



## Valorisation des déchets de sols et de sédiments dans la construction en terre

Mazhar HUSSAIN <sup>1</sup>, Hafida ZMAMOU <sup>2</sup>, Nathalie LEBLANC <sup>2</sup>,  
Daniel LEVACHER <sup>3</sup>, Antony PROVOST <sup>4</sup>, Abdoulaye KANE <sup>1</sup>

1. UniLaSalle-Ecole des Métiers de l'Environnement, Cyclann, Campus de Ker Lann, 35170 Bruz, France. [mazhar.hussain@unilasalle.fr](mailto:mazhar.hussain@unilasalle.fr)
2. UniLaSalle, Univ.Artois, EA7519 - Transformations & Agro-ressources, Normandie Université, 76130 Mont Saint Aignan, France.
3. Normandie Université, Unicaen, UMR 6143 CNRS - M2C, 24 rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.
4. GENDROT TP, Z.A. de Bel-Air, 35320 Crevin, France.

### Résumé :

Les sédiments de dragage et les sols excavés sont des déchets généralement envoyés en décharge. Les déchets de sol et de sédiments proviennent de diverses sources, notamment des activités de construction et d'entretien des ports et des canaux de navigation. Cette étude examine les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de sédiments fluviaux du fleuve Usumacinta, au Mexique et des sols urbains de Bretagne, en France, afin d'évaluer leur potentiel d'utilisation dans les matériaux de construction en terre. Ces caractéristiques incluent prioritairement la granulométrie, la matière organique, les limites d'Atterberg, la teneur en carbonates, la minéralogie et la teneur en oxydes. L'adéquation des sédiments à différentes applications a été observée grâce à des approches industrielles.

Pour observer le comportement mécanique des briques de terre, des blocs de terre comprimée de taille 4\*4\*16 cm<sup>3</sup> ont été fabriqués à une teneur en humidité optimale. Les échantillons de briques ont été compactés dynamiquement pour augmenter la densification et la résistance des briques. Des blocs de terre cylindriques de grande taille (15 cm de diamètre pour 30 cm de hauteur), ont également été fabriqués pour voir l'influence de la taille. De plus, les sédiments fluviaux ont été renforcés par des fibres de fleurs de palmier à huile (déchets agricoles locaux) avec un ajout de 0 à 5 % en masse de fibres pour observer le comportement des briques en terre. Les sols excavés de Cesson et les sédiments dragués présentent une bonne résistance à la compression de 1,7 et 3 MPa. Avec l'ajout de fibres, la résistance à la flexion des briques à base de sédiments augmente, les valeurs atteignent 3,2 MPa. La résistance à la compression du sol excavé de Cesson diminue s'il est mélangé avec un sol argileux local issu de Crevin.

### Mots-clés :

Sédiments de dragage, Sols excavés, Construction en terre.

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

### 1. Introduction

Un volume considérable de déchets de sols (150 millions de tonnes) et de sédiments (50 millions de m<sup>3</sup>) est généré chaque année et mis en décharge (Hussain, 2022 ; COUSSY, 2022). Le stockage de ces déchets de sols est coûteux. Par ailleurs, une quantité importante de terre et de sable est extraite pour la fabrication de matériaux de construction tels que les briques cuites et le béton, comme pour les applications de remblayage. La réutilisation des sols et des sédiments dans les matériaux de construction peut contribuer à valoriser ces déchets et à économiser les ressources naturelles. La réutilisation des sols et des sédiments dans différentes applications est fortement influencée par les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de ces déchets. Les sédiments sont dragués pour des opérations d'entretien et une quantité importante est clapée en mer par immersion. Cependant, dans les zones urbaines, les sédiments de dragage sont mis en décharge. Les sédiments de dragage ont généralement une teneur en eau plus élevée, ce qui augmente leurs coûts de transport et d'assèchement. La présence de contaminants dans les sédiments nécessite une attention et un traitement particuliers en vue de leur réutilisation.

Les sols excavés constituent un autre déchet important généré par les activités de construction. La réutilisation des terres excavées est limitée en raison de la nature hétérogène des sols. Cependant, la réutilisation des terres excavées peut aussi contribuer à économiser les ressources naturelles et à valoriser ces déchets. Actuellement, 70 % des terres excavées sont réutilisées dont 80 % pour le remblayage des carrières et l'aménagement paysager tandis que 2 % des déblais sont utilisés dans les matériaux de construction tels que les briques de terre etc. (SOCIETE DE GRAND PARIS, 2022). Les sols excavés peuvent être utilisés dans les remblais, les couches de fondation et matériaux de construction en terre. La couche en surface de terre excavée est riche en matière organique et convient à l'agronomie et à l'aménagement paysager. La qualité du sol et son adéquation à différentes applications peuvent être améliorées par l'ajout de liants tels que le ciment, la chaux, le gypse et les géopolymères (GOMES *et al.*, 2018).

