



CENTRE DES ETUDES DOCTORALES  
Sciences et techniques de l'ingénieur

# THESE

Présentée par :

**Atar DIALMY**

Pour l'obtention du grade de

**Doctorat en Génie civil**

## **Contribution à l'amélioration des performances mécaniques du pisé : Formulation, Compactage et stabilisation chimique**

**Soutenue publiquement le 08 mars 2024**  
à l'Ecole Hassania des Travaux Publics

Devant le jury composé de :

### **Jury**

Khalid EL HARROUNI	PES, ENA, Rabat	Président
Malika AZMI	PES, EHTP, Casablanca	Rapporteur
Mokhtar EL HILALI	PES, Université Ibn Zohr, Agadir	Rapporteur
Souad EL MOUDNI EL ALAMI	PH, Université Mohamed 1 <sup>er</sup> , Oujda	Rapporteur
Anas EL MALIKI	PES, ENSEM, Casablanca	Examineur
Abdelkarim CHOUAF	PES, ENSEM, Casablanca	Examineur
Mustapha RGUIG	PES, EHTP, Casablanca	Directeur de thèse

# Résumé

La terre est, depuis des milliers d'années, un matériau de construction durable et résistant. Sa disponibilité et sa diversité ont permis de développer plusieurs techniques de construction à travers le monde : Le pisé, l'adobe, la bauge, le torchis ou encore les briques de terre comprimée. Ces techniques ont donné naissance à des architectures locales exceptionnelles reflétant le savoir-faire de la population, sa culture et son organisation sociale. Au Maroc, plusieurs édifices en terre, bâtis dans le passé lointain tiennent toujours faisant face à diverses sollicitations et à l'agressivité de l'environnement. La Kasbah d'Ait Ben Haddou à Ouarzazate, les remparts des anciennes Médinas et Koutoubia à Marrakech ne sont que quelques exemples de la richesse du patrimoine marocain et des performances remarquables des constructions en terre.

Face à la problématique des émissions CO<sub>2</sub> liées à la production et à la mise en œuvre de matériaux de construction conventionnels tel que le béton, les intervenants dans l'acte de bâtir se trouvent dans l'obligation de chercher une solution écologique et économique permettant de bâtir en toute sécurité à un prix raisonnable. Ainsi, le matériau terre a connu ces derniers temps un regain d'intérêt croissant que ce soit de la part des ingénieurs et des architectes ou de la part de la communauté scientifique.

Cependant, le matériau terre ainsi que les techniques de construction en terre restent peu connues et non maîtrisées à cause de la perte du savoir-faire ancestral. La formulation, la mise en œuvre et le contrôle de la qualité des travaux sont à développer et à justifier à travers des recherches scientifiques et des essais expérimentaux.

Ce travail se penche sur trois axes principaux visant à améliorer les performances mécaniques du pisé : La proposition d'une méthode de formulation scientifique, l'optimisation du procédé de compactage et l'évaluation de solutions écologiques de stabilisation chimique.

A la base du modèle d'empilement compressible des matériaux granulaires, une démarche pratique et scientifique est élaborée et vérifiée au laboratoire permettant au constructeur de définir la formulation optimale ou la correction granulaire précise pour une compacité maximale. La mise en œuvre du matériau est évaluée en considérant deux modes de compactage dynamique et statique afin de contrôler et d'optimiser l'énergie de compactage sur site. A la base de la comparaison entre ces deux modes, un modèle de macro-blocs de terre comprimée pouvant remplacer le pisé traditionnel est proposé comme solution optimale assurant une meilleure performance mécanique, une énergie de compactage optimisée et un temps d'exécution réduit. La stabilisation chimique de ces blocs a été par la suite discutée en étudiant trois variantes de stabilisants chimiques : Chaux, Laitiers d'aciérie et le géopolymère à base de métakaolin. Les résultats montrent la potentialité de la valorisation des laitiers d'aciérie comme étant un déchet industriel marocain peu recyclé.

La combinaison de l'ensemble de ces recommandations donne de très bonnes résistances à la compression, des densités sèches importantes, une meilleure ductilité et une résistance à l'eau considérable. En guise de synthèse, les résultats des essais mécaniques, notamment l'essai de compression simple, ont été discutés à travers l'analyse des paramètres influant l'allure de la courbe contraintes-déformations et par conséquent la loi de comportement de la terre compactée. Cette synthèse a été complétée par une modélisation numérique en éléments finis des essais de compression pour évaluer les lois de comportements décrivant le mieux le matériau étudié.

## **Mots clés :**

Matériau terre, Construction en terre, pisé, Brique de terre comprimée, formulation, compactage, énergie, stabilisation, géopolymère, comportement mécanique, ductilité, loi de comportement.

# Abstract

For thousands of years, earth has been a durable and resistant building material. Many techniques exist all over the world depending on the material's nature and availability: Rammed earth, adobe, cob and compressed earth bricks. Using these techniques, populations had developed exceptional local architectures that reflect technical and ancestral know-how, culture and social organization of each population and region. In Morocco, many earthen historical buildings are proof of durability and good mechanical performances like Ait Ben Haddou kasbah in Ouarzazate, the ramparts of the ancient Medinas and Koutoubia in Marrakech. These constructions represent few examples of the Moroccan heritage and the remarkable performance of earthen constructions.

In comparison with the conventional construction materials such as concrete, earth has shown their relevance as low energy materials during the construction life cycle: Extraction, transportation, construction, exploitation, and demolition. On the other side, conventional materials represent serious and continuous danger on the environment since many decades related to the CO<sub>2</sub> emissions. Hence, engineers, constructors, architects, and researchers are expressing a continuous interest on sustainable solutions like earth.

However, earth construction techniques require special qualifications and experience and need to be studied and scientifically justified to optimise the physical and mechanical performances as well as the construction process.

This work aims to develop three research axes: Proposing a scientific mix design method, optimizing the compaction process and energy, and evaluating eco-chemical stabilization solutions.

Based on the model of compressible stacking of granular materials, a practical and scientific approach is developed and tested in laboratory, allowing to define the optimal granular mix design or a precise granular correction ensuring an optimal compactness. The compaction process is also studied by comparing two compaction processes: Dynamic and static. The main objective is to reduce and control the on-site compaction energy. A model of multi-layers pressed earth blocks is proposed to replace traditional rammed earth for a better mechanical performance, an optimized compaction energy and a reduced execution time. The chemical stabilization of these blocks was then discussed by studying three solutions of chemical stabilizers: lime, steel slags and metakaolin-based geopolymer. The results show the potential of using steel slags in earth stabilization which allows to recycle a Moroccan industrial waste. A considerable enhancement of the unconfined compressive strength, dry density, ductility, and water sensibility is observed just by following the proposed approach and the technical recommendations.

The experimental results, especially the stress-strain curves, are analysed in the last chapter to determine the parameters that affect the stress-strain curve shape. Numerical modelling of the compressive strength tests have been conducted to evaluate the model that describes the most the specimens behaviour. The broader aim of this part is to initiate a reflexion about establishing behaviour law of compacted earth material.

## **Keywords:**

Earth material, earth construction, rammed earth, pressed earth, mix design, compaction, energy, chemical stabilization