



## RILEM TC 164-EBM : MECHANICS OF EARTH AS A BUILDING MATERIAL MÉCANIQUE DE LA CONSTRUCTION EN TERRE

# Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment <sup>(\*)</sup>

(A wetting-drying test for cement-stabilised compressed earth blocks)

Préparé par : A. Hakimi, H. Ouissi, M. El Kortbi et N. Yamani

Laboratoire Public d'Essais et d'Études (LPEE), Casablanca, Maroc

**Membres du TC :** Président : A. Hakimi, Maroc ; Secrétariat : M. El Kortbi, Maroc ; N. Yamani, Maroc ; **Membres :** A. Acharhabi, Maroc ; M. Ayeb, Maroc ; N. P. Barbosa, Brésil ; E. H. Bartali, Maroc ; R. Bouqartacha, Maroc ; A. Cherrabi, Maroc ; P. Dencause, Maroc ; S. El Amine, Maroc ; Z. El Gharbi, France ; A. Gilbert, Italie ; S. Jalali, Portugal ; A. Labib, Maroc ; A. Lahbabi, Maroc ; M. Martin, Burkina Faso ; R. Mattone, Italie ; A. Mesbah, France ; M. Olivier, France ; H. Ouissi, Maroc ; B. Pignal, France ; S. Sanfo, Burkina Faso ; Z. Sekkat, Maroc ; A. Thiombiano, Burkina Faso.

### ENGLISH SUMMARY

A method to characterise the durability of the cement-stabilised compressed earth blocks which TC 164-EBM is committed to developing is described in a report [1] presented at the 49th Technical Session of the RILEM General Council. The objective is to develop a wetting-drying test on cylindrical cement-stabilised compressed earth samples to determine the decrease in their compressive strength. This artificial ageing test is defined by three parameters: the duration of immersion, the duration of drying and the number of cycles. For the experimental approach to these three parameters, this method anticipates a study of the evolution of the compressive strength of 2 series of cylindrical samples having different strengths after curing, according to the duration of immersion, the duration of drying and the number of cycles. This report presents results for the constants: drying temperature (70°C) and relative humidity (40%).

cylindriques de terre comprimée et stabilisée au ciment en vue d'apprécier la chute de leur résistance en compression simple. Le test d'humidification-séchage destiné à faire vieillir artificiellement les éprouvettes de terre stabilisée au ciment est défini par la donnée du quintuplé (Ti, Ts, T, HR, n) où Ti est la durée d'immersion, Ts la durée de séchage, T la température, HR l'humidité relative et n le nombre de cycles. Les effets induits par ce test sur des éprouvettes intactes sont évalués par le résultat de l'expression suivante :  $[(R_{cu} - R_n)/R_{cu}] \times 100$ , où Rcu est la résistance en compression simple d'une éprouvette intacte ayant subi une cure normale et Rn la résistance en compression simple d'une éprouvette identique à la précédente mais ayant subi n cycles d'immersion-séchage. La méthode exposée décrit les essais à entreprendre pour trouver les 3 paramètres du test, Ti, Ts et n, pour une température de séchage et une humidité relative toutes deux constantes et respectivement égales à 70°C et 40%. Elle prévoit pour l'approche expérimentale de ces 3 paramètres une étude de l'évolution de la résistance en compression simple [2, 3] de 2 séries d'éprouvettes ayant des résistances après cure différentes en fonction de la durée d'immersion, de la durée de séchage et du nombre de cycles. Le présent article est une présentation des trois paramètres obtenus à l'issue de la réalisation des essais décrits par la méthode proposée.

## 1. INTRODUCTION

La méthode de caractérisation de la durabilité du bloc de terre comprimée et stabilisée au ciment que le TC 164-EBM s'est engagé à mettre au point dans le cadre de son programme de travail est décrite dans le rapport [1] présenté lors de la Session Technique du 49<sup>e</sup> Conseil Général de la RILEM. Elle vise l'élaboration d'un test d'humidification-séchage à faire subir à des éprouvettes

## 2. MATÉRIEL

### 2.1 Fabrication des séries d'éprouvettes

#### 2.1.1 Le matériau terre

Le matériau terre retenu pour la fabrication de toutes les séries d'éprouvettes cylindriques considérées est identique à celui ayant servi dans la campagne d'essais de résistance mécanique sur échantillons de terre compri-

(\*) Les résultats présentés dans ce rapport ont été discutés lors des 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> réunions du TC 164-EBM.