Les briques de terre sont de différents types tels que l'adobe traditionnel, le pisé et les blocs de terre comprimée. La technique de construction en terre est adoptée en fonction du type de matériau de sol disponible. Les sols plastiques (argileux) conviennent aux briques d'adobe et aux torchis qui sont fabriqués avec une teneur en humidité plus élevée. Les sols granulaires et les sols sableux conviennent aux blocs de terre comprimée et aux applications de pisé (CRATerre, 2009). Les fondations des bâtiments en terre sont faites de briques cuites, de pierres ou de béton pour empêcher l'absorption d'eau par capillarité. Les murs extérieurs des structures en terre peuvent être protégés de la pluie en augmentant la longueur du chemin de l'eau de pluie en introduisant des bouchons d'eau (RAUCH, 2015) ou avec de la terre stabilisée à la chaux pour protéger les murs de la pluie. La résistance et les performances des briques de terre stabilisées à la chaux et au ciment diminuent avec le temps tandis que la résistance des briques de terre augmente avec le

temps. Dans les briques en adobe, le type et la quantité de fibres sont également importants pour optimiser la résistance. La teneur en fibres recommandée pour les briques de terre varie de 1% à 7% en masse (HUSSAIN, 2022). À une teneur en fibres plus élevée, l'adhérence entre le sol et les fibres diminue, ce qui affecte la résistance.

L'objectif de cette recherche est d'étudier les caractéristiques des déchets de sols et sédiments afin de les valoriser en matériaux de construction durables. L'entreprise Gendrot excave 200000 m<sup>3</sup> de terres excavées inertes dans la région Bretagne. Cette recherche explore la possibilité de réutiliser les sols excavés et sédiments dans les matériaux de construction en terre afin de minimiser les coûts et d'économiser les ressources naturelles.

## **2. Materials et méthodes**

Les sédiments fluviaux proviennent du fleuve Usumacinta, dans l'État de Tabasco, au Mexique. Quant aux sols excavés, des échantillons de sol sont prélevés sur différents sites autour de la ville de Rennes. La Figure 1a montre l'excavation de la terre d'un chantier de construction et la Figure 1b son stockage après criblage. La Figure 1c montre les sédiments fluviaux.



*Figure 1. Excavation du sol (a), stockage du sol (b) et sédiments fluviaux (c).*

Les caractéristiques des sols et sédiments ont été déterminées en vue de leur réutilisation dans les briques de terre. L'analyse granulométrique a été réalisée par granulométrie laser. Les limites de liquidité et plasticité ont été déterminées conformément à la norme française (AFNOR NF EN ISO 17892-12, 2018). La matière organique des sols a été déterminée par combustion du sol à une température de 550 °C (AFNOR XP P 94-047, 2007). La densité des particules des échantillons de sol a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à hélium. Le test Proctor a été réalisé pour obtenir le taux d'humidité optimal et la densité sèche maximale du sol (AFNOR NF P 94-093, 1999). L'analyse minéralogique du sol a été effectuée avec un test DRX. Les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

Tableau 1. Propriétés physiques et chimiques des échantillons de sol et sédiment.

Type	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Wopt (%)	PL (%)	LL (%)	Wi (%)	VBS (g/100g)	$\rho_{sed}$ (g/cm <sup>3</sup> )	MO (%)	Classification GTR
Crevin	15.4	5.4	81	9.5	20.4	29.5	13	1.3	2.7	3.0	B5
Cesson	16	6	78	12.9	17.3	27.3	11	1.2	2.6	6.6	B5
Sédiments	13.4	62.5	24.1	21	52.5	27.7	21	2.7	2.5	5.7	A2

Note : Wopt = teneur optimale en eau, PL = limite de plasticité, LL = limite de liquidité, Wi = teneur en eau initiale, VBS = valeur de bleu de méthylène,  $\rho_{sed}$  = masse volumique des particules, MO = matière organique.

