



Caractérisation des matériaux du sol dans la plaine du Haouz (Maroc), pour la construction en terre crue

Soil material characterization in the plain of Haouz (Morocco), to build earthen

M. Ibnoussina¹, A. Dimad¹, A. El Amrani², O. Witam¹, M. Nocairi¹,
D. Sadki³, A. Bouyaj⁴

¹Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, laboratoire de Dynamique des Bassins et Géomatique, Marrakech, Maroc. Email : witam@uca.ma / ibnoussina@uca.ma / nocairi@uca.ma.

²Ecole Nationale d'Architecture, Rabat, Maroc. Email : atayyibi@gmail.com.

³Université Moulay ismaïl, Meknès, Maroc. Email : driss_sadki@yahoo.fr

⁴Laboratoire public d'études et d'expertises, Marrakech, Maroc. Email : bouyaj@lpee.ma

*Corresponding Author: M. Ibnoussina, Tél: (+212.6.61.53.33.72), E-mail : mibnoussina@gmail.com

Abstract

Earth is a material widely available in our immediate environment. It's the basic raw material used in the vernacular housing in Morocco, the pre-Saharan regions, and in the majority of historic centers. The plain soil's of the Haouz of Marrakesh is renowned for its abundance in materials suitable to construction of earth habitats. The use of earth material in construction in Morocco has become topical, as, the strong demand for low-cost housing. The fundamental reason of this demand is probably the very high cost of conventional building materials. For the Moroccan government, the construction of earth habitat is an economical alternative which respects the environment. The recent approval of the seismic resolution for the earth construction (RPCT2011) by the Moroccan Government is an action for the recovery of this natural resource and maintenance of traditional knowledge attached to earth architecture. This is a historic step forward for the promotion of sustainable habitat. The valuation of this natural resource is dependent on the identification of suitable borrow sites, the study of its physical and chemical properties and its mechanical characteristics and appropriate construction techniques. It is in this perspective that our laboratory is active in the operational research on sites around the city of Marrakesh, potentially rich earthen resources, tailored to the promotion of the construction.

Keywords: Materials, Earth, Architecture, Know-how, Characterization.

1. Introduction

Depuis des millénaires, l'Homme s'est servi de la terre crue pour construire son logement, et assurer ses besoins en équipements de base et en infrastructures. Ce matériau qui s'adapte parfaitement aux différents contextes et conjonctures, a l'avantage d'être localement disponible. Il a été utilisé par nos ancêtres et a permis de constituer aujourd'hui un patrimoine remarquable, voire une culture constructive, notamment, à travers des ensembles historiques de grandes valeurs, reconnus aux échelles nationale et internationale. La plupart de ces ouvrages, qui se situent dans la plaine de Marrakech, sont construits en terre crue, adoptant le pisé et l'adobe comme principales techniques de construction.

Aujourd'hui, la place du matériau terre dans la construction contemporaine est au cœur d'enjeux considérables. Des projets architecturaux de plus en plus significatifs et remarquables s'implantent, surtout dans le périmètre péri urbain de la ville de Marrakech. C'est un matériau prometteur dans le secteur du bâtiment, principalement dans un contexte du développement durable.

Dans la plaine du Haouz de Marrakech, une étude du sol et du sous sol a été réalisée par notre équipe de recherche. Des échantillons extraits d'une cinquantaine de sites (tranchées d'ouvrages en chantiers, canaux d'assainissement, khattara [ponceaux pour le transport de l'eau]) ont été analysés. Cette étude permet d'apporter

des réponses à la composition physico-chimique du matériau, sa disponibilité et ses éventuels sites d'emprunt. Les analyses effectuées permettent de connaître la technique de mise en œuvre (pisé, adobes, blocs de terre comprimée) la plus appropriée.

La présente étude contribue à la promotion et donc à la valorisation du matériau terre comme matériau de construction alternatif. Elle incitera au développement de la filière terre dans les projets de construction et servira de base pour d'éventuelles restaurations du patrimoine architecturale du Pays.

2. Contexte de l'étude

2.1. Cadre géographique et géologique

Le secteur étudié, connu sous le nom de Haouz de Marrakech, est situé entre 7°2'W et 9°1'W, 31°5'N et 32°N. Il s'agit d'une vaste dépression fermée, large de 40 km et étirée d'Est en Ouest sur plus de 150 km. Elle est limitée au Nord par les Chaînes des Jebilet, dont les collines ne dépassent guère 1000 m d'altitude, et au Sud par le versant Nord du Haut Atlas qui culmine à 4165 m (Jbel Toubkal) (Figure 1).

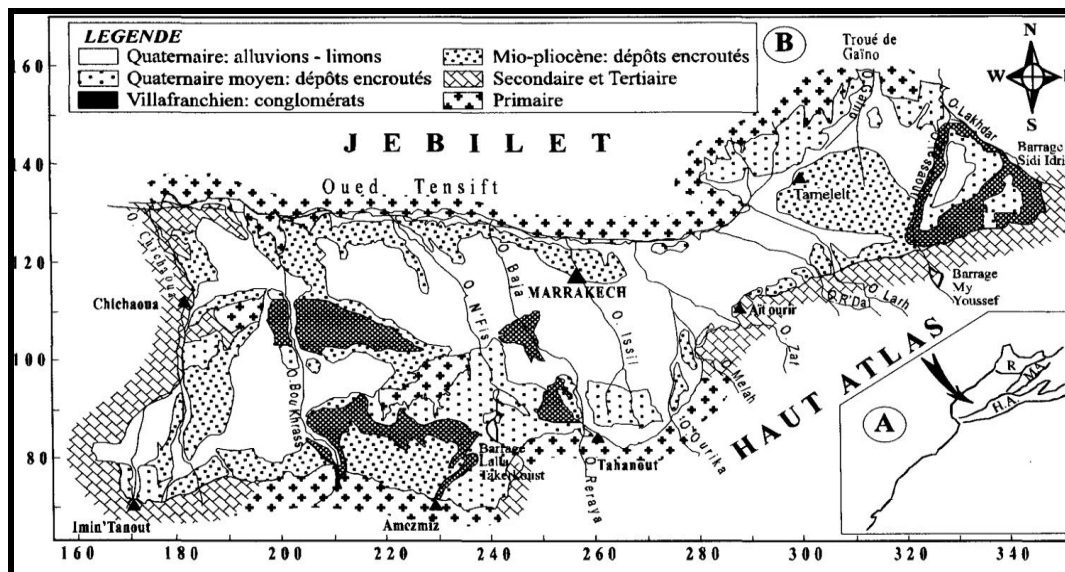


Figure 1. Situation géographique de la plaine du Haouz (Direction de l'Hydraulique, 1980)

