

MICROFICHE ETABLIE A PARTIR DE
L'UNITE DOCUMENTAIRE
N

جديدة منجزة حسب الوثيقة
رقم :

92

0209

ROYAUME DU MAROC

المملكة المغربية

المركز الوطني للتوثيق
CENTRE NATIONAL DE DOCUMENTATION

SERVICE DE REPROGRAPHIE
ET IMPRIMERIE

B.P 826 RABAT

المغرب
CND
MAROC

مصلحة الطباعة والتصوير
ص.ب 826 الرباط

F

1

92-0209

LA MECANIQUE DES TERRES (*)

PAR
M. MARTIN
Ingénieur, CRR - Bâtiment - LPEE

المركز الوطني للأبحاث
والدراسات والتقنية
92-0209
م. مارتين

Résumé

L'intégration des bureaux d'études et de contrôle aux filières de construction en terre demande, à terme, l'élaboration d'un outil spécifique et son appropriation par les intéressés.

Cet outil est une nouvelle discipline géotechnique appelée mécanique des terres. Après avoir été située par rapport aux autres branches de la géotechnique (mécaniques des sols et des roches) et à ses deux disciplines connexes : la pédologie et l'architecture, elle fait l'objet d'une justification argumentée épistémologiquement, historiquement et analogiquement.

On expose ensuite ses buts et ses méthodes propres avec, notamment et en annexe, une suggestion de modes opératoires et d'un cadre standard de saisie des données géotechniques concernant les constructions en terre.

Enfin, on présente ce que pourrait être son contenu avec la double idée, d'une part d'établir une base de départ pour des comités d'experts qui seraient chargés d'en préciser les thèmes, d'autre part de suggérer des axes de recherches qui pourraient être traitées à travers des thèses et autres travaux de cette nature.

Mots-clés

Mécanique - Construction en terre - Pédologie - Architecture - Géotechnique.

INTRODUCTION :**0.1 Point de la situation**

Depuis des temps immémoriaux, on construit en terre dans la plupart des pays du monde. Depuis plusieurs décennies, on réalise des études technico-scientifiques sur la terre comme matériau de construction, en général à l'occasion ou à la suite d'opérations de construction employant ce matériau et décidées le plus souvent à partir de considérations politiques, sociales, macro-économiques, etc.....

Or, si l'on continue aujourd'hui à construire en terre, peut-être un peu moins largement que par le passé, cette activité profite peu des importants efforts théoriques, expérimentaux et pratiques déployés un peu partout dans le monde depuis près d'un demi-siècle.

Ainsi la construction en terre demeure en grande partie cantonnée au secteur dit informel et n'arrive que très difficilement à s'insérer dans le secteur organisé de la construction. Ceci nuit bien entendu à sa crédibilité et ne fait que renforcer son aspect marginal aux yeux de la plupart des professionnels du bâtiment.

Cette analyse a été faite un grand nombre de fois par de très nombreuses personnes ; et les propositions pour casser le cercle vicieux «dévalorisation - réticence ou refus d'emploi» n'ont pas manqué, mais leur succès a été mitigé.

0-2 Une nouvelle stratégie

Aujourd'hui, l'instauration au niveau mondial du Comité Technique 96 «Construction en Terre» au sein de la RILEM crée les conditions d'une évolution irréversible. Mais cette entité de coordination et de diffusion des résultats des études et recherches sur les constructions en terre, pour nécessaire qu'elle soit, n'en paraît pas moins insuffisante. Elle doit aussi se doter d'une stratégie visant à insérer ce type de constructions dans le secteur professionnel organisé et convaincre les différents organismes dont elle fédère les efforts de l'adopter.

Cette stratégie comprend trois temps :

(*) Communication présentée au 1er Séminaire International sur l'ingénierie des constructions en terre Marrakech 30, 31 Mai et 1 Juin 1990

- à court terme, il s'agit de multiplier l'offre de technologies «terre» appropriées. En effet, les besoins de construction sont énormes et l'on ne peut attendre 10 ou 15 ans l'élaboration d'un corpus de «savoir-terre» aussi complet et précis que ceux que l'on rencontre pour des matériaux et procédés de construction plus conventionnels (béton, terre cuite, etc...). C'est pourquoi ces «techniques terre» seront fondées, au moins provisoirement, sur le surdimensionnement et une surprotection vis à vis de l'eau.

Il s'agit aussi d'établir un certain nombre de modes opératoires de base (et normalisés au moins jusqu'à une certaine échelle) afin de pouvoir commencer à capitaliser des données homogènes. Cette étape du court terme a déjà été franchie au Maroc, du moins en partie, avec l'invention de l'adobéton et de ses dérivés d'une part, avec l'établissement de modes opératoires et d'une méthodologie de saisie et de capitalisation des données «terre» au sein du LPEE d'autre part.

- à moyen terme, il s'agit de mettre en place la filière «terre», c'est à dire de sensibiliser les professionnels du bâtiment à ce mode de construction et de leur fournir les outils qui permettront de considérer cette façon de bâtir comme «normale» et non pas risquée et/ou exotique, voire farfelue comme cela a parfois tendance à être le cas actuellement. Ces outils ont pour nom : formation des hommes, transparence et diffusion des informations spécialisées, réglementation adaptée, disponibilité de documents contractuels-types, etc.... En ce domaine également, le Maroc est en tête du mouvement avec notamment la mise en place de «l'Istituterre» qui aura un rôle central dans les deux premiers domaines cités : la formation et la communication ;

- à long terme, il s'agit d'édifier un corpus scientifique sur la terre à l'image de ce qui existe pour d'autres matériaux de construction, et de faire en sorte que les intervenants les plus techniques dans l'acte de bâtir, à savoir les bureaux d'études et de contrôle, puissent utiliser ce savoir.

O.3 Vers une mécanique des terres

Ce savoir est plus ou moins développé actuellement et l'objet de cette communication est :

1/ de lui donner un nom et de le faire connaître : c'est la MECANIQUE DES TERRES (on s'expliquera plus loin sur cette appellation),

2/ de la situer par rapport à des disciplines scientifiques connexes et connues,

3/ de justifier son existence en tant que telle sur le plan scientifique face au sceptique toujours prompt à soupçonner le creux derrière les grands titres.

4/ de préciser ses buts, et surtout ses méthodes,

5/ enfin de présenter à grands traits son contenu et les points qu'il conviendra d'investiguer en priorité.