Tableau 1 – Éléments d'identification du matériau terre

Granulométrie (%)	Limites d'Atterberg (%)	Bleu de méthylène	Analyse chimique (%)
Graviers : 12-15	LL : 38-36	VB : 1,38-1	M.Organique : 0,78
Sables : 28-31	LP : 26-22		Chlorures : 0,07
Fines : 60-54	IP : 12-14		Sulfates : 0,64
Argiles : 18-20			Silico-Alumineux : 68
			CaCO <sub>3</sub> : 16
			MgCO <sub>3</sub> : 6

mée dont les résultats ont fait l'objet d'un rapport présenté lors de la 3<sup>e</sup> réunion du TC 164-EBM à Casablanca et publié dans le journal *Matériaux et Constructions* [4]. Les éléments d'identification de ce matériau sont repris dans le Tableau 1.

### 2.1.2 Dispositif expérimental de fabrication

Le dispositif expérimental de fabrication des éprouvettes comprend :

- un moule métallique à double coquille et ses accessoires : les pistons inférieur et supérieur, les 2 demi-coquilles de calage inférieures et le piston de démoulage. Ses dimensions intérieures sont : hauteur : 20cm, diamètre : 8cm ;

- et une presse hydraulique de 300 kN de capacité fonctionnant à une vitesse comprise entre 0,1 kN/s et 30 kN/s pour le mode force et entre 0,02 mm/s et 2 mm/s pour le mode déplacement.

Le dispositif expérimental décrit ci-dessus permet non seulement la fabrication des éprouvettes, mais également l'optimisation de leurs paramètres de production (teneur en eau optimale de compactage statique ( $W_{ocs}$ ); densité sèche maximale ( $\gamma_d$ ) moyennant l'essai de compactage statique [5].

### 2.1.3 Les séries d'éprouvettes

On note E (pi ; ai) la série d'éprouvettes cylindriques de terre comprimée ayant les caractéristiques suivantes :

- même diamètre : 8 cm ,
- même élancement : ~ 1,5,
- même âge,
- compactée à la teneur en eau optimale  $W_{ocsi}$ ,
- stabilisée au même taux de ciment ai, compactée à la même pression de fin de compression pi,
- et ayant subi la même cure.

Le programme établi par le TC prévoit l'utilisation des séries suivantes :

- E(80 bars ; 10%) et E(20 bars ; 4%) pour la recherche des paramètres  $T_i$ ,  $T_s$  et  $n$  du test.
- et E(80 ; 7%), E(80 ; 4%), E(50 ; 10%), E(50 ; 7%), E(50 ; 4%), E(20 ; 10%) et E(20 ; 7%) pour leur validation.

En effet, la mesure de la résistance en compression des séries autres que E(80bars ; 10%) et E(20bars ; 4%) (séries extrêmes) permettra, une fois les paramètres du test évalués expérimentalement, de vérifier l'existence d'une correspondance entre les résistances en compression simple après

cure qu'elles ont développées et les chutes de ces mêmes résistances que l'on pourra enregistrer après les avoir fait subir le test en question. Cette correspondance est telle que pour des éprouvettes classées selon leurs résistances en compression après cure, elles devront l'être dans le même ordre selon leurs chutes de résistance une fois le test exécuté.

## 3. MÉTHODES

### 3.1 Les paramètres de fabrication

Les paramètres de fabrication de chaque série d'éprouvettes définie précédemment, à savoir la teneur en eau optimale de compactage statique ( $W_{ocs}$ ) et la densité sèche maximale ( $\gamma_d$ ), sont déduits des courbes d'optimisation sur éprouvettes cylindriques des Figs. 1-3 représentant les résultats des 9 essais de compactage statique réalisés avec le matériau terre identifié en 2.1.1, et mélangé successivement aux quantités de ciment correspondant aux taux arrêtés précédemment.

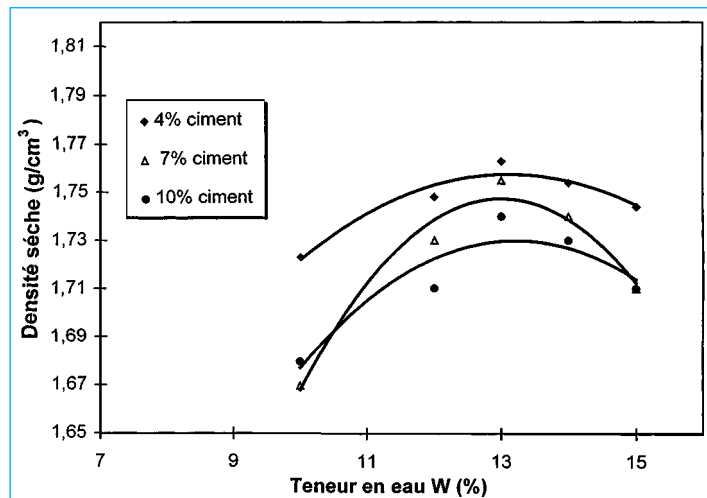


Fig. 1 – Courbes d'optimisation sur éprouvettes cylindriques (Fc = 20 bars).

