

Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme

**La construction en terre
Perspectives de développement**

présenté par Ahmed Jelidi
Enseignant à l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU)
Equipe de Recherche sur l'Ingénierie de la Construction (ERIC)

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

1

Sommaire

- Les axes de recherche de l'ERIC (ENAU)
- La recherche sur la construction en terre
- Les expériences de construction en terre en Tunisie
- Le concept de la construction en terre
- Le positionnement éco-constructif de la construction en terre
- Les perspectives de développement

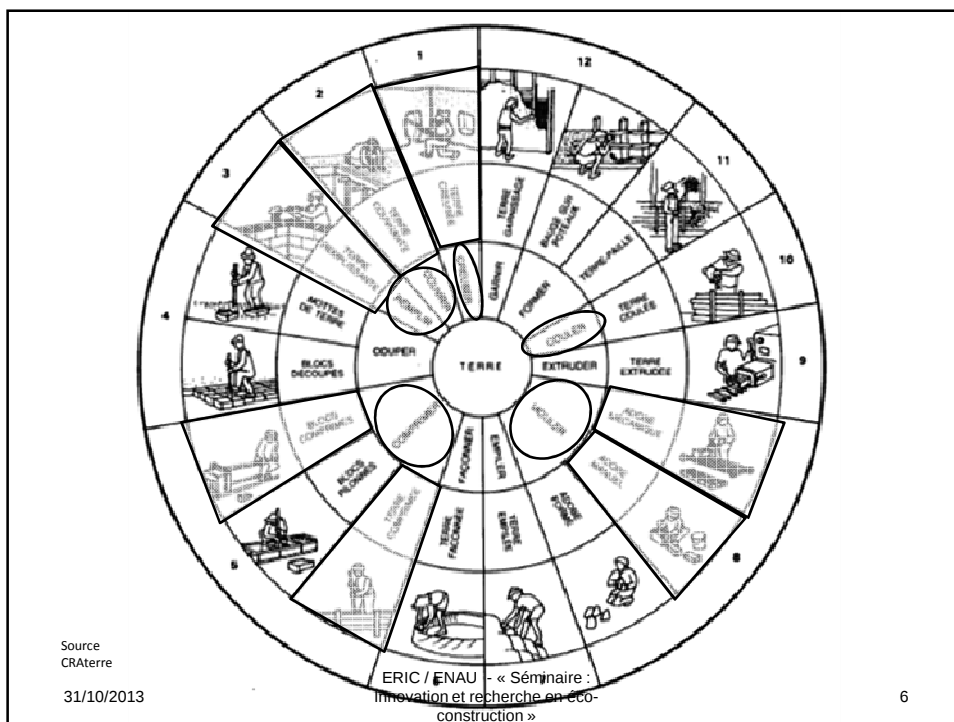
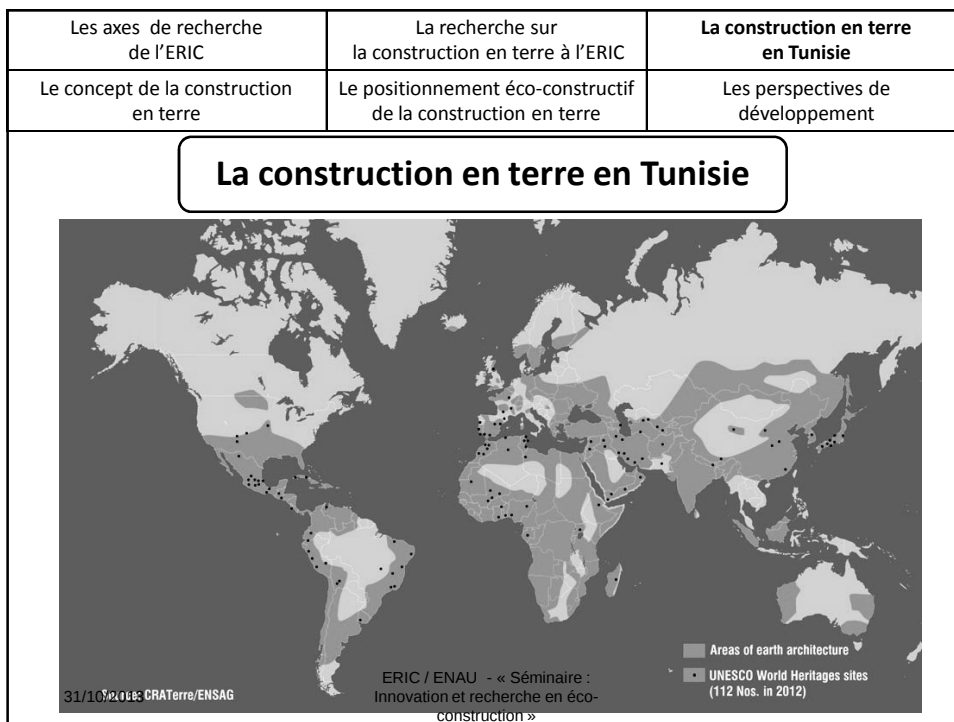
31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