1/ DEFINITION DE LA MECANIQUE DES TERRES

1-1 Quelle approche scientifique de la terre ?

L'analyse des nombreuses études faites pendant les dernières décennies sur la «terre - matériau de construction» montre que celle-ci a presque toujours été comparée, techniquement et économiquement, au béton ; d'ailleurs, on la stabilisait presque toujours, la plupart du temps au ciment ; et de fait, on pouvait la considérer comme un ersatz de béton, faute pour le constructeur de granulats plus convenables (c'est-à-dire plus grossiers granulométriquement) et par souci d'économie (à supposer que le taux de stabilisant ne fût pas rédhibitoire et ne conduisit pas à consommer plus de ciment qu'une construction plus conventionnelle).

Cette «approche béton» n'ayant dans l'ensemble pas donné les résultats espérés, il est raisonnable et logique d'adopter une autre approche, bien connue aujourd'hui, et qui est l'approche géotechnique.

1-2 Classification géotechnique

Pendant longtemps, on a d'abord parlé de «mécanique des sols». Le terme «géotechnique» à consonance plus moderne l'a progressivement remplacé dans le langage professionnel courant. Cependant, il n'y a pas identité entre les deux termes. Ceci est apparu avec l'émergence de la mécanique des roches qui se distingue de la mécanique des sols par des méthodes d'investigation et des applications assez différentes, même si l'approche générale demeure la même, à savoir que ces deux disciplines se fondent très largement sur des essais spéciaux que l'on réalise in situ et en laboratoire.

Ainsi la différence de structure et de comportement entre les roches meubles et les roches dures a généré un premier clivage au sein de la géotechnique, il y a environ un demi-siècle.

Aujourd'hui, il paraît opportun de mettre en évidence un deuxième clivage : celui qui existe entre d'une part les roches (meubles ou dures) en général non-remaniées dont la fonction est d'être le substrat des ouvrages que l'on construit, et d'autre part les roches (meubles ou dures) remaniées dont la fonction est d'être les constituants - au moins en partie - de ces ouvrages.

Ce double clivage conduit donc à une classification de la géotechnique en quatre disciplines complémentaires qui s'inscrivent dans un simple tableau «2 x 2» (cf tableau 1).

Dans la première ligne, on trouve les deux disciplines traitant des roches meubles : la mécanique des sols et la mécanique des terres.

TABEAU 1
Proposition de classification géotechnique

ECHELLE GÉOTECHNIQUE TYPE DE ROCHE	MACRO-GÉOTECHNIQUE ou MÉCANIQUE DES TERRAINS (Filliat)	MICRO-GÉOTECHNIQUE (Démehati) ou MÉCANIQUE DES GEOMATERIAUX
ROCHES MEUBLES	MÉCANIQUE DES SOLS (SOIL MECHANICS)	MÉCANIQUE DES TERRES (EARTH MECHANICS)
ROCHES DURES	MÉCANIQUE DES ROCHES (ROCK MECHANICS)	MÉCANIQUE DES PIERRES (STONE MECHANICS)

Dans la seconde ligne, figurent les deux disciplines traitant des roches dures : la mécanique des roches et la mécanique des pierres.

Et de façon transposée, la première colonne regroupe la mécanique des sols et la mécanique des roches dans ce que Monsieur le Professeur Filliat appelle la «mécanique des terrains», c'est-à-dire la «macro-géotechnique».

De même, la deuxième colonne comprend la «mécanique des terres» et la «mécanique des pierres», lesquelles forment ensemble ce que l'on pourrait appeler la "mécanique des géomatériaux" (M. Olivier) ou encore la «micro-géotechnique» (A. Démehati).

Cette façon de considérer la géotechnique et de la structurer en quatre disciplines peut paraître curieuse. Pourtant, elle n'est pas nouvelle et l'auteur a redécouvert très récemment un si remarquable passage dans le premier traité en Français de Mécanique des Roches(*) qu'il ne résiste pas à l'envie de le reproduire ici in extenso :

«La variété des propriétés physiques des matériaux de l'écorce terrestre nécessite, pour leur détermination, l'emploi de moyens très divers. Pratiquement, on distinguera deux grandes classes de roches : les roches meubles et les roches dures. En outre, l'utilisation de ces matériaux durs ou meubles ne pourra que rarement être envisagée à une échelle comparable à l'échelle humaine et il nous faudra admettre, au minimum, un classement dimensionnel à deux catégories. Nous établirons arbitrairement celui-ci sur la base d'une

échelle d'utilisation inférieure ou supérieure à l'échelle humaine. Dans les activités de la géotechnique, le comportement mécanique des roches a une grande importance pratique. Voyons comment peuvent être étudiées les propriétés de cette nature.

Examinons en premier lieu les utilisations à une échelle supérieure à l'échelle humaine, et par exemple de l'ordre de dix fois cette échelle.

La mécanique des sols sera consacrée à l'étude des roches très déformables de surface, en masses importantes.

La mécanique des roches sera consacrée, par convention, à l'étude des roches profondes ou peu déformables, en masses importantes.

La mécanique des terres sera consacrée à l'étude des roches meubles à petite échelle, et comprendra notamment la rhéologie des argiles et des coulis.

La mécanique des pierres sera consacrée à l'étude des roches dures en échantillons, ou considérées comme matériaux. Les pierres ont fait l'objet de travaux déjà anciens que l'usage semble, effectivement, avoir constitué en une branche indépendante de la géotechnique.

Chacune de ces quatre branches de la géotechnique, sols, roches, terres et pierres, ainsi définie, pourra se subdiviser, en vue des applications, en trois champs d'activité distincts, à savoir :

1/ le domaine expérimental, comprenant les essais de laboratoire et de chantier ;

(*) *La Mécanique des roches*, par M. Talobre, Dunod, 1957.

2/ le domaine théorique, dans lequel s'élabore la science reliant les enseignements expérimentaux
 3/ le domaine d'utilisation, qui comporte les applications de la théorie au chantier, les règles d'utilisation, qui comporte les applications de la théorie au chantier, les règles d'utilisation pratiques, les recommandations pour le réalisateur, les procédés originaux de construction.