Le tableau 1 montre que les sols de Cesson ont une teneur en sable plus élevée. Les sols issus de Crevin ont une faible teneur en sable mais une teneur plus élevée en argile. La distribution des particules dans le sol est très importante pour son utilisation car elle entraîne plusieurs complications telles que le retrait, le gonflement, etc. La Figure 2 montre la convenance des sols pour la construction en terre selon la norme française (AFNOR XP P13-901, 2001 ; HOUBEN & GUILLAUD, 1994).

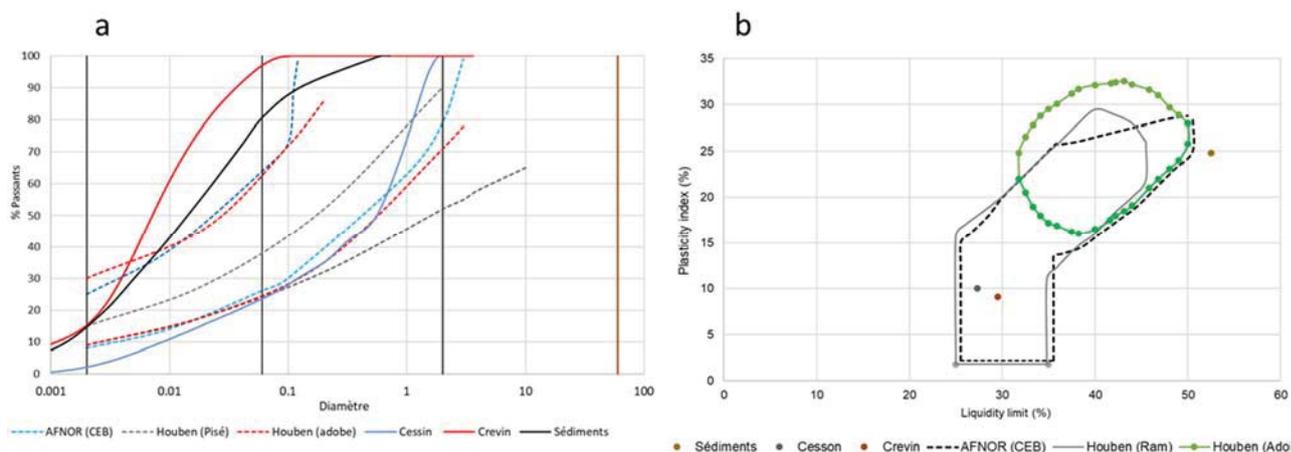


Figure 2. Convenance des sols : (a) avec la granulométrie et (b) avec les limites de consistance.

La Figure 2a montre que les sols de Cesson ont une teneur en sable plus élevée, tandis que les sols de Crevin et les sédiments fluviaux ont une teneur en argile plus élevée. Afin d'améliorer les caractéristiques du sol pour les briques, un mélange de Cesson-Crevin pourrait être une solution efficace. Les limites de liquidité et de plasticité du sol sont d'autres paramètres cruciaux pour évaluer la convenance du sol à la construction en terre. Les zones d'adéquation pour les briques de terres en fonction de leurs limites d'Atterberg sont présentées à la Figure 2b. La Figure 2b montre que les sols de Cesson et Crevin conviennent aux briques de terre. L'indice de plasticité des sols de Cesson montre que ces sols sont faiblement argileux (GTR, 2000).

Selon la norme française, les sols de Cesson et de Crevin et les sédiments sont des sols à faible teneur en matières organiques, ceci est important pour l'utilisation du sol dans les

briques de terre. Une teneur plus élevée en matière organique entraîne un retrait et une détérioration (MANIATIDIS & WALKER, 2003). La densité particulière des échantillons de sol se situe dans la fourchette typique de 1,6 à 1,7 g/cm<sup>3</sup>. La valeur du bleu de méthylène dans le tableau 1 montre que les sols de Cesson, limoneux sableux sont peu sensibles à l'eau alors que les sols de Crevin et les sédiments le sont. La classification GTR de différents échantillons de sol en fonction du pourcentage de particules fines et de la valeur du bleu de méthylène est donnée à la Figure 3.