2

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement
Les axes de recherche de l'ERIC (ENAU) • L'élaboration d'adjuvants pour les bétons • L'étude et la formulation de bétons légers • L'étude et l'optimisations de produits en plâtre • L'élaboration d'éléments de construction en terre crue • L'étude et la modélisation de matériaux composites bio-ressourcés renforcés par des fibres végétales • L'étude et la modélisation des transferts hygrothermiques des matériaux bio-ressourcés • L'étude des systèmes passifs de climatisation 31/10/2013 ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco- construction » 3		

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement
La recherche sur la construction en terre à l'ERIC (ENAU) en coopération avec le LGC (ENIT) et avec le LETTM (FST et FSB) • Elaboration d'un matériau en terre crue renforcée par des fibres végétales • Recherche sur les blocs de terre comprimée et stabilisée : • Modélisation des caractéristiques microstructurales, mécaniques et thermiques • Optimisation des performances thermiques et mécaniques • Modélisation du transfert de chaleur et d'humidité • Elaboration d'enduits minéraux pour la protection de surface 31/10/2013 ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco- construction » 4		



Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

La construction en terre en Tunisie

- **Anciennes constructions :**
 - **Habitations en terre creusé (les troglodytes de Matmata)**
 - **Habitations en pisé à Ksour Tataouine**
 - **Mosquées en adobe et en pisé à Kairouan, Tunis et Sousse**
 - **Habitations en terre couvrante ou en terre remplissante**
 - **Bâtiments agricoles en adobe et en pisé terre / paille**

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

7

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

La construction en terre en Tunisie

- **Constructions et études contemporaines :**
 - **Des recherches sur l'architecture en terre - ITTAUT 1977/85**
 - **Des recherches sur les blocs de terre stabilisée à la «Margine» ENIT – 1980 / 86**
 - **Autoconstruction à Testour en blocs de terre stabilisée vibro-compactée - MEH - EASE – 1985**
 - **Des expériences individuelles d'architectes et de promoteurs**
 - **Des blocs de terre industrialisés - SOIB - depuis 2008**
 - **Un projet d'éco-construction à Sidi Amor (Bordj Touil – Ariana) – GDA – ENAU – 2010 à 2013**

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

8

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Le concept de la construction en terre

- **Des repères :**
 - Hassan Fathy : Le social et l'économie
 - CraTerre : Hugo Houben et Hubert Guillaud : Le fondamental et les techniques
 - Satprem Maïni : l'art et la perfection
- **Un compromis entre 4 E:**
 - Economie
 - Ecologie
 - Esthétisme
 - Efficacité

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »
9

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Le concept de la construction en terre

- La construction en terre n'est pas une fin en soi
- La construction en terre ne doit pas être un effet de mode
- Il faut qu'elle émane d'un besoin réel et vital appuyé par :

Une nouvelle perspective de la construction

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »
10

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Le concept de la construction en terre

- **Peut-on construire tout avec n'importe quelle terre ? :**
- **« Faut-il changer de terre si elle ne convient pas à la technique ou améliorer la terre disponible pour qu'elle convienne ? »**
- **« Faut-il changer la technique si elle ne convient pas à la terre ou améliorer la technique pour qu'elle convienne ? »**

CRA Terre
31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

11

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

- **Toute terre qui offre une bonne cohésion peut être employée en construction moyennant l'application :**
 - Des règles techniques
 - Des critères de convenance
 - Des abaques de références
 - Beaucoup d'essais et de corrections

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

12

ÉTAT HYDRIQUE DE LA TERRE					TEXTURE	
CONGLOMÉRAT		SÈCHE		HUMIDE		
COMPACT	FRIABLE	CONCRÉTION		TERRE PEU HUMIDE		TERRE HUMIDE
		SOLIDE	FRIABLE			
	1	3	2	4	5	ORGANIQUE
						GRAVELEUX
						SABLEUX
						LIMONEUX
						ARGILEUX

1 - TERRE CREUSÉE
l'habitation est creusée dans l'épaisseur de l'écorce terrestre : habitat troglodytique.

2 - TERRE RECOUVRANTE
la terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.

3 - TERRE REMPLISSANTE
la terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.