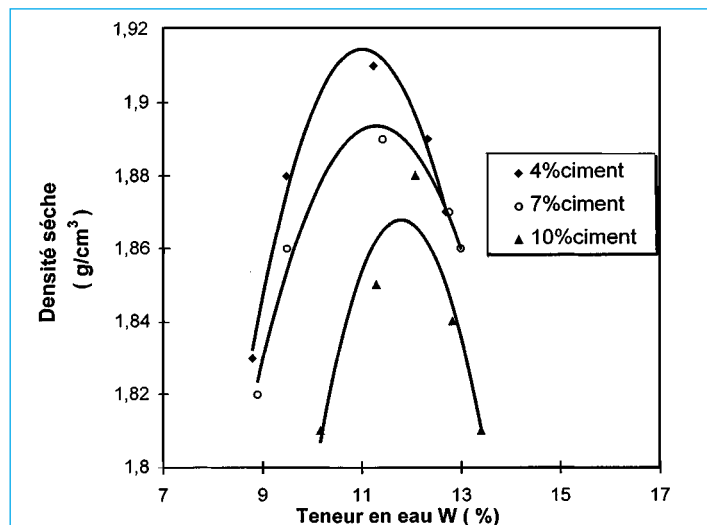


Fig. 2 – Courbes d'optimisation sur éprouvettes cylindriques (Fc = 50 bars).

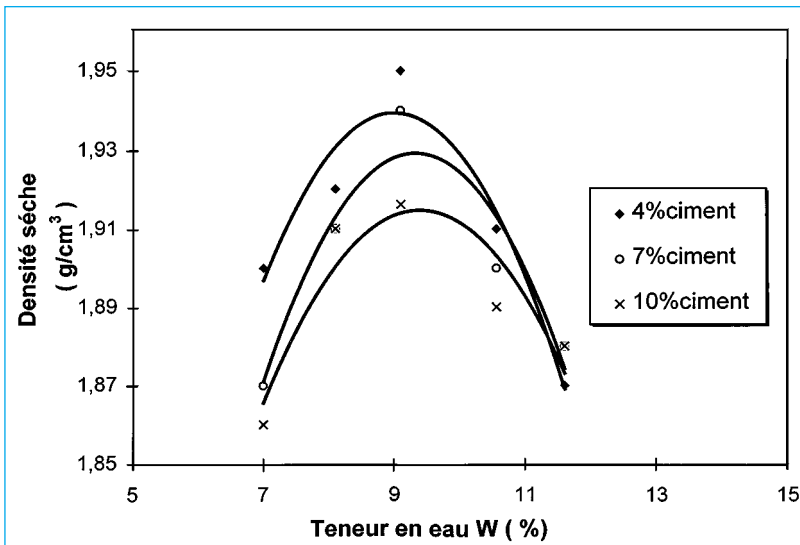


Fig. 3 – Courbes d’optimisation sur éprouvettes cylindriques (Fc = 80 bars).

Série d’éprouvettes	Cure
E(80,10%) - E(20, 4%)	7 Jours à (20°C, 95% HR) + 7 Jours à (25°C, 60%HR) + 7 Jours en évolution libre

### 3.2 La cure des éprouvettes et les essais programmés

Le programme du TC 164-EBM prévoit l’utilisation des séries extrêmes E(80 ; 10%) et E(20 ; 4%) respectivement notées E(p<sub>max</sub> ; a<sub>max</sub>) et E(p<sub>min</sub> ; a<sub>min</sub>) pour la recherche des paramètres du test d’humidification séchage : Ti, Ts et n. Ces 2 séries sont donc fabriquées avec les paramètres optimaux déduits des courbes précédentes et ont subi la cure mentionnée dans le Tableau 2 avant de faire l’objet des essais suivants :

a) Mesure de la résistance en compression simple après cure Rcu d’un échantillon d’éprouvettes représentatif de chacune des séries extrêmes. L’essai de compression simple a été réalisé suivant le mode opératoire proposé par le TC 164-EBM [4]. Le schéma de la Fig. 4 de l’annexe A1 décrit le principe de cet essai sur une éprouvette cylindrique.