La plaine du Haouz est traversée du Sud vers le Nord par un réseau d'oueds qui drainent les reliefs du Haut Atlas et rejoignent l'oued Tensift au Nord; principal collecteur des eaux superficielles dont l'écoulement se fait de l'Est vers l'Ouest avant de rejoindre l'Océan Atlantique (Sinan, 2000).

Il s'agit d'une cuvette de sédimentation tectonique dans laquelle se sont accumulées durant le Tertiaire et au Quaternaire d'importantes formations détritiques, issues du démantèlement de la chaîne du Haut Atlas, mise en place lors de l'orogénèse atlasique (Ferrandini et Petit, 1982). Ces formations reposent en discordance sur le socle hercynien qui affleure à la faveur des massifs paléozoïques des Jebilet et des Guemassa.

Sa morphologie est due non seulement aux événements tectoniques mais aussi à la nature lithologique hétérogène de ses faciès. En effet, la surrection du Haut Atlas sous l'effet de l'orogénèse tertiaire s'est accompagnée d'une légère subsidence de cette plaine, où se sont accumulées les formations détritiques continentales, depuis l'Eocène jusqu'à l'actuel (Ambroggi et Neltner, 1952; Huvelin, 1973; Ferrandini et Le Marrec, 1982; Dutour et Ferrandini, 1985). Du point de vue stratigraphique, toute la série géologique, du Primaire au Quaternaire est largement représentée à l'affleurement sur les bordures de la plaine où a été observée dans les sondages profonds réalisés par l'agence du bassin hydraulique du Tensift (ABHT, 1980) dans le cadre de la recherche des eaux souterraines (Ambroggi et Thuile, 1952; Moukhchane, 1983).

Une étude cartographique et pédologique réalisée dans la plaine du Haouz, révèle l'existence de quatre types de sols, présentant des textures limono-argileuse, limoneuse ou limono-sableuse (Bryssine, 1951). Les termes carbonatés des environs de Marrakech correspondent à des sédiments quaternaires lacustres et palustres.

Sur le terrain, l'identification des matériaux du sol et du sous sol de la plaine montre qu'ils sont très diversifiés et que leur répartition est dictée par la présence de deux tendances lithologiques différentes (Ibnuoussina et al., 2004):

- ❖ Une tendance Nord et Nord Est, avec prédominance de matériaux limono calcaireux terrigènes à fragments de schistes et nodules de calcaires attribués aux dépôts encroûtés quaternaires;
- ❖ Une tendance Sud et Sud Ouest, avec surtout prédominance des matériaux argilo-conglomératiques (alluvions sableuses, limons alluvionnaires ou limons rouges superficiels) d'âge post Quaternaire.

2.2. Problématique

L'urbanisation et le développement des projets immobiliers impliquent l'excavation de volumes considérables de sol et engendrent des pertes économiques colossales. Ces matériaux sont évacués en décharge et ne sont malheureusement pas valorisés malgré qu'ils soient potentiellement réutilisables économiquement.

La demande de plus en plus accentuée en logements, exigeants une meilleure qualité d'habitabilité et de confort, induit des coûts supplémentaires en énergie, dans un pays qui importe l'essentiel de son énergie. De même, le coût des matériaux conventionnels dits modernes, auquel s'ajoute celui de leur transport, grèvent la balance budgétaire, sans oublier les déchets et la pollution qu'ils engendrent.

Ces contraintes économiques associées au souci de préservation de l'environnement, amènent à réfléchir à l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction. Cette ressource naturelle, quasi abondante au Maroc, offre des caractéristiques qui s'intègrent parfaitement dans son environnement.

Dans le souci de valoriser ce matériau noble par son utilisation dans la construction au niveau de la plaine du Haouz de Marrakech, nous nous proposons de:

- identifier et caractériser cette matière première dans ses conditions naturelles de conservation;
- identifier et localiser ses sites d'emprunt;
- promouvoir et valoriser ce matériau par la recherche scientifique.

Par cette étude, nous souhaitons encourager le développement d'une typologie d'habitat économique et durable, à coût moindre et confortable pour une catégorie de population insolvable. Les résultats obtenus seront ultérieurement intégrés dans un projet d'établissement d'une carte du sol et du sous-sol de la plaine du Haouz de Marrakech.

2.3. Méthodes et techniques

Les différents échantillons de terre étudiés dans cet article sont désignés par les noms des localités d'où ils ont été prélevés. L'examen superficiel montre qu'ils diffèrent par la couleur, les dimensions des granulats, leur nature et leur état.

L'identification physico-chimique de ces échantillons s'avère nécessaire. En effet, tout matériau terre, devant être utilisé pour la construction doit en général être constitué de différents éléments avec une granularité optimale. Ces éléments sont : les graviers, les sables, les limons et les argiles.