En delà la clairvoyance de son auteur, Monsieur Talobre, auquel il faut ici rendre hommage, on note une petite nuance entre son propos et ce qui a été dit plus haut. Son deuxième clivage, en effet, n'apparaît pas nettement et est fortement lié à la notion d'échelle. Cette vision, si elle est juste, semble quelque peu insuffisante et il convient de la compléter comme on vient de la faire par l'état du matériau : remanié / non remanié, et par sa fonction : substrat / constituant de la construction.

1-3 Caractéristiques des quatre disciplines géotechniques

On ne reviendra pas sur les distinctions que l'on peut faire entre les roches meubles et les roches dures ; elles sont bien connues et sont rappelées dans le tableau 2.

Plus intéressantes sont les caractéristiques relatives au clivage entre «macro-géotechnique» et «micro-géotechnique».

Outre la notion d'échelle véhiculée par les termes macro et micro, il y a, comme on l'a vu, l'état et la fonction du matériau. Dans le cas où celui-ci ne présente pas des caractéristiques mécaniques suffisantes, on peut les améliorer par un traitement approprié. En micro-géotechnique, on parlera volontiers de stabilisation, ou de renfort s'il s'agit de fibres (paille des adobes, barres des maçonneries de pierre armées). En macro-géotechnique, on évoquera plutôt le traitement des terrains qui peuvent consister en des injections de produits spéciaux, en des actions de

congélation provisoire, etc... ; et on parlera aussi de renfort comme dans le cas d'épinglage de voûte en tunnel rocheux ou d'ancrage de paroi par câbles.

Une autre distinction provient des disciplines connexes de la macro et de la micro-géotechnique. Pour la première, la discipline complémentaire est à l'évidence la géologie. D'ailleurs aujourd'hui, plus aucune étude de grand équipement de génie civil (barrage, grands tunnels, etc...) n'est faite en dehors du cadre d'une équipe pluridisciplinaire regroupant des géologues et des géotechniciens. Dans le cas de la micro-géotechnique, les disciplines connexes sont au nombre de deux. Il s'agit d'une part de la pédologie, d'autre part de l'architecture.

La première est enseignée en général dans les écoles agronomiques et est, il faut bien le dire, assez méconnue ; si elle est relativement peu utile dans le cas de la mécanique des pierres, elle ne peut être ignorée dans celui de la mécanique des terres en raison de l'apport considérable qu'elle est susceptible de fournir au niveau de la description, de l'identification et, par suite, de la convenance du matériau.

La seconde discipline connexe de la micro-géotechnique est l'architecture. Elle prend le relais de la pédologie au moment où l'on passe du matériau au produit (bloc, banchée, etc...). A la différence de la pédologie, elle est aussi importante en appui de la mécanique des pierres que de la mécanique des terres ; mais à sa ressemblance, elle est enseignée dans des organismes, les écoles d'architecture, qui sont rarement fréquentées par les géotechniciens (et réciproquement).

Ainsi la mécanique des terres, et plus généralement la micro-géotechnique, nécessite pour son étude une certaine pluridisciplinarité, soit au niveau individuel (cas de figure rare, il faut bien en convenir), soit au niveau de petites équipes ou même de simples binômes.

ECHELLE GÉOTECHNIQUE TYPE DE ROCHE	MACRO-GÉOTECHNIQUE ou MECANIQUE DES TERRAINS	MICRO-GÉOTECHNIQUE ou MECANIQUE DES GÉOMATÉRIEAUX	Caractéristiques	Fragmentation	Gisement	Applications privilegiées
ROCHES MEUBLES	MECANIQUE DES SOLS	MECANIQUE DES TERRES	Faibles résistances mécaniques Forte déformabilité Forte sensibilité à l'eau	Fine, plus ou moins homogène et isotrope	Super- ficiel	Bâtiment
ROCHES DURES	MECANIQUE DES ROCHES	MECANIQUE DES PIERRES	Fortes résistances mécaniques Faible déformabilité Faible sensibilité à l'eau	Fragmentation à grande maille anisotrope	Profond	
FONCTION	Accueil de l'ouvrage	Constitution de l'ouvrage	TABLEAU 2 CARACTÉRISTIQUES DES QUATRE DISCIPLINES GÉOTECHNIQUES			
ÉTAT	Non remanié (in situ) Masses importantes	Remanié Masses réduites				
DISCIPLINE(S) CONNEXE(S)	Géologie	Pédologie Architecture				

2/ JUSTIFICATION DE LA MECANIQUE DES TERRES

Après cette situation de la mécanique des terres, le sceptique à l'esprit critique aiguisé ne manquera pas d'émettre des doutes sur le bien-fondé d'une telle discipline et sur le sérieux de son ancrage scientifique. Et par delà ces doutes points peut-être une suspicion légitime que l'on peut formuler ainsi : Et si tout cela n'était qu'un moyen détourné et astucieux pour faire accepter les constructions en terre aux bureaux d'études et de contrôle ? En d'autres termes, la mécanique des terres, ne serait-elle pas une discipline «ad hoc», avec toute la nuance péjorative qui s'attache à cette expression ?

La réponse à cette question va se faire à deux niveaux : au plan épistémologique d'abord, au plan historique ensuite.

2-1 Considérations épistémologiques

2-1-1 Immunisation

Lorsqu'une théorie scientifique paraît menacée par l'apparition d'un fait ou d'une donnée semblant la contredire, la démarche méthodique commande de la défendre avant d'essayer d'élaborer une théorie différente, en principe plus générale et plus complexe.

L'épistémologue recommande alors de faire appel au concept d'immunisation. Elle consiste à émettre une nouvelle hypothèse qui est susceptible, dans le cadre de la théorie contestée, d'expliquer le fait nouveau.

Mais cette hypothèse doit répondre à deux conditions :

1/ ne pas réduire la simplicité, ni le pouvoir de synthèse de la théorie initiale.

2/ être féconde et permettre l'explication de nouveaux faits.

S'il en est ainsi, on dira que l'immunisation a réussi. L'exemple le plus connu dans l'histoire des sciences est la sauvegarde de la mécanique newtonnienne suspectée d'être inexacte à cause de perturbations observées dans l'orbite de la planète Uranus et immunisée par l'hypothèse de l'existence d'une planète alors inconnue et bientôt observée : Neptune.

Dans cet exemple, on peut vérifier que l'hypothèse avancée répond bien aux deux conditions établies plus haut.