Éprouvette N°	Hauteur (cm)	P21J (g)	FC (kN)	Rcu (MPa)
29	12,8	1241	22,56	4,50
27	12,6	1235	28,35	5,64
6	12,9	1246	29,04	5,80
27	12,6	1249	26,42	5,3
27	12,7	1234	23,35	4,70
54	12,8	1237	21,55	4,30
59	12,8	1231	21,10	4,20
Moyenne	12,74	1239	24,62	4,92
Écart-type	0,11	6,61	3,28	0,65

b) Étude de l’évolution de la résistance en compression simple en fonction de la durée d’immersion pour des éprouvettes de la série E(80 ; 10%) âgées de 21 jours et ayant subi la cure ci-dessous.

c) Étude de l’évolution de la résistance en compression simple en fonction de la durée de séchage à 70°C et 40% HR pour des éprouvettes de la série E(20 ; 4%) âgées de 21 jours et ayant été immergées pendant la durée Ti évaluée en (b).

d) Étude de l’évolution de la résistance en compression simple pour des éprouvettes de la série E(20 ; 4%) âgées de 21 jours, ayant subi la cure définie dans le Tableau 2, ayant été immergées pendant la durée Ti évaluée en (b) et séchées pendant la durée Ts évaluée en (c). L’organigramme de l’annexe A2 est un récapitulatif des différentes étapes de la détermination des paramètres du test d’immersion-séchage.

## 4. RÉSULTATS

### 4.1 Résistance en compression simple après cure des séries extrêmes E(80,10%) et E (20, 4%)

#### Série E(80, 10%)

Un échantillon de 7 éprouvettes identiques de la série maximale E(80 ; 10%), âgées de 21 jours et ayant subi la cure définie précédemment, a fait l’objet d’un essai de compression simple dont le mode opératoire est identique à celui décrit dans les résultats de la campagne d’essais de résistances mécaniques sur échantillon de terre comprimée menée par le groupe expérimentation en laboratoire du TC 164-EBM [2, 4]. Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 3.

La résistance en compression simple moyenne de la série E(80, 10%) est égale à 4,92 MPa.

#### \*Série E(20, 4%)

Un échantillon de 5 éprouvettes identiques de la série minimale E(20 ; 4 %), âgées de 21 jours et ayant subi la cure définie précédemment, a fait l’objet d’un essai de compression dont les résultats sont consignés dans le Tableau 4.

Échantillon	Hauteur (cm)	P21J (g)	Fc (kN)	Rcu (MPa)
1	11,8	1079	10,21	2,03
2	11,9	1080	10,54	2,09
3	11,9	1081	11,58	2,30
4	11,7	1076	10,70	2,13
5	11,6	1051	12,37	2,46
Moyenne	11,8	1073,4	11,08	2,20
Écart-type	0,13	12,66	0,88	0,17

**Tableau 5 – Résultats du suivi de la résistance en compression simple et du poids des éprouvettes de la série E(80 ; 10%) en fonction du temps d'immersion**

Échantillon N°	P21J (g)	Ph (g)	durée d'immersion (min)	Rc (MPa)
0	1239	1239	0	4,92
1	1242,33	1304	1	2,58
2	1241,67	1315	2	2,27
3	1247	1352,33	4	1,99
4	1235,33	1339,33	5	1,79
5	1241,33	1368,33	10	1,70
6	1221,25	1356,00	15	1,68
7	1223,5	1396,5	30	1,89
8	1235,33	1378,8	60	1,80
9	1237,25	1373,8	120	1,58
10	1239	1384,5	180	1,85
11	1241	1397	240	1,59
12	1240	1387,8	360	1,57
13	1241,75	1390,33	480	1,68
14	1247,75	1401,25	600	1,54
15	1239,00	1385	720	1,65
16	1240,50	1389	840	1,54
17	1224,50	1373,50	900	1,81
18	1242	1400,50	1080	1,50
19	1236,50	1399,50	1200	1,55
20	1238,50	1402	1320	1,61
21	1239,50	1396,50	1440	1,76
22	1239,25	1393	2880	1,82

Les éprouvettes présentent en moyenne un élançement de l'ordre de 1,47. Leur résistance moyenne après cure est égale à 2,20 MPa.