Analyses chimiques des carbonates de chaux (CaCO₃)

La méthode d'analyse utilisée pour la détermination du pourcentage du carbonate de chaux est la calcimétrie Bernard (Vatan, 1967). Elle consiste à introduire dans un erlenmeyer, une fraction de 0,50 g à 1 g de l'échantillon broyé et un petit tube à essai contenant de l'acide chlorhydrique à 30%. L'erlenmeyer est ensuite bouché par un bouchon relié à un tube gradué, lui-même relié à une ampoule par un tuyau en caoutchouc. Le liquide du tube doit être amené au même niveau que celui de l'ampoule, qui correspond au niveau initial (D₁). L'acide chlorhydrique est ensuite renversé sur l'échantillon, cette attaque de l'échantillon se manifeste par un dégagement de CO₂. Pour activer la réaction, on agite l'erlenmeyer de temps en temps tout en gardant le liquide du tube au même niveau que celui de l'ampoule. A l'arrêt du dégagement de CO₂, le liquide s'immobilise à un niveau D₂ qui correspond à la fin de la réaction.

Le volume de CO₂ dégagé est donné par la formule $V = D_2 - D_1$, qui doit être multipliée par un coefficient de correction pour avoir le pourcentage du carbonate de chaux.

Analyses granulométriques

L'essai granulométrique a pour but de déterminer la répartition granulaire (Ngoc Lan et Barbaras, 1982; Rivière, 1977) et de comparer les différents échantillons analysés. Les résultats de l'essai permettent de tracer la courbe granulométrique sur un diagramme comportant en abscisse les dimensions des tamis, soit (20 mm, 2mm, 0,2 mm,

80 µm, 20 µm, 2 µm), et en ordonnée les pourcentages des tamisats cumulés. Cet essai est effectué en deux phases:

1. Analyses granulométriques par tamisage (norme NF P 94-056)

La granulométrie par tamisage est effectuée sur la fraction granulaire dont le diamètre (\emptyset) est supérieur à 80µm. Les échantillons étudiés sont tamisés sous courant d'eau, après immersion dans l'eau pendant 24h. Les refus sont séchés à l'étuve jusqu'à masse constante. Ensuite, on procède au pesage du refus de chaque tamis.

2. Analyses granulométriques par sédimentométrie (norme NF P 94-057)

L'essai granulométrique par sédimentométrie complète le premier et permet de quantifier les fractions de particules dont le diamètre est inférieur à 80 µm et pour lesquelles le tamisage devient impossible. Le principe de la sédimentation utilise la différence de chute des particules, dans une éprouvette de 2 litres d'eau distillée. Il consiste à laisser les particules en suspension se déposer au fond de l'éprouvette, selon leurs diamètres. A l'aide d'un densimètre on mesure, régulièrement dans le temps et à hauteur donnée, la densité. Ces mesures permettent de calculer les proportions des particules de chaque diamètre, qui sont consignées dans un tableau et exploitées en courbes granulométriques.

Essais de détermination de la teneur en eau naturelle (norme NF P 94-050)

La teneur en eau (pondérale) w est la caractéristique la plus facile à déterminer, elle se détermine par deux pesées. La première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m_h de l'échantillon humide, la deuxième pesée est réalisée après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Lors du passage à l'étuve, l'eau libre et l'eau capillaire de l'échantillon s'évaporent, ce qui donne une masse sèche m_s . La teneur en eau W est donnée par la formule: $W = (m_h - m_s)/m_s * 100$.

Essai de détermination du poids (spécifique sec) volumique γ_d (norme NF P 94-053)

Pour évaluer le poids spécifique sec des échantillons, nous avons utilisé la méthode par immersion de l'échantillon dans l'eau. Bien entendu, il faut d'abord déterminer la masse m et le volume total V de l'échantillon.

- ❖ Un échantillon de forme simple et de masse comprise entre 100 g et 500 g est pesé (m) puis recouvert d'une couche de paraffine,
- ❖ Une deuxième pesée (m_p) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume puisque sa densité est connue ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,88 \text{ g/cm}^3$),
- ❖ Une troisième pesée hydrostatique de l'échantillon recouvert de paraffine (m'_p) permet de calculer son volume recouvert de paraffine. Le volume de la paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon: $V = [V_{\text{sol+paraffine}} - V_{\text{paraffine}}] = [m_p - m'_p / \rho_w] - [m_p - m] / \rho_p$

Essais de plasticité (norme NF P 94-051)

Cet essai permet de prévoir le comportement des matériaux, il est réalisé sur la fraction inférieure à 400 µm et consiste à faire varier la teneur en eau du matériau afin d'évaluer sa consistance (Costet et Sanglerat, 1981). L'essai s'effectue en deux phases (Norme française NF P 94-051): une première phase dans laquelle on recherche la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à des chocs répétés. Dans une deuxième phase on recherche la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée est confectionné manuellement, se fissure.

Les limites d'Atterberg correspondent aux seuils de passage de l'état solide à l'état plastique (limite de plasticité L_p) et de l'état plastique à l'état liquide (limite de liquidité L). L'intervalle entre ces deux limites définit l'étendue du domaine de la plasticité (indice de plasticité I_p).

Essai au Bleu de Méthylène (norme NF P 94-068)

Le but de cet essai est de caractériser la surface spécifique de la fraction argileuse d'un matériau et donc d'estimer ses activités physico-chimiques d'échanges inter faciaux. Le résultat de l'essai dépend directement de la nature et de la quantité de cette fraction dans le matériau, il nous renseigne sur la sensibilité de l'argile à l'eau et par conséquent sur ses propriétés de retrait gonflement.

L'essai s'effectue sur la fraction de particules de diamètre inférieur à 50 μm . Il consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par un matériau mis en suspension dans l'eau et sous agitation permanente.

La méthode consiste en une injection, dans le bain aqueux contenant la prise d'essai, des doses élémentaires de 5 cm^3 d'une solution de bleu de méthylène. L'adsorption du bleu est contrôlée 1 minute après chaque ajout, en effectuant une tâche à l'aide d'une baguette de verre sur un papier filtre. La tâche obtenue est constituée d'un noyau bleu sombre et d'une auréole transparente, ce qui indique que le bleu injecté est entièrement adsorbé et le test est négatif. Lorsque l'auréole commence à se colorer en bleu, on laisse s'opérer l'adsorption. Si au bout de cinq minutes le bleu de l'auréole persiste, le degré de saturation d'adsorption est atteint et le test est positif. On relève la quantité totale de solution de bleu de méthylène utilisée.

