 15 %. On constate ainsi qu'il est plus intéressant d'utiliser une terre composée essentiellement de kaolinite ou d'illite stabilisée avec une teneur moyenne en ciment de 3 à 5 % que d'améliorer une terre composée essentiellement de Montmorillonite.

On peut donc conclure que la nature minéralogique des argiles influe très significativement sur les caractéristiques mécaniques des BTS exposés à l'eau.

On note sur ce graphique l'importance principale de la teneur en ciment pour la sensibilité à l'eau. Aucune éprouvette non stabilisée ne supporte l'immersion ; il faut incorporer un minimum de ciment pour que les éprouvettes

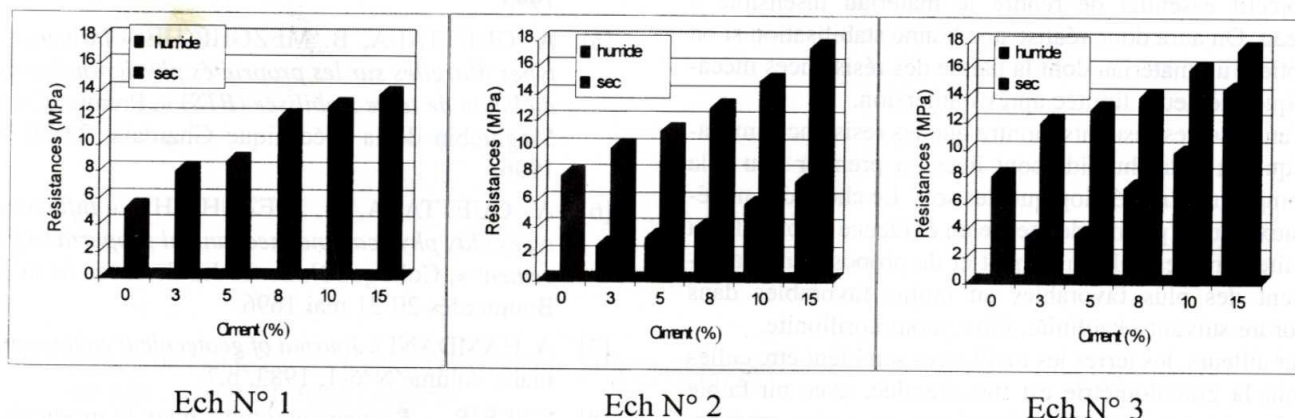


Figure 7. Résistance mécanique à la compression à l'état sec et l'état humide en fonction du dosage en ciment.

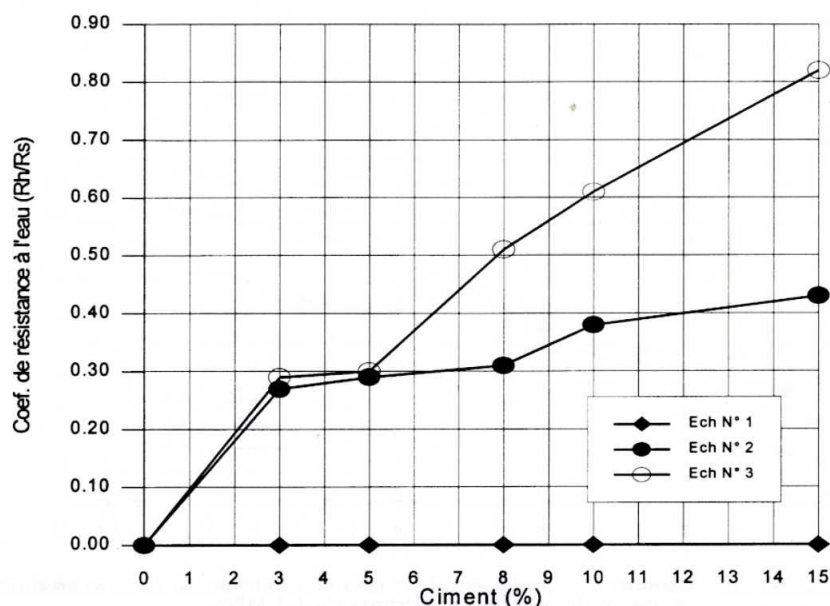


Figure 8. Evolution de coefficient de résistance à l'eau en fonction du dosage en ciment sous une contrainte de compactage de 1,5 MPa.

résistent à l'immersion. Ce minimum varie entre 0 et 3 % pour les échantillons 2 et 3.

7.4. Coefficient de résistance à l'eau

On a déterminé le coefficient de résistance à l'eau à partir du rapport des résistances à la compression état sec - état humide. Sur la figure 8 on peut remarquer que le coefficient de résistance à l'eau augmente en fonction de la teneur en ciment et varie entre 0 et 82 % pour l'échantillon 3 (cas d'une argile de type kaolinite), de 0 à 40 % pour l'échantillon 2 (cas d'une argile de type illite) et reste nul pour l'échantillon 1 (cas d'une argile de type Montmorillonite).