## 4.2 Évolution de la résistance en compression simple en fonction de la durée d'immersion des éprouvettes de la série E(80, 10%)

Plusieurs dizaines d'éprouvettes identiques de la série E(80 ; 10%) sont simultanément immergées dans l'eau au moment de la mesure de leur résistance en compression simple.

Des échantillons de 2 à 4 éprouvettes sont sortis de l'eau après des durées d'immersion croissantes pour subir le même essai de résistance en compression simple après une mesure du poids humide de chaque éprouvette. La résis-

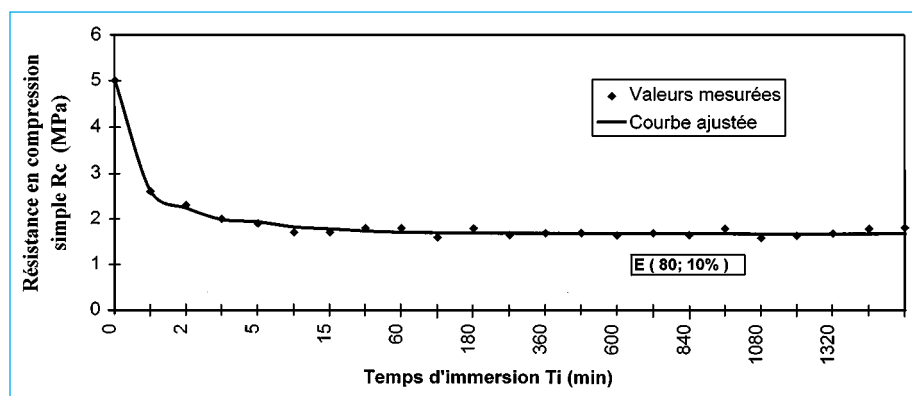


Fig. 4 – Évolution de la résistance en compression simple en fonction du temps d'immersion.

tance moyenne de chaque échantillon, son poids humide moyen et sa durée d'immersion sont regroupées dans le Tableau 5 ainsi que son poids après 21 jours de cure.

Le schéma de la Fig. 4 permet d'apprécier l'évolution de la résistance en compression simple des éprouvettes de la série E(80 ; 10%) en fonction de la durée d'immersion. On retrouve à  $t = 0$  la résistance après cure  $R_{cu}$  des éprouvettes âgées de 21 jours et n'ayant subi aucune immersion. Cette dernière est très voisine de 5 MPa. Au bout d'une minute d'immersion totale, on note une importante chute de cette résistance (de l'ordre de 50%), puis on assiste à une atténuation de cette décroissance sur les quinze minutes d'immersion qui suivent. La résistance en compression simple se stabilise au fur et à mesure de l'augmentation du temps d'immersion même si elle connaît de légères fluctuations épisodiques.

### 4.2.1 Estimation du temps d'immersion du test

Le temps d'immersion est défini comme étant la plus petite durée d'immersion des éprouvettes de la série E(80 ; 10%) au bout de laquelle on n'enregistre plus de variations notables de leur résistance en compression simple et ce pour des durées d'immersion pouvant atteindre plusieurs jours. Le schéma de la Fig. 4 nous a permis d'estimer graphiquement le temps d'immersion du test ; celui-ci est de l'ordre de 25 minutes :  $T_i = 25$  min.

**Remarque :** il serait intéressant de comparer la durée d'immersion du test évaluée à la durée de saturation des éprouvettes considérées.

## 4.3 Évolution de la résistance en compression simple en fonction de la durée de séchage des éprouvettes de la série E(20 ; 4%)

Les éprouvettes de la série E(20 ; 4%) âgées de 21 jours sont d'abord trempées totalement dans l'eau avant d'être mises à sécher dans une ambiance régulée en température et en humidité relative ( $T = 70^\circ\text{C}$ ,  $HR = 40\%$ ). Leur durée d'immersion est égale au temps d'immersion du test :  $T_i = 25$  min, et la mesure de leur résistance en compression en des temps de séchage différents a donné les résultats indiqués dans le Tableau 6. Les valeurs consignées sont des moyennes arithmétiques de résultats issus d'échantillons de 3 éprouvettes.

Nous avons représenté sur le schéma de la Fig. 5 l'évolution de la résistance en compression simple des éprouvettes de la série E(20 ; 4%), trempées totalement dans l'eau pendant 25 minutes, en fonction de leur temps de séjour dans l'ambiance régulée à  $70^\circ\text{C}$  et 40% de H.R.