2-1-2 Discipline ad hoc ? Justification

Le schéma de l'immunisation d'une théorie, peut-il être transposé à l'existence même d'une discipline scientifique ? Autrement dit, peut-on justifier une discipline scientifique en suivant la même démarche que celle de l'immunisation ?

A la réflexion, rien ne semble l'interdire, car les deux démarches obéissent à la même rationalité. Tout au plus pourrait-on demander à la justification d'être corroborée par ailleurs, par une analogie historique par exemple.

Le tableau 3 illustre bien le parallélisme des deux démarches. L'objectif n'est plus de convaincre de la pertinence d'une théorie scientifique, mais d'en justifier l'existence, en l'occurrence celle de la mécanique des terres.

La raison n'est plus l'apparition d'un fait la contredisant en apparence, mais un scepticisme latent, voire une sourde opposition, qu'il s'agit de surmonter en convainquant.

Dans le premier cas, la méthode consiste à introduire une nouvelle hypothèse ; dans le second, elle consiste à expliciter le statut, les buts, les méthodes propres de la discipline concernée.

De façon analogue à l'immunisation, il existe deux critères de justification de l'existence d'une nouvelle discipline :

- ne pas présenter d'incohérence ou de contradiction avec des disciplines connexes, mais s'en montrer complémentaire,

- être féconde en permettant de dégager de nouveaux facteurs explicatifs de différents phénomènes et en fournissant un cadre intégrateur de divers paramètres parfois hétérogènes a priori.

L'avenir dira si les développements de la mécanique des terres justifient cette discipline en tant que telle ; mais d'ores et déjà, le cadrage géotechnique réalisé dans la première partie y a positivement contribué.

2-2 Précédent géotechnique

Cependant pour écarter définitivement le soupçon toujours latent de discipline ad hoc, il convient de compléter les considérations épistémologiques ci-avant par l'exposé d'un précédent historique : celui de la géotechnique elle-même.

2-2-1 Rappel historique : émergence de la mécanique des sols

Aujourd'hui, il va pratiquement de soi que, quand on veut réaliser un édifice de quelque importance, il faille commencer les études par des essais et des études de terrain.

Mais cet état de fait est récent car au milieu de ce siècle - c'était hier - et même en Europe, on pouvait encore lire dans un grand nombre de cahiers des charges la formule consacrée : «l'entrepreneur doit faire son affaire des problèmes de terrain et de fondations».

C'est dire si la mécanique des sols était loin d'être entrée dans les moeurs. Ceci peut paraître étonnant aujourd'hui ; c'est pourquoi, il est intéressant d'analyser les causes historiques et culturelles d'un tel état d'esprit.

Autrefois, les savoir-construire étaient locaux et l'on se plaçait d'emblée sur les «bons sols» (sauf quelques exceptions dans des zones de lagunes comme Venise ou les Pays-Bas où l'on a développé des techniques spécifiques). Si les édifices avaient quelque importance, ils nécessitaient des fondations conséquentes ; ces travaux demandaient souvent plusieurs années au cours desquelles le terrain avait le temps d'effectuer son tassement sous ces charges particulières.

Le temps ne comptait pas et le coût des ouvrages était souvent une notion bien lointaine. Le savoir en matière de fondations était éclaté en d'innombrables tours de main et techniques locales qui s'ignoraient largement les unes les autres : la mécanique des sols était quasiment inexistante.

On peut faire remonter les premières avancées scientifiques en la matière à la fin du 18^{ème} siècle avec Coulomb et ses études sur la poussée et la butée des terres.

Or comme le souligne Monsieur le Professeur Filliat dans sa magistrale introduction à la somme géotechnique qu'il a supervisée *, «un aussi bon départ ouvrait la voie à un développement rapide de cette discipline **. Ce développement n'a pas eu lieu. La mécanique des sols a stagné pendant pratiquement un siècle et demi, même si quelques résultats ont été obtenus au cours du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle».

2.2.2. Difficultés culturelles et institutionnelles

Et Monsieur Filliat d'ajouter plus loin : «Les raisons profondes de l'enlisement de la mécanique des terrains sont difficiles à élucider et sans doute multiples. Deux causes toutefois nous paraissent pouvoir être retenues.

La première tient un peu d'intérêt qu'ont souvent manifesté les ingénieurs à l'égard des matériaux naturels, trop complexes pour se prêter à l'analyse mathématique et à la mise en équation (...).

Mais deuxième cause, d'ailleurs connexe de la précédente, a participé à la stagnation de la mécanique des terrains : c'est la coupure qui s'est établie pendant plus d'un demi-siècle entre les recherches des géologues et les travaux des ingénieurs».

On ne peut qu'être frappé par la pertinence de cette analyse... et le sentiment que la mécanique des terres se trouve dans une situation étrangement analogue.

(*) *La pratique des sols et des fondations, Edition Moniteur - 1980*

(**) *La Mécanique des sols*

Naguère, elle aussi était inexistante, éclatée qu'elle était entre de multiples savoir-faire locaux. Elle aussi a eu des débuts prometteurs avec les nombreuses études sur la terre stabilisée notamment. Elle aussi est menacée d'enlisement par les deux mêmes écueils

que sont la réticence des ingénieurs vis-à-vis des matériaux naturels et le cloisonnement des disciplines scientifiques, en l'occurrence ici la pédologie et les sciences de l'ingénieur d'une part, les sciences de l'ingénieur et l'architecture d'autre part.

2.2.3. Dépassement de ces difficultés

Or à ce stade, il est intéressant de voir comment la mécanique des sols a fini par décoller. Comme le dit Monsieur Filliat : «C'est à Terzaghi que revient le mérite, aux alentours de 1925, d'avoir sorti la mécanique des sols de l'impasse où elle stagnait et de l'avoir engagée sur une voie réaliste et efficace.

Cet ingénieur (...) comprit que seule l'expérimentation, même imparfaite, permettrait d'expliquer le comportement sous charge des matériaux naturels, et que toute loi les concernant devait prendre appui sur des résultats d'essais, en même temps que sur l'observation des ouvrages construits».