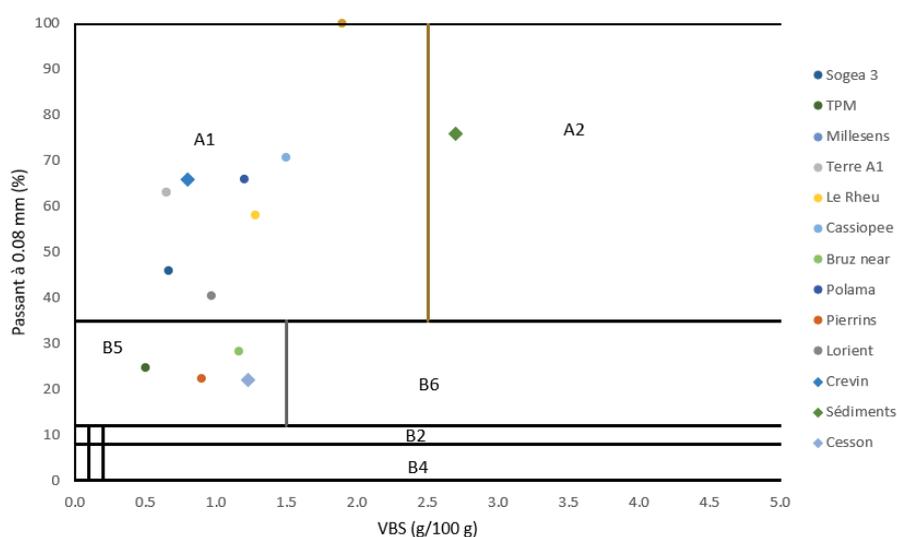


Figure 3. Classification GTR des sols et sédiments.

Les sols excavés sont situés dans les zones typiques du pisé et de la bauge. Les sédiments ont une valeur VBS plus élevée et sont extrêmement sensibles à l'eau. La minéralogie du sol permet de comprendre la cohésion des sols et la durabilité des briques de terre. Le tableau 2 donne la composition des minéraux des échantillons de sols et sédiments.

Tableau 2. Composition minéralogique des échantillons de sols et sédiments.

(%)	Argiles				Feldspath	Mica	Carbonates		
	Ilt	Chm	Mnt	Vrm		Bt	Qz		Autres
Crevin	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cesson	11.7	-	-	-	59.1	5.9	12.8	-	4
Sédiments	6.4	-	10	17.1	19.2	7	21.4	12.3	6.6

Note : Ilt = illite, KaO = Kaolinite, Ab = Albite, Bt = Biotite, Qz = Quartz, Chm = Chamosite,

La minéralogie des échantillons du tableau 2 révèle la prédominance des minéraux silicatés et argileux. La présence de carbonates est faible dans les sols et plus élevée dans les sédiments. Les minéraux argileux contenus dans les échantillons de sols contiennent de l'illite. La présence de kaolinite dans les sols est favorable pour façonner les briques

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

de terre car elle présente de petits changements volumétriques dans leur interaction avec l'eau. Les argiles montmorillonites gonflent lorsqu'elles interagissent avec l'eau (FGAIER *et al.*, 2016). Le quartz et les minéraux de feldspath sont d'autres minéraux importants dans les échantillons de sols et sédiments.

### 3. Fabrication et essais de briques

#### 3.1 Blocs de terre comprimée

Les briques de terre ont été fabriquées en tamisant les échantillons de sols et sédiments et en les mélangeant à une teneur en humidité optimale. Les échantillons de briques ont été compactés avec un compactage dynamique et séchés au four à 40°C. La teneur en humidité optimale a été utilisée comme teneur en humidité de moulage pour obtenir un mélange homogène et obtenir une densification maximale par compactage (FGAIER *et al.*, 2016). Le mélange des sols a été moulé en éprouvettes prismatiques de taille 4\*4\*16 cm<sup>3</sup> pour l'essai de résistance à la flexion (AFNOR NF EN 1015-11, 2019). Les briques ont été compactées avec une charge dynamique en appliquant l'énergie normale de Proctor pour une densification maximale (HUSSAIN, 2022). Les moules en acier utilisés pour la fabrication de briques de terre comprimée sont montrés à la Figure 4.



Figure 4. Fabrication de blocs de terre comprimée.

La densité sèche des briques de terre a été déterminée selon les normes françaises (AFNOR EN 1015-10, 2019). Le retrait linéaire a été mesuré par la variation de la longueur des briques. La densité et le retrait des briques de terre sont indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3. Masse volumique et retrait linéaire des briques de terre.