4 - TERRE DÉCOUPÉE
des blocs de terre sont directement découpés dans la masse du sol.

5 - TERRE COMPRIMÉE
des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.

6 - TERRE FAÇONNÉE
la terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.

Source
CRATERre

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

13

TEXTURE	ÉTAT HYDRIQUE DE LA TERRE					
	PLASTIQUE		MOU		LIQUIDE	
	PÂTE FERME	PÂTE MI-FERME	PÂTE MI-MOLLE	PÂTE MOLLE	BOUE	BARBOTINE
ORGANIQUE						
GRAVELEUX			7		10	
SABLEUX		9	8			
LIMONEUX	6			12		11
ARGILEUX						

7 - TERRE EMPILÉE
des boules de terre sont empilées pour reconstruire des murs épais.

8 - TERRE MOULÉE
la terre est moulée à la main ou à l'aide de moules (formes diverses).

9 - TERRE EXTRUDÉE
la terre est extrudée par une puissante machine.

10 - TERRE COULÉE
la terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.

11 - TERRE-PAILLE
une barbotine argileuse se des fibres et constitue un matériau léger.

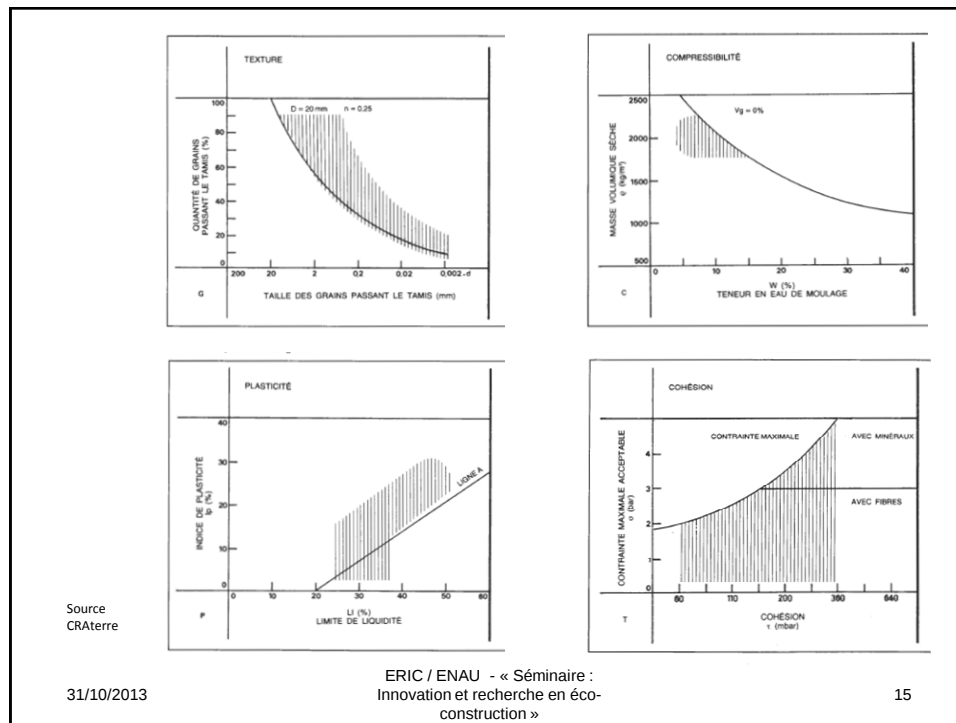
12 - TERRE GARNISSAGE
la terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support.

Source
CRATERre

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
Innovation et recherche en éco-
construction »

14



Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Le positionnement éco-constructif de la construction en terre

- **Economie d'énergie – Efficacité énergétique:**
Comparaison avec des matériaux de construction similaires (briques, pierres, blocs en béton, béton coulé)
- **Conductivité thermique :** Passage de la chaleur
- **Résistance thermique :** Résistance à un flux de chaleur
- **Capacité thermique :** stockage de la chaleur
- **Admittivité thermique :** amortissement du flux de chaleur
- **Effusivité thermique :** résistance à l'échauffement
- **Diffusivité thermique :** vitesse de refroidissement
- **Déphasage thermique :** Durée échauffement / refroidissement
- **Résistance à la diffusion de la vapeur**

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

31/10/2013 16

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC		La construction en terre en Tunisie		
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre		Les perspectives de développement		
Efficacité énergétique					
Matériau	Bloc de terre crue comprimée	Bloc de béton cellulaire	Bloc creux en béton	Béton	Brique creuse
Densité	1,8	0,5	1	2,3	1,2
λ [W / m.°K]	1,2	0,25	1,4	1,75	1
R th (20 cm) [m².°K/W]	0,16	0,8	0,14	0,08	0,2
C th [kJ/m².°K]	80	32	44	100	50
Déph. th. [h]	18	14	12	12	18
R Dif. Vap. [m]	8	3,5	13,4	15	5,1