Il ajoute que Terzaghi s'est vite aperçu que les lois de Coulomb, à condition de les écrire en contraintes effectives, étaient encore valables ; et il laisse tomber, laconique : «On avait donc, en gros, perdu 150 ans...» En quelques décennies, une panoplie de nouveaux essais, en laboratoire ou in situ, faisant appel à des appareils adéquats et spécifiques, a donc permis de multiplier les données, d'intégrer les acquis antérieurs, bref de donner corps à une discipline dont le caractère techno-scientifique, voire utilitaire, déçoit peut-être les puristes, mais qui mérite néanmoins le qualificatif de scientifique de par l'universalité de ses outils et de ses méthodes, l'esprit de rigueur dans la démarche expérimentale et le souci de systématisation dans la compréhension des phénomènes.

2.2.4. Emergence de la mécanique des roches

C'est d'ailleurs ce dernier aspect qui a été en partie responsable de l'apparition de la mécanique des roches en tant que discipline géotechnique indépendante de la mécanique des sols.

Les ingénieurs se sont en effet rapidement aperçus, lorsqu'ils avaient des tunnels profonds à creuser, des grands barrages à fonder, des galeries de mine à étayer, etc... que les méthodes usuelles de la mécanique des sols ne convenaient plus car la problématique et les propriétés du matériau avaient changé.

De terrains meubles destinés à recevoir, le plus souvent, des ouvrages relativement légers, on passait en effet à des terrains durs, en général avec des plans de fracturation préférentiels, qui devaient répondre à des actions spécifiques comme l'emploi d'explosifs, des soutènements dans toutes les directions, etc... et dont le comportement en présence d'eau était lui aussi tout à fait particulier.

Ces éléments ont permis à Monsieur Talobre de justifier la mécanique des roches comme une discipline géotechnique à part entière :

« La mécanique des roches ne peut être confondue avec la mécanique des sols (...). La mécanique des roches est l'homologue pour les roches dures de la mécanique des sols pour les roches meubles.

TABLEAU 3 PROCESSUS COMPARES DE L'IMMUNISATION ET DE LA JUSTIFICATION

	IMMUNISATION	JUSTIFICATION
OBJECTIF	Convaincre de la pertinence d'une théorie scientifique contestée	Justifier l'existence d'une théorie scientifique
RAISON	Apparition d'un fait la contredisant en apparence	Existence d'un scepticisme latent vis à vis d'elle
METHODE	Introduction d'une nouvelle hypothèse (dans le cadre de la théorie contestée)	Explication de : - sa situation - ses buts - ses méthodes propres - son contenu
CRITERES DE VALIDATION DE L'HYPOTHESE OU DE JUSTIFICATION DE LA DISCIPLINE	1/ Ne pas réduire la simplicité, ni le pouvoir de synthèse de la théorie initiale 2/ Etre féconde et permettre l'explication de nouveaux faits	1/ Ne pas présenter d'incohérence ou de contradiction avec des disciplines connexes, mais s'en révéler complémentaire 2/ Etre féconde en se révélant utile et en permettant ainsi de lever les dernières réticences
CONCLUSION	Validation réalisée : l'immunisation est réussie et la théorie renforcée Validation non-réalisée : l'hypothèse est "ad hoc" et la théorie sort affaiblie, voire réfutée	Justification réalisée : la discipline scientifique sort reconnue Justification non-réalisée : la discipline est "ad hoc" et le scepticisme vis à vis du champ d'application de la discipline sort renforcé.

2.3. Conclusion

De la même façon, la mécanique des terres ne peut être confondue avec la mécanique des sols. Dans l'emploi des roches meubles, la mécanique des terres est l'homologue pour la constitution d'ouvrages de bâtiments de la mécanique des sols pour la fondation

3/ BUTS ET METHODES DE LA MECANIQUE DES TERRES

3.1. Les buts

Le but de la mécanique des terres est double :

- au niveau formel, il s'agit de fonder scientifiquement l'ingénierie des constructions en terre, un peu de la même façon que la mécanique des sols qui permet d'assoir sur des bases rationnelles et largement reconnues toutes les questions touchant aux fondations et à la stabilité des ouvrages de construction, quels qu'ils soient :

- au niveau du contenu, il s'agit de répondre adéquatement à la problématique spécifique des constructions en terre, laquelle tient à la variabilité des matériaux utilisés, à la pluralité des techniques de mise en oeuvre et à la diversité des ouvrages réalisés et des sollicitations d'environnement et d'usage auxquels ils sont soumis.

3.2. Les méthodes

Le bon développement de la mécanique des terres exige, comme tout travail de fond, de procéder avec méthode. A priori, cinq points méritent d'être relevés

- le rôle et la place des laboratoires,
- la nature des essais,
- la représentativité des essais,

de tels ouvrages.

Mais après avoir justifié cette nouvelle discipline géotechnique épistémologiquement, historiquement et analogiquement, il convient d'en préciser les buts, les méthodes et le contenu.

- la capitalisation des données,
- la structuration des connaissances.

3.2.1. Rôle et place des laboratoires

A l'instar des autres disciplines de la géotechnique, la mécanique des terres se caractérise par le fait que, non seulement ses développements théoriques, mais encore sa pratique sont étroitement liés à des essais spéciaux qu'il est plus ou moins impératif de réaliser.

C'est pourquoi, parmi les différents acteurs qui auront à développer, promouvoir et utiliser la mécanique des terres, ce sont les laboratoires qui tiendront la place centrale.

Cependant, il convient de réguler ce rôle, notamment sur le plan économique, dans la pratique constructive courante. Ceci peut être obtenu par la mise au point d'une méthodologie d'intervention des laboratoires qui intègre :

- la nature de l'interlocuteur (maître d'ouvrage, maître d'oeuvre, entrepreneur, etc...)

- le contexte contractuel dans lequel se situe l'intervention (choix architectural, variante proposée par l'entrepreneur dans le cadre d'un appel d'offres, etc...)

- les résultats géotechniques déjà obtenus dans les phases précédentes de l'intervention.

Il est à noter les deux points suivants :

1/ une telle méthodologie est dans son principe analogue à certaines qui existent déjà en mécanique des sols et qui ont été formalisées à travers des systèmes experts de type CESSOL ou autres,

2/ le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes a établi une première méthodologie pour la mécanique des terres. Elle demandera certes à être sans cesse améliorée, mais déjà, à travers le réseau de laboratoires régionaux du LPEE, elle est opérationnelle sur l'ensemble du territoire marocain.

Ainsi, il est suggéré que l'établissement de méthodes optimales d'études de constructions en terre fasse lui-même partie de la mécanique des terres, c'est-à-dire que cette discipline intègre dès l'origine à la fois une dimension géotechnique et une dimension «méta-géotechnique».