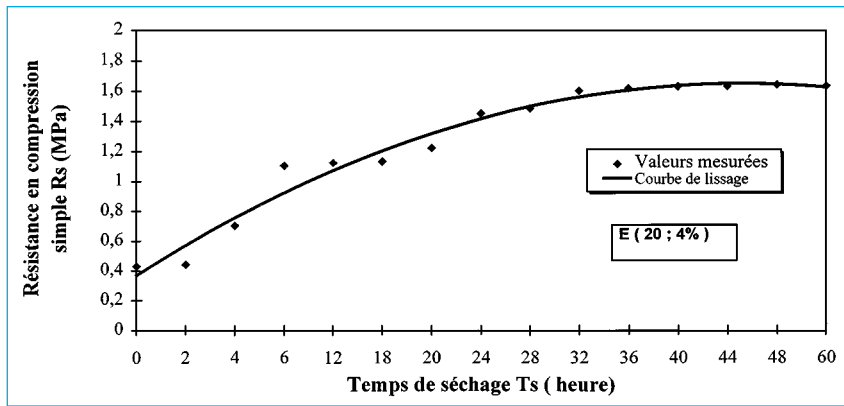


Fig. 5 – Évolution de la résistance en compression simple en fonction du temps de séchage.

L'estimation du temps de séchage du test est effectuée graphiquement en considérant les derniers points de la courbe de lissage de la Fig. 5 le long desquels elle est presque horizontale. En considérant la droite d'équation  $R_c = R_c'$ , où  $R_c'$  est la résistance moyenne des 6 derniers points de la courbe de la Fig. 5, l'abscisse du point d'intersection de cette droite et de la courbe est la durée de séchage  $T_s$  du test. Elle est de l'ordre de 36 heures.

En considérant la droite d'équation  $R_c = R_c'$ , où  $R_c'$  est la résistance moyenne des 6 derniers points de la courbe de la Fig. 5, l'abscisse du point d'intersection de cette droite et de la courbe est la durée de séchage  $T_s$  du test. Elle est de l'ordre de 36 heures.

**Tableau 6 – Résultats du suivi de la résistance en compression simple et du poids des éprouvettes de la série E(20 ; 4%) en fonction du temps de séchage**

Échantillon	P 21J (g)	PH (g)	Durée de Séchage (h)	Ps (g)	RC (MPa)
0	1124	1295	0		0,43
1	1152	1325	2	1252	0,44
2	1146,67	1318,33	4	1188,33	0,70
3	1124,67	1297	6	1136,67	0,99
4	1125	1290,67	12	1137	1,12
5	1142	1317,67	18	1143	1,19
6	1128	1305,50	20	1129	1,22
7	1137	1312	24	1130,67	1,45
8	1138	1319,67	28	1124	1,48
9	1140,67	1311,33	32	1124	1,56
10	11,30	1297	36	1122	1,62
11	1143	1325,67	40	1126,67	1,63
12	1137,33	1307,33	44	1131	1,69
13	1153,33	1337,67	48	1124,67	1,64
14	1129,33	1309,67	60	1129,97	1,63

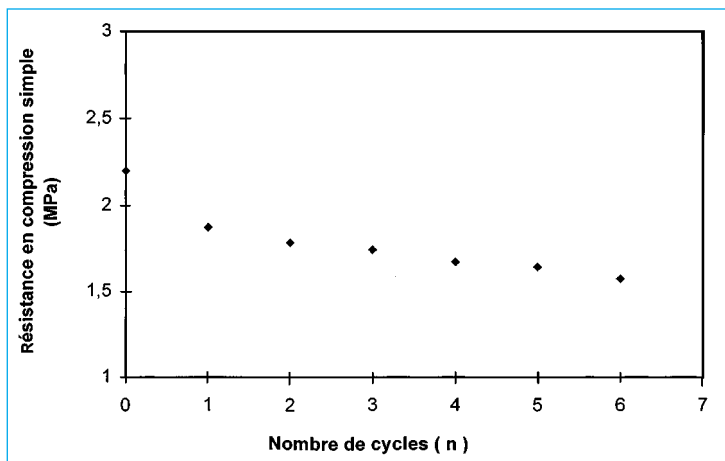
#### 4.4 Évolution de la résistance en compression simple de la série E(20 ; 4%) en fonction du nombre de cycles

Les résultats du suivi de la résistance en compression simple des éprouvettes de la série E(20 ; 4%), en fonction du nombre de cycles (n), sont illustrés par le schéma de la Fig. 6. La résistance après cure ( $R_{cu}$ ) des éprouvettes

L'allure de la courbe de lissage des points expérimentaux est comparable à celle prévue par la méthode développée dans le rapport [1] définissant le programme du TC 164-EBM. On note une augmentation de cette résistance avec celle du temps de séchage suivie d'une stabilisation de cette dernière pour des durées supérieures à 32 heures.