Brique	Masse volumique sèche (kg/cm <sup>3</sup> )	Retrait linéaire (%)
Crevin	1646	2.1
Cesson	1718	0.3
Sédiments	1624	2.2

La masse volumique des briques de terre varie de 1624 kg/m<sup>3</sup> à 1718 kg/m<sup>3</sup>. Les sols de Crevin ont une plus forte teneur en argile et une faible densité. La densité sèche des blocs de terre comprimée rapportée dans la littérature varie de 1500 à 2000 kg/cm<sup>3</sup> (GUETTALA *et al.*, 2016). Des essais de flexion ont été réalisés sur les échantillons de sols pour déterminer la résistance à la traction indirecte (ASTM C1557-03, 2004). La résistance à la flexion des briques testées est fournie dans le tableau 4. Le test de résistance à la compression a été effectué sur les pièces en brique après le test de résistance à la flexion en les coupant en cubes de 4\*4\*4 cm<sup>3</sup>. La résistance à la compression des briques de terre est résumée dans le tableau 4.

*Tableau 4. Caractéristiques mécaniques des briques de terre.*

<i>Briques</i>	<i>Crevin</i>	<i>Cesson</i>	<i>Sédiments</i>
<i>Rc (MPa)</i>	<i>0,9 ±0,1</i>	<i>1,7 ±0,20</i>	<i>3 ±0,2</i>
<i>Rt (MPa)</i>	<i>0,2 ±0,02</i>	<i>0,4 ±0,02</i>	<i>1.8 ±0,01</i>

*Note : Rc = Résistance en compression, Rt= Résistance en flexion.*

La résistance à la traction indirecte des briques de terre varie de 0,2 MPa à 1.8 MPa. Les sols de Crevin ont une faible résistance à la flexion tandis que les sédiments ont la résistance à la flexion la plus élevée. L'exigence de résistance à la traction pour les briques de terre dans différentes normes varie de 0,25 MPa à 1 MPa (NZS, 1998, NORMA E.080, 2017 ; AFNOR XP, P13-901, 2001). Les échantillons de sol de Cesson et des sédiments montrent une résistance à la flexion significative. La résistance à la compression des blocs de terre varie de 0,9 MPa à 3 MPa. La résistance à la compression des blocs de terre comprimée recommandée dans les normes varie entre 1 et 2 MPa (AFNOR XP P13-901, 2001, NORME E.080, 2017). Les sols de Cesson et les sédiments répondent aux critères de résistance nécessaires pour la fabrication de blocs de terre comprimée.

### 3.2 Renforcement des blocs de terre avec des fibres

Des fibres de fleurs de palmier à huile de 3 cm de longueur ont été mélangées aux sédiments pour renforcer les briques en terre. Les briques ont été fabriquées avec un ajout de 0 à 5 % en masse. La résistance à la flexion et à la compression des briques en terre est indiquée dans le tableau 5.

*Tableau 5. Résistance mécanique des briques avec les fibres naturelles.*

<i>Fibres (%)</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Rt (MPa)</i>	<i>1.8±0.1</i>	<i>1.8±0.3</i>	<i>2.6±0.2</i>	<i>3.2±0.4</i>	<i>2±0.2</i>	<i>2.6±0.1</i>
<i>Rc (MPa)</i>	<i>3±0.2</i>	<i>3.3±0.1</i>	<i>3.8±0.2</i>	<i>3.2±0.4</i>	<i>2.3±0.2</i>	<i>3±0.3</i>

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

La résistance mécanique des briques augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres. De plus, l'ajout de fibres augmente la ténacité des briques en terre. Cependant, avec une teneur très élevée en fibres, l'adhésion entre les fibres et les sédiments diminue, ce qui réduit la résistance. Les briques de terre ont une bonne résistance à la compression et à la flexion avec 2 à 3 % de fibres. Au-delà de la teneur en fibres optimale, la résistance mécanique des briques commence à diminuer.

### 3.3 Blocs de pisé

Les blocs de pisé ont été fabriqués avec l'ajout d'une teneur en humidité optimale pour les échantillons de sols. Des particules de sols d'une taille inférieure à 20 mm sont utilisées pour fabriquer des éprouvettes cylindriques de 15 cm x30 cm. Elles ont été compactées avec un compacteur pneumatique pour obtenir une densification maximale. La fabrication des échantillons est illustrée à la Figure 5.



Figure 5. Préparation du sol (a-c) et fabrication d'éprouvettes de pisé (d-g).

La résistance à la compression, le module sécant et la masse volumique des blocs de pisé sont rassemblés dans le tableau 6.

Tableau 6. Résistance à la compression ( $R_c$ ) et masse volumique des briques en pisé.