3. Caractérisation des matériaux

3.1. Etude des échantillons du Nord et du Nord Est de la médina de Marrakech (Ibnooussina, 2015)

Deux localités ont fait l'objet de prélèvements d'échantillons; la première localité est située au Nord de la médina de Marrakech au lotissement Attawfiq, tandis que l'autre est située au Nord Est de la médina de Marrakech à Douar Bel Arbi, dans la commune rurale Al Ouidane.

Dans cette partie de la plaine de Marrakech, les analyses pétrographiques des échantillons prélevés dans les différentes localités visitées révèlent l'existence d'une fraction grossière qui correspond à un mélange de calcrètes et de galets de plaines alluviales d'oueds, mélangés à de rares fragments de schistes du massif des Jebilet et d'une fraction fine plutôt limoneuse carbonatée. L'ensemble est issu probablement des croûtes calcaires quaternaires.

Nord de la médina de Marrakech (site Attawfiq)

Le site Attawfiq se situe au Nord de la médina de Marrakech, entre la Faculté de Médecine et le boulevard Prince My Abdellah (Ex. boulevard de Safi). Ce nouveau lotissement abrite des immeubles en cours de construction. A l'emprise de l'un de ces ouvrages en chantier, nous avons repéré une tranchée de 4.50 m de profondeur qui nous a livré deux échantillons.

L'observation de la paroi de la tranchée (Figure 2) révèle la présence d'une séquence lithologique composée de limons calcaires compacts (N) évoluant à un calcaire encroûté en profondeur. La séquence est surmontée par un matériau de remblai sur une hauteur d'environ 0.50 m à 1.00 m.

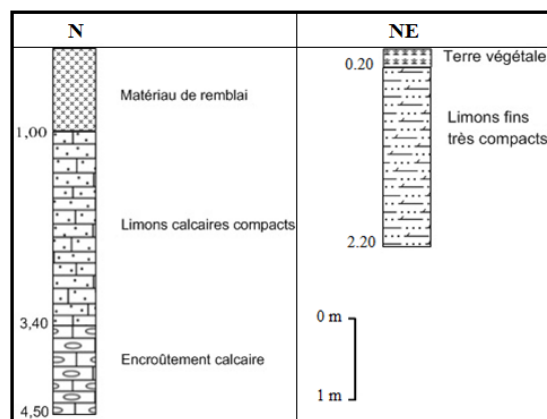


Figure 2: Colonnes lithologiques des tranchées du Douar Bel Arbi et du lotissement Attawfiq

Un échantillon de limons calcaires compacts a été analysé (Tableau 1), il présente un taux de CaCO_3 de l'ordre de 58 % et une teneur en eau naturelle (W_n) estimée à 4%. Son poids spécifique sec $\gamma_d = 20.2 \text{ KN/m}^3$. L'analyse granulométrique de l'échantillon révèle la présence d'une fraction grossière de diamètre inférieur à 2 mm présentant 13% et un pourcentage d'éléments fins de diamètre inférieur à 80 μm de 9%. L'échantillon présente une limite de liquidité L_l évaluée à 41%, un indice de plasticité I_p estimé à 15% et une valeur au bleu de méthylène de l'ordre de 0.8 de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de matériau sec. Il est donc classé grave argileuse mal graduée (GA-Gm), selon la classification des sols grenus mise au point en France par le laboratoire central des Ponts et Chaussées LCPC (Tchouani Nana, 1999).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des échantillons de sol du N et du NE de la médina de Marrakech

Profondeur prélèvement (m)	Désignation	CaCO ₃ (%)	γ_d (KN/m ³)	Wn (%)	LI (%)	Ip (%)	< 2 mm (%)	< 80 μ m (%)	Classe LCPC
- 1.0 à - 3.4	Limons calcaires compacts (N)	58	20.20	4.0	41	15	13	9	GA-Gm
- 0.2 à - 2.2	Limons fins très compacts (NE)	48	1.88	8.8	31	11	70	32	SL

Nord Est de la médina de Marrakech (Douar Bel Arbi)

Douar Bel Arbi est situé dans la commune rurale d'Al Ouidane, à une dizaine de kilomètres de Marrakech et à 1.5 km à l'Est de la route d'Ouarzazate. Nous avons creusé une tranchée de 2.20 m d'où on a prélevé un seul échantillon représentatif de cette partie orientale de la médina de Marrakech. La coupe géologique (Figure 2) relevée fait apparaître un faciès limoneux fin très compact sur 2 m d'épaisseur, suivi d'une couche d'environ 0.20 m de terre arable.

Nous avons analysé un échantillon NE du faciès limoneux fins très compacts (Tableau 1), il présente un taux de carbonate de chaux (CaCO₃) de 48% et une teneur en eau naturelle de l'ordre de 8.8%. Son poids spécifique sec γ_d est estimé à 1.88 KN/m³. L'analyse granulométrique du limon révèle la présence d'une fraction grossière de diamètre inférieur à 2 mm présentant 70 % et d'une fraction d'éléments fins de diamètre inférieur à 80 μ m de 32%. L'échantillon présente une limite de liquidité LI estimée à 31% et un indice de plasticité Ip de l'ordre de 11%. Sa valeur Vb de bleu de méthylène est de l'ordre de 0.4 de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de matériau sec. Selon la classification LCPC des sols grenus, l'échantillon peut être classé comme sable limoneux (SL).