CONCLUSION

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence de la nature des argiles sur le comportement des bétons de terre stabilisée vis-à-vis de l'eau et de préciser un certain nombre de points :

1. L'effet principal de la stabilisation au ciment a pour objectif essentiel de rendre le matériau insensible à l'eau. On aura donc réalisé une bonne stabilisation si on obtient un matériau dont la baisse des résistances mécaniques demeure limitée après immersion.
2. L'analyse des résultats montre que les résistances mécaniques à l'état humide sont liées en premier lieu à la composition minéralogique des sols. Le choix des matériaux nous a permis de mettre en évidence l'aptitude du traitement des sols au ciment et de proposer un classement des plus favorables au moins favorables dans l'ordre suivant : kaolinite, illite, montmorillonite.
3. Par ailleurs, les terres les meilleures semblent être celles dont la granulométrie est très étendue, avec un faible indice de plasticité. A cet égard une correction granulométrique s'avère nécessaire.

4. La teneur en eau au compactage doit être surveillée attentivement ; elle doit être déterminée pour chaque mélange.

5. En revanche il serait illusoire de compter sur une forte proportion de ciment pour améliorer une terre contenant des argiles gonflantes [5].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. ACCETTA « *Vibro-compactage du matériau terre pour l'élaboration de blocs à bâtir* » rex-coop, Archisteph Association de Recherche de l'EASE Saint-Etienne, France, juin, 1987.
- [2] AFNOR Recueil de Norme Françaises « *Bâtiment béton et constituants du béton* », Paris, 1984.
- [3] ASTM, *Annual book of standards*, Philadelpia, 1968.
- [4] A. GUETTALA, B. MEZGHICHE « *Caractéristiques mécaniques de béton de terre stabilisée à base des sols de la région de Biskra* », 6^e Congrès Arabe en Génie-Civil, Damas, Syrie, 21,22, 23 et 24 Octobre 1995.
- [5] A. GUETTALA, B. MEZGHICHE « *Influence des types d'argiles sur les propriétés physico-mécaniques du béton de terre stabilisée (BTS)* », Premier Congrès Maghrébin de la Mécanique Ghardaia, 23-26 Mars 1996.
- [6] A. GUETTALA, B. MEZGHICHE « *Influence of types clay physical and mechanical properties of soil-cement* », Colloque National des Sciences de la Terre Boumerdès 20-21 mai 1996.
- [7] A. HAMDANI « *Journal of geotechnical engineering* », mars, volume N°6-1, 1983, p.7.
- [8] CNERIB, « *Recommandations pour la production et la mise en œuvre du BTS* », édition, 1993.

- [9] F. GHOMARI « *Matériau en terre crue compactée : amélioration de sa durabilité à l'eau* », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 1989.
- [10] H. HOUBEN, H. GUILLAUD (CRATerre) « *Earth construction primer Brussels* », CRATerre / PGC / CRA / UNCHS / AGCD, 1984.
- [11] J. MICHEL « *Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction* », Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics, Série Matériaux N° 339 mai, 1976 p. 22 - 35.
- [12] J. DETHIER « *Des Architectures de terre* », Edition du Centre Pompidou, Paris, 1986.
- [13] LNTPB (1971) « *Recherche Habitat Saharien : le béton de terre* », Revue Construire N° 3 mars/avril, 1983, p. 32-44.
- [14] M. SAF « *Habitat : une importance vitale* », Revue Construire N° 2 jan/fév, 1983, p.17.
- [15] MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ALGÉRIEN, *Communiqué privé*, Décembre 1990.
- [16] N.M. BENMATTI « *L'habitat du tiers monde, cas de l'Algérie* », Edition SNED Alger, 1982.
- [17] N.M. VILENKINA « *Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux* », Moscou, 1956.
- [18] P. DOAT, A. HAYS, H. HOUBEN. « *Construire en terre* », Collection en Architecture, Paris, 1981.
- [19] R. LANCHON « *Cours de laboratoire (1 et 2) granulats béton sols* », Editions Casteilla, Paris, 1988.
- [20] Revue Urbanisme, N° 4 p. 113, 1987.
- [21] Y. NAJAR. A. BEDDAY « *Directives techniques relatives à la construction en terre* », Colloque Maghrébin sur les matériaux locaux, Biskra les 3,4 et 5 décembre, 1991.

☒ Institut de Génie Civil - Centre Universitaire Mohamed Khider
BP 145 - 07000 BISKRA (Algérie)

☒ Institut de Génie Civil - Centre Universitaire de Guelma (Algérie)