3.2.2. Nature des essais

Plusieurs essais sont communs à la mécanique des sols. Il s'agit en général d'essais d'identification du matériau : granulométrie-sédimentométrie, limites d'Atterberg, essai au bleu de méthylène, taux de matière organique, Proctor, etc.....

Certains autres essais, usuels en mécanique des sols, ne seront pas utilisés, ou ne le seront que de manière assez marginale en mécanique des terres. Il s'agit bien évidemment de la quasi-totalité des essais in situ, mais aussi des différents essais de cisaillement (à la boîte, triaxial) ou des essais de consolidation (oedomètre). En effet, ces essais s'effectuent de préférence sur des échantillons non-remaniés ; ils sont en général longs et coûteux ; par suite, on ne les emploiera que pour des études spéciales (ouvrages fortement sollicités ou à risque d'imbition élevée par exemple), et bien sûr pour tous les travaux de recherche.

Comme la mécanique des terres répond à une problématique bien particulière, elle exige des essais nouveaux que la mécanique des sols n'a pas - ou a peu - à prendre en considération et qu'elle n'a donc pas eu à développer dans le passé.

Ces essais spécifiques concernent principalement :

- la résistance mécanique en situation non-confinée,
- la résistance aux actions de l'eau,
- l'aptitude constructive.

Le premier groupe d'essais a déjà été largement investi, mais avec une approche souvent inappropriée : l'approche

«béton» la seule modulation y ayant été apportée étant la distinction entre résistance humide et résistance sèche.

Les essais du deuxième groupe ont donné lieu à quelques tentatives de mise au point, mais de façon beaucoup trop, sporadique dans l'espace ou dans le temps pour atteindre le seuil nécessaire à leur reconnaissance et à leur diffusion. Parmi ces essais, on distinguera les essais de résistance à l'eau dynamique (érosion) et à l'eau statique (capillarité-imbibition).

Enfin les essais du troisième groupe, s'ils existent parfois, ont pour caractéristique d'être beaucoup moins répandus que ceux du premier groupe et d'être de natures très diverses. Ils comportent principalement :

- la mesure des variations dimensionnelles (retraits et gonflements),
- la détermination de l'aptitude à recevoir des enduits,
- la détermination de l'aptitude à assurer des scellements.

La mécanique des terres recouvre donc une très grande variété d'essais ; et le bon maître d'oeuvre en terre sera celui qui, en fonction de l'opération à réaliser, saura définir les essais les plus pertinents a priori à effectuer.

3.2.3. Représentativité des essais

Encore faut-il que ces essais soient représentatifs de la réalité à construire ; car comme on l'a vu, une des spécificités de la mécanique des terres est de traiter d'un matériau remanié, c'est-à-dire mis en oeuvre selon une certaine technique, au moyen d'un certain matériel, par une certaine entreprise ou certaines personnes, en respectant certaines valeurs pour les paramètres de fabrication.

Les résultats de laboratoire ne peuvent donc être véritablement significatifs que si les éprouvettes sont confectionnées dans les mêmes conditions ou dans des conditions très voisines ; et cela n'est pas si simple.

En effet, les études de convenance de la terre sont effectuées le plus souvent à partir d'un projet architectural, mais sans que l'on connaisse encore l'intervenant qui exécutera les travaux. Il apparaît donc nécessaire que le laboratoire intervienne activement comme prescripteur dans le cahier des charges ; mais il ne faut pas non plus qu'il impose des valeurs aux paramètres de mise en oeuvre difficilement compatibles avec les possibilités des matériels employés habituellement par les entrepreneurs et avec leur pratiques constructives courantes.

La préparation des éprouvettes de laboratoire doit donc être «réaliste» Concrètement, cela signifie :

- qu'elles seront fabriquées avec la technique qui sera employée sur le chantier : pisé, adobe, bloc compressé, etc.....

- que les principaux paramètres de fabrication qui seront établis seront ceux effectivement utilisés : énergie volumique de compactage (pisé), teneur en eau et taux de paille de fabrication (adobe), contrainte de fabrication (bloc compressé), etc...

- que les temps de séchage, ou de cure, seront proches de ceux qui pourront être raisonnablement pratiqués sur le chantier.

Comme ces différents facteurs sont variables en fonction des traditions constructives locales, des matériels employés, des climats d'une part, et à défaut de pouvoir les normaliser, même à l'échelle d'un pays d'autre part, on peut essayer d'établir un certain nombre de recommandations visant à en délimiter l'étendue et à en préciser les valeurs.

Ainsi par exemple, l'énergie volumique de compactage pour le pisé, pourrait-elle être réduite à deux ou trois valeurs standard, à l'instar de ce qui a été fait jadis avec l'essai Proctor pour le compactage routier. Ou encore, pourrait-on préconiser des valeurs-types de contraintes de fabrication suivant que les outils employés pour la confection des blocs compressés seront de type manuel, mécanique léger ou mécanique avec hyper-compression. Etc....

En conclusion, l'intérêt de cette approche «réaliste» par des éprouvettes de laboratoire aussi représentatives que possible de la réalité constructive est triple :

- on connaîtra mieux, au cas par cas, les coefficients de sécurité,
- on pourra justifier plus aisément une exigence forte au niveau du contrôle,
- on contribuera ainsi à instaurer un climat de confiance technique dans le domaine des constructions en terre.

3.2.4. Capitalisation des données

Malgré les nombreuses études réalisées depuis près d'un siècle sur le matériau terre, et plus particulièrement sur le «béton de terre stabilisée», on est frappé du flou et de la relative maigreur des indications que l'on a pu en tirer sur l'aptitude de l'emploi de la terre en construction.

Cet état de fait tient à trois raisons principales :

- la grande variabilité du matériau terre ainsi que la méconnaissance de sa dimension pédologique, au moins jusqu'à une date récente, dans les laboratoires de bâtiment,
- l'éparpillement des études dans l'espace et dans le temps,

- l'absence de modes opératoires normalisés, cette absence étant elle-même en partie due au caractère trop épisodique des études.

Il en est résulté une capitalisation très insuffisante des informations et la quasi-impossibilité d'une émergence d'un savoir-terre spécifique.