Valeurs moyennes données à titre comparatif

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

17

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Le positionnement éco-constructif de la construction en terre

- **Analyse du cycle de vie :**
 Comparaison avec des matériaux de construction similaires (briques, pierres, blocs en béton, béton coulé)

- **Analyse à toutes les étapes** (*Extraction de la terre - Traitement - Fabrication - Conditionnement - Transport - Mise en œuvre – Vie en œuvre – Fin de vie*) de différentes caractéristiques énergétiques et physico-chimiques dont notamment :
 - **Energie grise dépensée**
 - **Gaz à effet de serre GES émis**
 - **COV, Formaldéhyde, lixiviations et rayonnements émis et diffusés**

31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire :
 innovation et recherche en éco-
 construction »

18

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Energie grise et GES

Matériau	Bloc de terre crue comprimée	Bloc de béton cellulaire	Bloc creux en béton	Béton	Brique creuse
Densité bloc MV réelle	1,9	0,5	1	2,3	1,2
Energie Grise [kWh/m³]	100	400	450	900	900
CO ₂ kgeqCO ₂ /m²	0,2	0,6	0,3	0,5	1,4

Valeurs moyennes données à titre comparatif
31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

19

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Emissions de radons dans l'air

Matériau Bq/kg	Bloc de terre compressée	Bloc de béton cellulaire	Bloc creux en béton	Béton ciment	Brique creuse	Corps d'un être humain
Radium 226Ra	20	20	25	40	60	30
Thorium 232Th	20	25	20	30	85	30
Potassium 40K	300	200	300	400	850	65

Valeurs moyennes données à titre comparatif
31/10/2013

ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »

20

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement
Le positionnement éco-constructif de la construction en terre L'Analyse du cycle de vie et la Comparaison avec des matériaux de construction similaires : • Très bon bilan environnemental : peu ou pas de transformation ni de transport. • Durabilité élevée et recyclage aisé. • Matériau sain : Contribue à la régulation de l'humidité et de la température de l'habitat.		
31/10/2013	ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »	21

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement
Les perspectives de développement • <u>Maitrise technique globale de l'acte de bâtir en terre crue :</u> • Matériaux • Conception architecturale • Mise en œuvre • Vie en œuvre		
31/10/2013	ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »	22

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Les perspectives de développement

- **Alternative crédible :**
 - Des textes normatifs : PV d'essai – Avis technique – DTU
 - Des notes de calcul approuvées par les Bureaux de contrôle : stabilité - sécurité - parasismique
 - Des règles professionnelles
 - Une crédibilité : Garantie décennale et faibles impacts environnementaux prouvés

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »
23

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Les normes et les codes sur la construction en terre

- ASTM E 2392-05: Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems (adobe, pisé, bauge, terre coulée)
- Standard NZS 4297-4299 : 1988 – Earth Building Set (adobe, BTC, Terre coulée, pisé)
- DLV, 1999 – Lehmnbau Regeln (premier code UE)
- Pérou, Norma E.080:2000 (adobe)
- Standard SAZ 724: 2001 - Code of Practice for Rammed Earth (pisé)
- Walker & Standards Australia, 2001 – The Australian earth building handbook (adobe, BTC, pisé, terre coulée, bauge)
- USA, Novo Mexico, 2003, Earth Buildings Materials Code (adobe, BTC, pisé)

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »
24

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

Les perspectives de développement

- **Stratégie de construction :**
 - L'adoption du concept par le secteur public – Législateur
 - L'initiative et le développement par le secteur privé
 - Projets pilotes : village d'éco-tourisme vitrine de l'éco-construction

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »
25

Les axes de recherche de l'ERIC	La recherche sur la construction en terre à l'ERIC	La construction en terre en Tunisie
Le concept de la construction en terre	Le positionnement éco-constructif de la construction en terre	Les perspectives de développement

« ... la pratique de la construction en terre pouvait être professionnelle et scientifique ... »
disait Jacques Chaudoir à Hugo Houben (CRATerre)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Ahmed Jelidi
Enseignant à l'Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme (ENAU)
Equipe de Recherche sur l'Ingénierie de la Construction (ERIC)
E-mail : ahmed.jelidi@enau.rnu.tn

31/10/2013
ERIC / ENAU - « Séminaire : Innovation et recherche en éco-construction »
26