Photo n° 1 – État de trois éprouvettes de la série E(20 , 4%) après 21 jours de cure.



témoins s'élève à 2,2 MPa (Photo n° 1). Dès le 1<sup>er</sup> cycle, cette résistance commence à chuter et on a observé une perte de matière notamment au niveau de la partie centrale de l'échantillon. Au bout du 6<sup>e</sup> cycle, le pourcentage de chute de résistance est d'environ 28,6%. L'examen de l'état des éprouvettes au 7<sup>e</sup> cycle montre qu'elles ne présentent plus de surface de contact parfaite

Fig. 6 – Évolution de la résistance en compression simple de la série E(20 ; 4%) en fonction du nombre de cycles.



Photo n° 2 – État des mêmes éprouvettes après 6 cycles d'immersion-séchage.



Photo n° 3 – État des mêmes éprouvettes après 7 cycles d'immersion-séchage. Elles ne sont plus aptes à subir un essai de compression simple.

(Photo n° 3) pour subir un essai en compression simple tel qu'il est défini dans le rapport [4]. La résistance est donc non mesurable, d'où l'arrêt de l'expérimentation. Ainsi le nombre de cycles du test est égal à 6 (Photo n° 2).

## 5. CONCLUSION

En conclusion, le test d'humidification-séchage élaboré par le groupe expérimentation en laboratoire du TC 164-EBM est défini par les paramètres suivants:

- Temps d'immersion :  $T_i = 25$  minutes
- Temps de séchage :  $T_s = 36$  heures
- Nombre de cycles :  $n = 6$
- Température de séchage :  $T = 70^\circ\text{C}$
- Humidité relative :  $HR = 40\%$ .

N.B : Ces derniers sont obtenus à l'issue d'expériences réalisées sur les échantillons suivants :

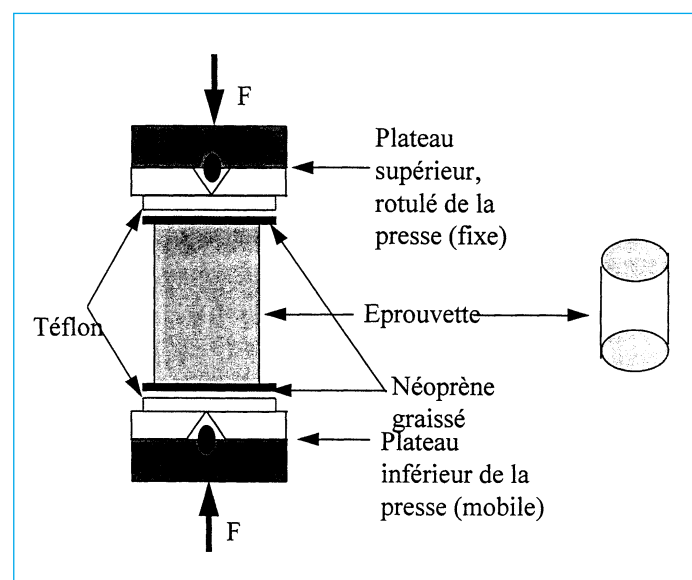
- Éprouvettes de terre comprimée et stabilisée au ciment CPJ 35 : cylindriques (Diamètre  $\phi = 8$  cm et hauteur  $H = 12$  cm)
- Âge et conditions de cure : 21 jours [7 jours à ( $20^\circ\text{C}$ ; 95%) + 7 jours à ( $25^\circ\text{C}$ ; 60%) + 7 jours en évolution libre].

Pour la validation de ces résultats, un programme expérimental sur des séries d'éprouvettes fabriquées avec d'autres terres convenables à la technique des blocs de terre comprimée est en cours de réalisation par le groupe expérimentation en laboratoire (GREL) du TC. Les résultats issus de ce programme feront l'objet d'une publication.