Aujourd'hui, les obstacles énumérés ci-avant sont en passe d'être surmontés :

- les connexions se resserrent entre les laboratoires de pédologie et ceux de construction, même s'il reste encore beaucoup à faire,

- l'information circule beaucoup plus facilement qu'autrefois entre les laboratoires ; en particulier l'établissement d'un Comité Technique spécialisé au sein de la RILEM est un gage, à moyen terme, d'une possibilité de coordination de très nombreuses recherches restant à entreprendre et, à plus longue échéance, d'une plus grande abondance et d'une meilleure structuration des données sur les constructions en terre ;

- un certain effort de normalisation des modes opératoires est en cours au sein de la plupart des pays où les constructions en terre sont largement répandues.

L'émergence de protocoles d'essais précis au niveau national est incontestablement un grand pas en avant, même si se profile au loin le problème d'une comparaison transnationale des données issues de modes opératoires nationaux différents.

Mais à la réflexion, il semble qu'une convergence des savoirs nationaux serait plus facile à réaliser qu'une normalisation internationale de modes opératoires. Cependant, pour de nouveaux essais (érosion par exemple), il paraît rationnel de rechercher un consensus général dès le départ.

Au Maroc, la plupart des études de terre sont réalisées au sein du Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes qui a mis au point des modes opératoires homogènes pour le retrait et la résistance en compression des Produits en terre, que ceux-ci soient des adobes, des blocs compressés ou du pisé. En conséquence depuis 1990, une capitalisation des «données terre» a pu commencer.

Pour faciliter ce travail, le LPEE a innové en établissant un cadre qui permet de consigner systématiquement les données pour chaque étude ou opération de construction en terre qu'il est amené à suivre.

Ce cadre est en cohérence avec la méthodologie évoquée au paragraphe 3.2.1. et est constitué d'un ensemble de fiches qui se répartissent en trois groupes :

- avant le chantier avec :

- * une fiche «contexte»,
- * deux fiches «terre crue», l'une pour l'identification, l'autre pour la convenance,
- * une fiche «terre stabilisée» ;

- Pendant le chantier avec :

- * une fiche «contrôle matériaux»,
- * une fiche «contrôle produits et mise en oeuvre»,
- * trois fiches «contrôle ouvrages», la première concernant les zones courantes des structures verticales, la deuxième les singularités des structures verticales, la troisième les structures horizontales.

- après le chantier avec :

- * une fiche «réception»
- * trois fiches «suivi» organisées à peu de chose près comme les fiches «contrôle ouvrages».

3.2.5. Structuration des connaissances

Mais l'accumulation des données est inutile si on ne les fait pas parler, si un sens ne s'en dégage pas.

Pour ce faire, il existe deux méthodes complémentaires :

- la méthode «verticale» qui consiste à multiplier et à comparer les données de nature analogue pour en tirer des conclusions ; son efficacité est évidemment fonction du nombre de données qui seront engrangées, c'est à dire du nombre d'études qui seront effectuées ;
- la méthode «horizontale» qui consiste à comparer le maximum de données, en général hétérogènes et complémentaires, sur une ou plusieurs opérations et à mettre en évidence des correspondances significatives. Mais ces données doivent au préalable être disponibles, d'où l'utilité de cadres plus ou moins normalisés comme celui qu'a établi le LPEE.

Par ailleurs, à l'énumération des fiches du paragraphe précédent, on est frappé de voir les nombreuses connexions qui existent avec :

- la pédologie (avec les 5 premières fiches)
- l'architecture (avec les 7 dernières fiches)
- la pratique constructive à travers l'organisation du cadre en fonction de l'avancement de l'opération.

Ainsi, outre sa dimension d'ingénierie, la mécanique des terres joue un rôle de fédérateur entre deux disciplines à priori fort éloignées l'une de l'autre : une science de la terre - la pédologie - et une science de la construction - l'architecture -, dans la perspective d'un objectif commun : édifier des constructions de qualité avec le matériau local le plus répandu : la terre.

Mais il est temps maintenant de préciser le contenu de cette nouvelle discipline.

4/ CONTENU DE LA MECANIQUE DES TERRES

La mécanique des terres répond à une problématique très différente de la mécanique des sols. En effet cette dernière concerne en général :

- un matériau non-remanié,
- dans des massifs semi-infinis,
- soumis à l'action de l'eau principalement sous la forme de nappes phréatiques (de niveau souvent variable)
- qui sert de substrat à un ouvrage de construction et, pour être plus précis, qui doit en équilibrer les contraintes transmises par les fondations.

4.1. Problématique spécifique de la mécanique des terres

Au contraire, la mécanique des terres, concerne :

- un matériau presque toujours remanié,
- dans des ouvrages «minces» (en général inférieurs à 1 mètre) qui ne peuvent exister que par la vertu de la cohésion propre du matériau,
- soumis à l'action de l'eau principalement sous forme
 - * de pluie, laquelle dépend du climat, mais aussi
 - * de remontées capillaires, en l'absence d'arases étanches qu'il convient donc de systématiser, et
 - * d'eaux domestiques, lesquelles sont liées au comportement des usagers qu'il convient donc de prévoir,
- matériau qui est le constituant principal de la construction (et non plus seulement celui du terrain qui l'accueille), et qui doit en provenir presque toujours pour des raisons d'économie de transport.

Autrement dit, la problématique de la mécanique des terres s'articule autour de quatre termes :

- la pluralité des modes de mise en oeuvre
- la diversité des ouvrages que l'on peut construire,
- la sensibilité à l'eau
- la variabilité du matériau de base.

4.1.1. Pluralité des modes de mise en oeuvre

On a vu qu'une des grandes difficultés à l'émergence de la mécanique des terres tient au manque de modes opératoires normalisés, du moins à une échelle géographique suffisante.

Une des raisons de cet état de fait est la pluralité des modes de mise en oeuvre. En effet, toute étude géotechnique sérieuse exige de travailler avec des éprouvettes représentatives ; or même constituées d'une même terre, ces dernières auront un comportement mécanique différent selon qu'elles auront été réalisées à l'état «semi-sec» par compactage dynamique, ou bien par compactage statique, ou encore à l'état semi-liquide par simple moulage.

Certes, le mode de mise en oeuvre est fortement orienté par la finesse de la terre, mais souvent plusieurs modes sont possibles simultanément (par exemple pisé et bloc compressé).