Briques	$R_c$ (MPa)	Module secant (MPa)	Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )
Cesson	1.4	2450	2050
Cesson+Crevin	1.1	2880	2014

La résistance à la compression des sols de Cesson est de 1,4 MPa alors qu'avec les cubes (voir tableau 2), sa valeur est de 1,7 MPa. Un rapport d'élançement plus élevé des échantillons explique la valeur inférieure. La résistance à la compression diminue avec le

mélange de sols issus de Cesson et de Crevin. La teneur plus élevée en argile du mélange diminue la résistance des briques.

#### 4. Conclusion

Les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques de sols excavés et de sédiments ont été déterminées dans cette étude. On observe que les sols excavés en Bretagne ont une faible teneur en matières organiques. Il est donc, plus facile de les utiliser dans la construction en terre. La composition granulométrique du sol de Crevin et des sédiments fluviaux dragués est plus argileuse et sensible à l'eau. La résistance à la flexion et à la compression des briques de terre comprimée montre que les sols de Cesson et les sédiments présentent une bonne résistance à la traction et à la compression. La présence des fibres naturelles augmente considérablement la résistance à la flexion des briques en terre. Cependant, l'augmentation de la résistance à la compression est faible. Les blocs de pisé ont été fabriqués avec un sol excavé de Cesson. La résistance à la compression des blocs de sol est de 1,4 MPa, ce qui répond à l'exigence de résistance pour la construction en terre. Le mélange de sol de Cesson et de sols argileux présente une résistance à la compression plus faible. Les sols de Cesson et les sédiments de dragage présentent une bonne résistance mécanique. Il est important d'étudier plus en détail la durabilité de ces matériaux afin d'explorer leur potentiel en tant que matériaux de construction durables.

#### Financement et remerciement

Cette étude est soutenue par VALODEB Projet, ANR, France relance projet sur la Valorisation des déblais inerte en matériaux de construction. Nous remercions l'Université Gustave Eiffel et le laboratoire M2C pour leur aide et leur coopération afin de soutenir les travaux expérimentaux.

#### 5. Références

- AFNOR NF EN ISO 17892-12 (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité.*
- AFNOR XP P 94-047 (2007). *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un matériau.*
- AFNOR NF P 94-093 (1999). *Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau.*
- AFNOR XP P 13-901 (2001). *Compressed earth blocks for walls and partitions: Definitions – Specifications – Test methods – Delivery acceptance conditions*
- AFNOR NF EN 1015-11 (2019). *Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 11 : Détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci.*

## Thème 5 – Gestion durable des zones littorales et estuariennes

- COUSSY S. (2022). *Terres excavées : Réglementation terres excavées et évolutions récentes*, Webinaire « Terres Excavées : Gestion et Valorisation », C.F. de Mécanique des Sols et de Géotechnique, [https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/webinaire\\_cfms\\_2022\\_02\\_08\\_03\\_08\\_terres\\_excavees.pdf](https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/webinaire_cfms_2022_02_08_03_08_terres_excavees.pdf)
- CRAterre. (2009). *La roue des techniques*. in HOUBEN & GUILLAUD, *Traité de construction en terre*. Marseille : Éditions Parenthèses. p.102. ISBN 978-2863641613.
- GOMES M.I., FARIA P., GONÇALVES T.D. (2018). *Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers*. *Journal of Cleaner Production*, Volume 172, pp. 2401-2414, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>
- GTR (2000). *Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique Paris, LCPC, SETRA. 2<sup>ème</sup> édition, 211 p.
- GUETTALA S. BACHAR M. AZZOUZ L. (2016). *Properties of the compressed-stabilized earth brick containing cork granules*. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, vol.7 (5), 1000353, doi: 10.4172/2157-7617.1000353
- HOUBEN H., GUILLAUD H. (1994). *Earth construction: A comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications, London, 362p., ISBN 9781853391934, 185339193X
- HUSSAIN M. (2022). *Sustainable reuse of sediments in bio-based materials - Application to fluvial sediments with incorporation of natural fibers*. PhD thesis, Université de Rouen.
- MANIATIDIS V., WALKER P. (2003). *A review of rammed earth construction*, DTi Partners in Innovation Project, Developing Rammed Earth for UK Housing, 118p. <https://people.bath.ac.uk/abspw/rammedearth/review.pdf>
- RAUCH M. (2015). *Refined earth construction & design with rammed earth*. ISBN-10: 3955532739
- SOCIETE DE GRAND PARIS (2022). *Étape de gestion de déblais*. Journée Terres, Aimer et valoriser nos terres. <https://www.grandparisexpress.fr/>