## BIBLIOGRAPHIE

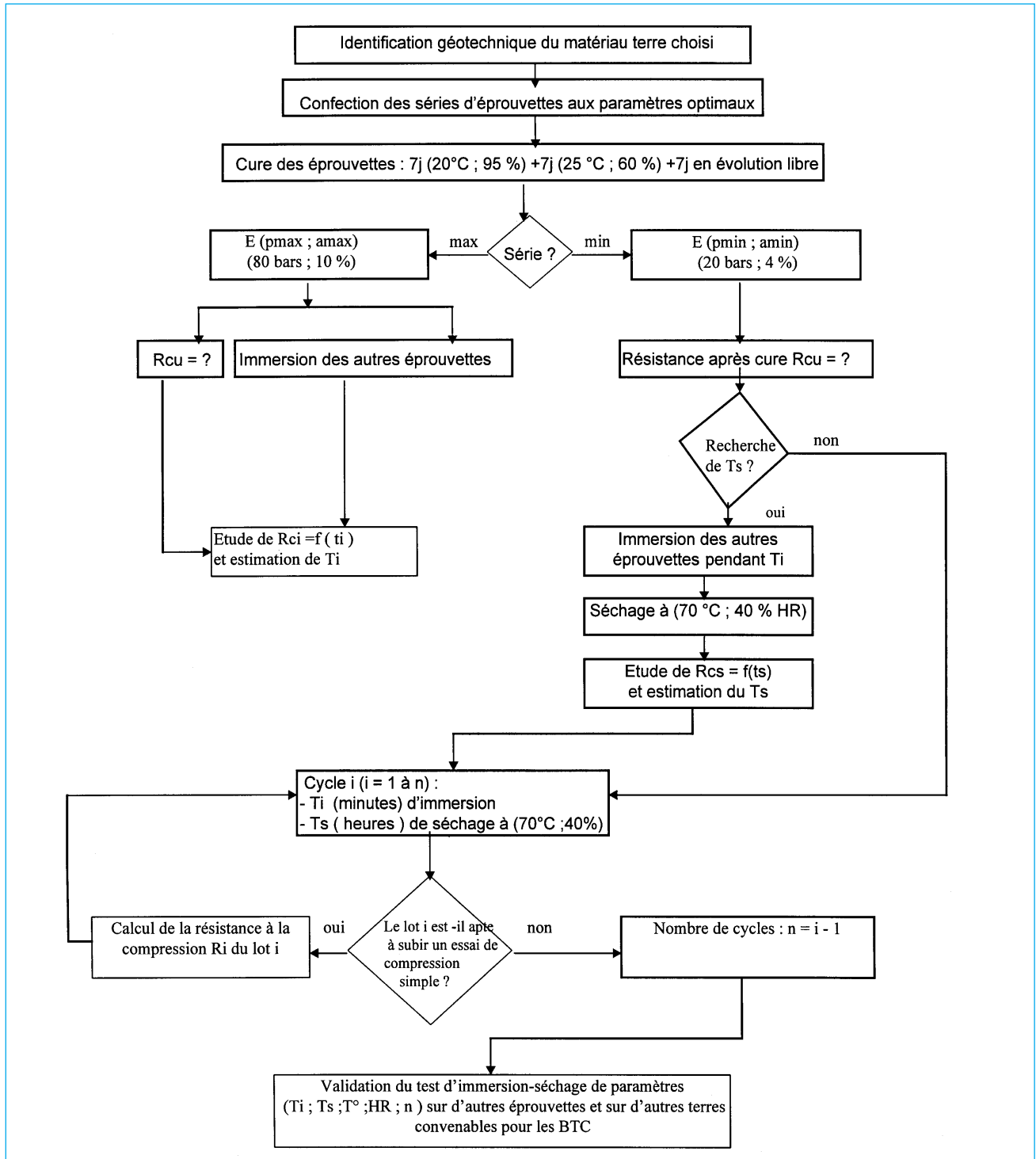
- [1] Hakimi, A. et Yamani, N., 'Une méthode de caractérisation de la durabilité du bloc de terre stabilisée au ciment', Rapport technique du TC 164-EBM, 49<sup>e</sup> Conseil Général de la RILEM, Marrakech, Septembre 1995.
- [2] Olivier, M., El Gharbi, Z. et Mesbah, A., 'Proposition d'une norme pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimés', 2<sup>e</sup> Séminaire international de la recherche sur les matériaux locaux, Marrakech, Septembre 1995.
- [3] Myriam, D., Épouse Olivier, 'Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre', Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Janvier 1994.
- [4] Hakimi, A., Yamani, N. et Ouissi, H., 'Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée', *Mater. Struct.* **29** (192) (1996) 600-608.
- [5] Olivier, M. et Mesbah, A., 'Le matériau terre : essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre comprimées', Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 146, Nov-Dec.1986.

## ANNEXE A1



Dispositif de mise en compression simple sur éprouvette cylindrique.

ANNEXE A2



Procédure expérimentale de mesure des paramètres du test d'immersion-séchage.