3.2. Etude des échantillons du Sud et du Sud Ouest de la médina de Marrakech (Ibnoussina, 2015)

Dans cette zone, nous avons étudié trois échantillons prélevés de deux localités, au Sud et au Sud Ouest. La première localité est située au Sud de la médina de Marrakech dans le quartier Al Ouaha, à Sidi Youssef Ben Ali, tandis que l'autre se situe dans la partie orientale de Loudaya.

Dans la partie Sud de la plaine de Marrakech, l'analyse pétrographique des échantillons prélevés dans les différentes localités visitées montre que la fraction grossière est composée principalement de galets (dolérite, rhyolite, microgranite, andésite, gabbro, basalte vacuolaire, basalte, quartz, etc.), dont l'origine est à chercher dans le massif précambrien de l'Ourika (Aarab, 1995). La fraction fine est représentée surtout par des silts et des argiles. Dans cette fraction, le quartz devient de plus en plus abondant dans les tamis les plus fins pour lesquels le diamètre des mailles est inférieur à 80 μ m.

Sud de la médina de Marrakech (site Al Ouaha)

Le site d'Al Ouaha est situé à Sidi Youssef Ben Ali sur la rive droite de l'oued Issil, à l'arrière-plan du golf royal de Marrakech. L'étude des terrasses de l'oued Issil et celle des deux tranchées creusées révèlent la présence des mêmes faciès lithologiques avec à la base des graves argileuses compactes (S1), surmontée d'une couche de limons silteux (S2) sur une hauteur variable entre 0.40 et 1.70 m. L'ensemble est chapoté par une couche de terre végétale sur une hauteur de 0.40 m. Le détail des deux coupes lithologiques relevées est consigné dans la Figure 3.

Les graves argileuses compactes (S1) présentent un taux de carbonate de chaux de 8.5%, une teneur en eau naturelle de 5% et un poids spécifique sec de 19.7 KN/m³ (Tableau 2). Les proportions granulaires relevées sont de l'ordre de 18% pour la fraction granulaire de diamètre inférieur à 80 μ m et de 35% pour la fraction granulaire de diamètre inférieur à 2 mm. Les limites d'Atterberg ont affiché une teneur en eau limite de liquidité LI = 34%, une teneur en eau limite de plasticité estimée à 21% et un indice de plasticité Ip de l'ordre de 13%. L'échantillon S1 présente une valeur au bleu de méthylène de l'ordre de 0.5 de bleu de méthylène adsorbé par 100 g de matériau sec. Ces valeurs permettent de classer le faciès dans la catégorie des graves argileuses (GA) selon la classification LCPC des sols grenus.

Les limons silteux (S2) sont caractérisés par un taux du carbonate de chaux de 9%, une teneur en eau naturelle de 4.3% et un poids spécifique sec $\gamma_d = 16.4 \text{ KN/m}^3$ (Tableau 2). L'analyse granulométrique (Figure 4) montre que 99% des particules ont un diamètre inférieur à 2 mm, et 73% ont un diamètre inférieur à 80 μm . Quant aux limites d'Atterberg, elles sont estimées à 25% pour la limite de liquidité, l'indice de plasticité de l'échantillon est non mesurable. La valeur au bleu de méthylène de l'échantillon est évaluée à 0.7 de bleu adsorbée par 100 g de l'échantillon sec. A partir de ces résultats, on peut déduire qu'il s'agit de limons peu plastiques (Lp) selon la classification LCPC des sols fins et l'abaque de Casagrande (Figure 5).

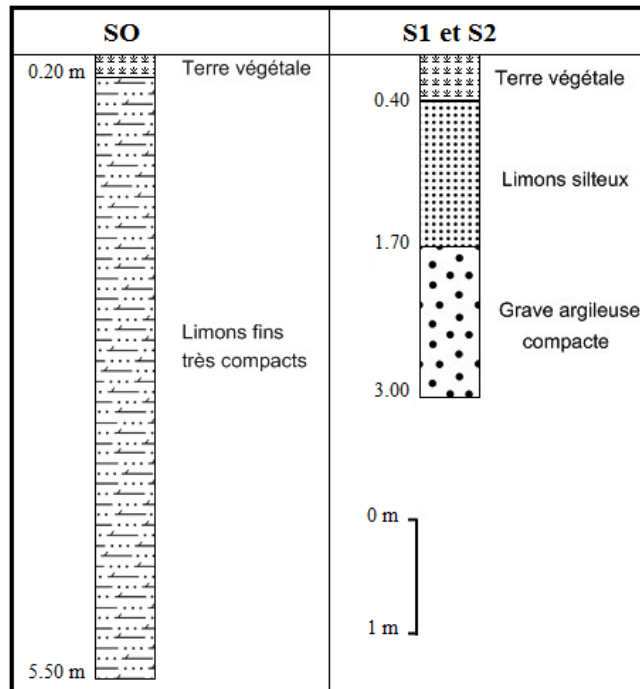


Figure 3: Colonnes lithologiques des tranchées d'Al Ouaha et de Loudaya

Tableau 2: Caractéristiques physiques des échantillons de sol du S et du SO de la médina de Marrakech

Profondeur prélevement (m)	Désignation	CaCO ₃ (%)	γ_d (KN/m ³)	Wn (%)	LI (%)	Ip (%)	< 2 mm (%)	< 80 μm (%)	Classe LCPC
- 0.4 à - 1.7	Limons silteux (S2)	9.0	1.4	4.3	25	-	99.0	73	Lp
- 1.70 à - 3.0	Graves argileuses compactes (S1)	8.5	19.7	5	34	13	35.0	18	GA
- 0.2 à - 5.5	Limons fins très compacts (SO)	11.0	1.86	10.8	30	10	65.8	50	Ap

Sud Ouest de la médina de Marrakech (site de Loudaya)

La commune de Loudaya est située à une vingtaine de kilomètres au Sud Ouest de la médina de Marrakech sur la route nationale N9 reliant Marrakech à Agadir. Dans cette localité, nous avons creusé deux tranchées dont la lithologie est décrite (Fig.3). Dans ces deux tranchées, ont été identifiés des limons fins très compacts sur une épaisseur de 5.30 m, coiffés par une couche de 0.20 m de terre végétale.

L'échantillon de limons fins très compacts (SO) a été analysé (Tableau 2), il présente un taux de CaCO₃ de l'ordre de 11% et une teneur en eau naturelle estimée à 10.8%. Son poids spécifique sec est de l'ordre de 1.86 KN/m³. La fraction grossière de diamètre inférieur à 2 mm présente un pourcentage de 65.8% alors que la fraction fine de diamètre inférieur à 80 μm présente un pourcentage de 50%. La limite de liquidité LI est évaluée à 30%, alors que l'indice de plasticité Ip est estimé à 10%. L'échantillon analysé présente une valeur de bleu égale à 0.8 de bleu de méthylène adsorbé par 100g de matériau sec. Il est classé argile peu plastique (Ap), selon la classification LCPC des sols fins et l'abaque de plasticité de Casagrande (Figure 5).

Tableau 3: Pourcentages des fractions granulaires constituant les échantillons étudiés

<i>Granulométrie par tamisage [NF P 94 056]</i>									
<i>Maille des tamis (mm/μm) et pourcentage des fractions granulaires (%)</i>									
<i>Echantillons</i>	<i>(μm)</i>			<i>(mm)</i>					
	$\varnothing < 2$	$\varnothing < 20$	$\varnothing < 80$	< 0.08	< 0.63	< 2	< 5	< 50	Dmax
<i>S1</i>	10	15	18	18	28,5	35	55	100	12
<i>S2</i>	22	50	73	73	90	99	100	-	8
<i>SO</i>	12	28	50	50	61,9	65,8	80	-	12
<i>N</i>	10	10	9	9	11	13	33	80	73
<i>NE</i>	8	22	32	32	52	70	79,8	95	12.5
<i>Fuseau Craterre pour le pisé (Min)</i>	9	16	23	23	40	54	70	100	-
<i>Fuseau Craterre pour le pisé (Max)</i>	24	38	53	53	100	-	-	-	-

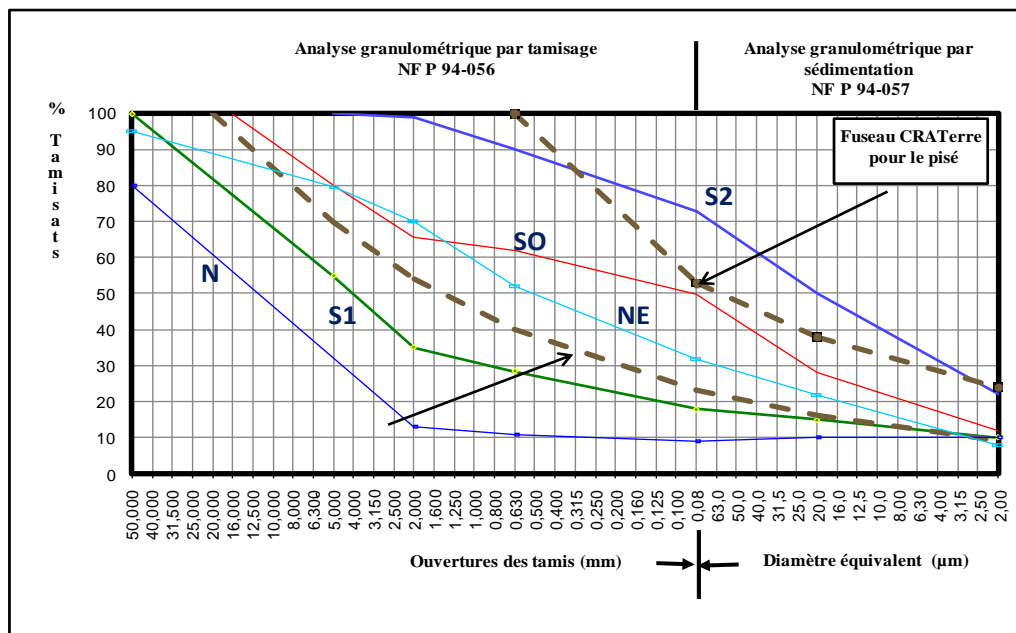


Figure 4: Courbes granulométriques des échantillons analysés et fuseau indicatif pour la technique du pisé (Houben et Guillaud, 2006)

D'après les courbes granulométriques (Fig.4), on peut conclure que les terres N, S1 et S2 étudiées ne s'inscrivent pas entièrement dans le fuseau granulométrique pour le pisé préconisé par le Centre de Recherche et d'Application Terre (CRATERre) (Houben et Guillaud, 1989), elles ne conviennent donc pas pour le pisé. Sachant que pour la construction par la technique du pisé, CRATERre préconise une texture composée de 15 à 25% d'argile, de 20 à 35% de limon de 40 à 50% de sable et de 0 à 15% de gravier.

Seules les deux courbes des terres SO et NE s'inscrivent parfaitement dans le fuseau et peuvent donc être utilisées dans la construction par la technique du pisé. Les terres N et S1 ne sont pas cohérentes puisque les teneurs de toutes les fractions granulaires les composant sont très faibles. De même, la terre S2 présente une teneur en argile suffisante pour assurer la cohésion de la fraction squelettique qui ne s'inscrit pas dans le fuseau si ce n'est sa partie grossière (graviers) qui reste convenable.

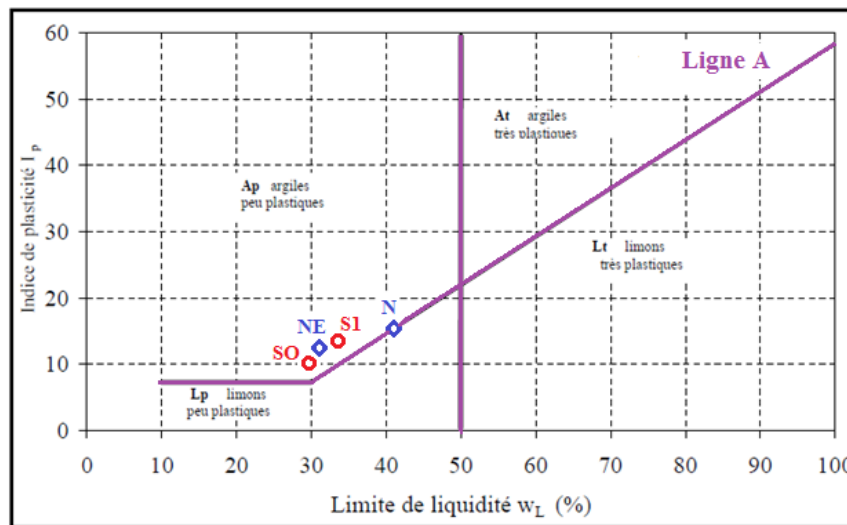


Figure 5: Classification des échantillons étudiés dans l'abaque de Casagrande (Casagrande, 1948)

Conclusion

Le sol et le sous sol de la plaine du Haouz de Marrakech regorge de matériaux de nature lithologique variée (limons, limons silteux, limons calcaires, graves argileuses, graves limoneuses), pouvant être utilisés dans la construction en terre. Ils se caractérisent par la présence d'inclusions de calcrètes et d'encroûtements calcaires, surtout dans la partie Nord de la ville. Ces formations calcaires présentent une granulométrie et une plasticité variables suivant leurs conditions de dépôts et leurs teneurs en carbonates, et se caractérisent par une forte compacité en place. Les tranchées étudiées, de part et d'autre de la médina de Marrakech, offrent des terres non organiques et pas trop argileuses, plus ou moins sableuses au Sud plutôt carbonatées au Nord. Les meilleures terres pour la construction doivent être inscrites dans le fuseau des terres, proposé à titre indicatif par CRATERre (Houben et Guillaud, 1989, Ibnoussina, 2005, Ibnoussina, 2015). L'analyse des différentes courbes granulométriques montre que le mélange des graves argileuses compactes S1 avec les limons silteux S2 des sites du Sud de la médina de Marrakech donnerait naissance à un matériau doté d'un spectre granulométrique très complet et c'est surtout la technique du pisé qui serait techniquement envisageable à partir de la terre excavée des tranchées étudiées. L'autre technique (adobe) peut être aussi envisageable moyennant des corrections. L'échantillon N du Nord est très maigre, il ne s'intègre nullement dans le fuseau Craterre pour le pisé, il faut donc l'amender par ajout de particules de différentes classes dont il est pauvre.

Sur l'abaque de plasticité de Casagrande (Figure 5), on constate que tous les échantillons se placent au-dessus de la ligne A, dans la zone à argiles peu plastiques (Ap). L'échantillon N est à cheval entre la zone des argiles peu plastiques et celle des limons peu plastiques (Ap-Lp) (Casagrande, 1948), et entre la zone à graves argileuses et celle à graves mal graduées (GA-Gm) (LCPC). L'échantillon S2 présente une limite de liquidité de 25 % et un indice de plasticité non mesurable, il est placé à gauche de la ligne de liquidité à 30%, qui sépare deux zones de plasticité différente, ce qui plaide en faveur des deux tendances lithologiques sus citées.

Les valeurs au bleu de méthylène sont relativement faibles (0.4 à 0.8) et indiquent que la fraction argileuse des échantillons analysés est inactive, ce qui est en accord avec Philipponnat (1979). En effet, le pourcentage de la fraction argileuse est très faible (10 à 22%) et elle est peu plastique. Ces argiles restent donc insensibles à l'eau.

Les carbonates de chaux dont les essais calcimétriques révèlent des teneurs globalement comprises entre 8.5 et 58%, seraient un composant des graviers au vu de l'abondance des dépôts calcaires dans la région Marrakech et surtout dans sa partie Nord où leurs proportions sont très importantes (Ibnoussina, 2005, Ibnoussina, 2015).

Sur la base de ces travaux de recherches complétés par ceux réalisés par d'autres chercheurs dans la plaine du Haouz (Mandour et al., 2008; El Goumi et al., 2010), nous proposons de privilégier l'extraction des matériaux des zones Sud Ouest et Nord Est, propices à la construction, utilisant la technique du pisé mais aussi la brique moyennant des ajouts des mêmes sites pour améliorer le comportement. Ces deux zones peuvent être utilisées comme zone d'emprunt. L'excellente zone qui se situe entre le Sud et le Nord peut aussi être utilisée comme zone d'emprunt vue sa richesse en carbonate de chaux, sans toutefois s'approcher du Nord franc dominé par les

croûtes et les carapaces calcaires pauvres en argiles avec des proportions plus importantes de schistes (Ibnooussina, 2015).

Références bibliographiques

1. Aarab E. M. 1995, Genèse et différenciation d'un magma tholéitique en domaine extensif intracontinental: l'exemple du magmatisme pré-orogénitique des Jbilet (Marochercynien). *Thèse d'état, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc*, (1995).
2. Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT), Atlas des zones inondables, bassin hydraulique du Tensift. *Document inédit, Marrakech, Maroc*, (1980).
3. Ambroggi R. et Neltner L., Livret guide de l'excursion C33, Haut Atlas et Anti Atlas occidentaux, Fasc. I: Généralités. *19^{ème} Congr. géol. intern. Alger, livret guide, sér. Maroc, 12*, (1952).
4. Ambroggi R., Thuile G. 1952, Haouz de Marrakech. *XIX^{ème} Cong. Géol. International morphologies régionales. 3^{ème} série, 4, hydrologie du Maroc*, (1952).
5. Bryssine G., Premières réflexions sur la mise en valeur de la plaine du Haouz. *DACF SRAE*, (1951), 1-69.
6. Casagrande A., Classification and identification of soils, *Transactions, ASCE*, 113 (1948) 901- 930.
7. Costet J., Sanglerat G., Cours pratiques de mécanique des sols, Tome1 : Plasticité et calcul des tassements, *Edition Dunod*, (1981).
8. Direction de l'hydraulique, *Notice explicative de la carte hydrogéologique de la plaine du Haouz (Maroc occidental) au 1/200.000. Notes et mémoires du service géologique du Maroc, 284, Rabat, Maroc*, (1980).
9. Dutour A., Ferrandini J., Nouvelles observations néotectoniques dans le Haut Atlas de Marrakech et le Haouz central (Maroc). Apport sur l'évolution récente d'un segment du bâti atlasique. *Revue Géol. Dyn. Géogr. Phy., 26, Fas. 5*, (1985), 286-297.
10. El Goumi N., Jaffal M., Kchikach A., Manar A., Apport de la gravimétrie à l'étude de la structure du bassin du Haouz (Maroc). *Estudios geológicos, 66 (2) (2010) 181-191*.
11. Ferrandini J. et Le Marrec A., La couverture jurassique à paléogène du Haut Atlas de Marrakech est allochtone dans la « zone des cuvettes » d'Aït Ourir (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 295, II*, (1982), 813-816.
12. Ferrandini J. et Petit .P., Sur la tectonique récente de la bordure nord du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). *Bull. Fac. Sci. Marrakech, Maroc, Vol. 1, 1, (Sect. Sci. Terre)*, (1982), 87-96.
13. Houben H. et Guillaud H., *Traité de Construction en Terre, 3^{ème} éd. Editions Parenthèses*, (2006).
14. Houben H., Guillaud H., *Traité de construction en terre. Encyclopédie de la construction en terre, Volume 1. Collection dirigée par le comité scientifique du CRATerre. Editions Parenthèses*, (1989).
15. Huvelin P., Mouvements pré-atlasiques et récents dans les Jebilet et sur leurs pourtours, *Serv. géol. Maroc, T. 33, 249*, (1973), 83-123.
16. Ibnooussina M., Caractérisation lithologique et physico-chimique des matériaux utilisés pour l'architecture de terre dans la région de Marrakech (Maroc), Thèse de Doctorat Sciences et Techniques, Univ. Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc, (2015), 118.
17. Ibnooussina M., Apport de la géotechnique à la caractérisation des matériaux des sites historiques et dans l'analyse des sites géologiques instables : cas des remparts et de la qoubba des Almoravides (Marrakech, Maroc) et de la falaise de Sidi Bouzid (Safi, Maroc). Habilitation universitaire, mémoire N°6, Univ. Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, (2005), 167.
18. Ibnooussina M., Cherradi F., Witam O., Sekkat Z., Ayeb M., Analyse géologique et géotechnique du pisé dans les remparts de Marrakech (Maroc), *Annales de la société géologique du nord. tome 10 (2^{ème} série)*, (2004), 1-7.
19. Mandour H., Levacher D., Amrhar M., Laville E., Caractérisation géotechnique des sols de surface de la ville de Marrakech. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 08 (2008) 563-570*.
20. Ministère de l'Équipement du Transport, Règlement parasismique de la construction en terre (RPCT2011), *Bulletin officiel, 6206 du 17 Moharrem 1435 (21.11.2013)*, Rabat, Maroc, (2014), 2493-2693.
21. Moukhchane M., Contribution à l'étude des réservoirs aquifères profonds de la bordure nord de l'Atlas entre Demnat et Imin'Tanout (Maroc). *Thèse de l'université de France – Comté, Faculté des Sciences et des Techniques*, (1983).
22. Ngoc Lan T. & Barbaras R., Essai granulaire rapide pour sols peu argileux et granulats, *Bull. liaison Labo. P & Ch.- 120- Réf. 2730 (1982) 40-47*.

23. Norme Française NF P 94-050, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols - Méthode par étuvage. Homologuée octobre 1991. *Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190*, (1994).
24. Norme Française NF P 94-051, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg: limite de liquidité à la coupelle - limite de plasticité au rouleau. Homologuée février 1993. *Edition Association Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe 92049, Paris La Défense Cedex7*, (1993).
25. Norme Française NF P 94-052-1, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination des limites d'Atterberg : limite de liquidité – Méthode au cône de pénétration. Homologuée novembre 1995. *Edition Association Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe 92049, Paris La Défense Cedex7*, (1995).
26. Norme Française NF P 94-053, Sols: Reconnaissance et Essais - Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau. Homologuée octobre 1991. *Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190*, (1994).
27. Norme Française NF P 94-056, Sols: Reconnaissance et Essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage. Homologuée mars 1996. *Edition Association Française de Normalisation (AFNOR). Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex7*, (1996).
28. Norme Française NF P 94-057, Sols: Reconnaissance et Essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. Homologuée mai 1992. *Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190*, (1994).
29. Norme Française NF P 94-068, Sols: Reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux. Homologuée novembre 1993. *Bull, liaison Labo. P. et Ch., 190*, (1998).
30. Notes et Mémoires du Service Géologique (NMSG), Carte hydrogéologique de la plaine du Haouz (Maroc occidental) au 1/200 000 et notice explicative, N° 284. *Edition du service géologique du Maroc*, (1980), p. 58.
31. Philipponnat G., Fondations et ouvrages en terre, *Edition Eyrolles*, (1979), 1-393.
32. Rivière A., Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations. *Edition Masson*, (1977), 170.
33. Sinan M., Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). *Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Mohammedia d'Ingénieurs*, Rabat, Maroc, (2000).
34. Tchouani Nana J.M., Cours de mécanique des sols, Tome1 : Propriétés des sols, *Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2iE), Groupe EIER-ETSHE*, (1999), 137.
35. Vatan A., Manuel de sédimentologie. *Editions Technip*, (1967), 397.

(2016); <http://www.jmaterenvironsci.com>