D'autre part, pour un même mode de mise en oeuvre, on peut faire varier de nombreux paramètres de fabrication qu'il convient de maîtriser. Qu'il suffise de citer les plus importants :

- pour le pisé : l'énergie volumique de compactage,
- pour le bloc compressé : la contrainte de fabrication,
- pour l'adobe, la teneur en eau à la fabrication.

Toutes les études et les réglementations à venir devront tenir compte de cette pluralité des mises en oeuvre d'une part, des principaux paramètres de fabrication - et donc des caractéristiques du matériel - d'autre part. Mais d'ores et déjà, il est suggéré de se focaliser sur les trois modes majeurs (on parle ici des structures où la terre est porteuse et non de simple remplissage comme par exemple dans le cas du torchis) :

- le pisé (pour la mise en oeuvre en grandes masses),
- l'adobe (pour sa très grande universalité),
- le bloc compressé (pour son aspect «moderne»).

4.1.2. Diversité des ouvrages

La diversité des ouvrages que l'on peut construire en terre est :

- dans un premier temps, limitée par les propriétés mécaniques du matériau (résistances en traction et en cisaillement très faibles, donc pas de structures fléchies),
- dans un deuxième temps, favorisée par l'usage judicieux de sa seule résistance convenable : celle en compression, à travers tout un ensemble de structures courbes remarqua-

bles (arcs, voutains, voûtes, coupoles, etc...),

- dans un troisième temps, restreinte à nouveau par les complications constructives - et donc les surcoûts - qu'apporte en général l'emploi de structures non-droites.

La forme des ouvrages est donc une donnée fondamentale et il semble bien a priori qu'il faille distinguer

- la mécanique des terres «de base» qui comprendra l'étude du matériau, des produits et des ouvrages courants simples (en fait les structures verticales comme les murs et les cloisons),
- la mécanique des terres «de pointe» qui se consacrera à l'étude des structures complexes, notamment courbes.

Cette dernière mécanique n'est pas à négliger en raison de l'impact architectural, esthétique et psychologique des constructions intégrant de telles structures courbes. En effet, ce sont en général des édifices remarquables (bâtiments publics) ou des logements de haut standing ; et leur effet d'entraînement sur les autres constructions n'est plus à démontrer à l'instar d'autres domaines (comme l'automobile ou l'habillement). Il est raisonnable de penser que cet effet d'entraînement s'étendra à la mécanique des terres elle-même et que sa partie «pointue» tirera vers le haut sa partie «basique».

Cependant la raison commande de débiter par le commencement et de faire porter les premiers efforts sur les structures les plus simples et les plus courantes, à savoir les murs et cloisons ; on s'attachera donc en priorité à mesurer la résistance de leurs composants (pour le pisé, l'adobe et le bloc compressé) et à maîtriser les problèmes d'éclatement et d'excentrement des charges.

4.1.3. Sensibilité à l'eau

La variation de plusieurs caractéristiques importantes - et pas seulement mécaniques - du matériau terre avec la teneur en eau est un des problèmes clés du comportement et de la durabilité des constructions en terre.

En effet, en partant d'un matériau sec (c'est-à-dire dont la teneur en eau résiduelle n'est pas supérieure à 2 ou 3 % pour les terres les plus fines, et est bien sûr inférieure à ces valeurs pour les terres plus grossières), un accroissement de la teneur en eau va conduire à :

- un gonflement (sur le plan dimensionnel),
- une chute, surtout au delà d'un certain seuil, de la cohésion et de l'angle de frottement interne du matériau (sur le plan géotechnique), et par suite
- une chute de la résistance en compression (sur le plan mécanique) et

TABEAU 4

TPOLOGIE DES ACTIONS DE L'EAU EN PHASE LIQUIDE SUR LES CONSTRUCTIONS EN TERRE

Type du contact de l'eau en phase liquide avec le matériau terre		DYNAMIQUE		STATIQUE	
		Type d'action	Remède approprié	Type d'action	Remède approprié
PERMANENT (ou quasi-permanent)	Faible quantité	Actions n'existant pas dans le domaine du bâtiment**		Remontées capillaires	Arases étanches
	Grande quantité			Action n'existant pas dans le bâtiment, (sauf à construire dans la nappe phréatique !)	
EPISODIQUE	Faible quantité	Pluie faible	Enduit extérieur	Infiltration accidentelle - d'une terrasse - d'une pièce d'eau	Étanchéité spéciale de toiture ou de pièce d'eau
	Grande quantité			Pluie intense	Bardage extérieur

** Dans le domaine des travaux publics, les digues en terre, rentrent dans cette catégorie. Les protections ont évolué au cours des siècles des perrés hourdés au mortier de chaux jusqu'aux géomembranes.

- une augmentation sensible de l'érodabilité (sur le plan de la durabilité).

Par conséquent, la maîtrise de la teneur en eau dans le matériau est la condition principale de la viabilité des constructions en terre.

Or s'il semble bien que l'eau en phase vapeur ne soit pas suffisante pour faire franchir au matériau terre le seuil de teneur en eau au delà duquel ses caractéristiques géotechniques sont profondément affectées, il n'en est pas de même de l'eau en phase liquide dont il convient de se protéger avec le plus grand soin.

La logique constructive invite alors à faire plusieurs distinctions selon le mode d'action de l'eau (cf tableau 4). Celle-ci peut en effet avoir un contact avec la terre :

- dynamique ou statique (aspect cinétique)
- permanent ou épisodique (aspect temporel)
- important ou restreint (aspect quantitatif)

Il en résulte que l'on peut classer les contacts entre l'eau liquide et le matériau des constructions en terre en huit catégories; et pour chacune de celles-ci, on peut préconiser une disposition constructive permettant de prévenir ce contact et, par suite, d'éviter les désordres qui risquent d'en résulter à plus ou moins long terme.

L'approche présentée est une approche constructive qui privilégie les protections périmétriques. Il n'est pas inutile de rappeler qu'il en est une autre qui privilégie la protection interne ou volumétrique par transformation des caractéristiques du matériau terre dans le sens d'une insensibilisation plus ou moins poussée aux actions de l'eau.

Cette transformation a pour nom générique «stabilisation», et les produits qui permettent la désensibilisation sont en général des liants hydrauliques : chaux et/ou ciment. Cependant, compte-tenu de l'importante épaisseur relative des structures en terre d'une part, du fait que ces structures sont presque toujours pleines d'autre part, les volumes des stabilisants employés sont importants et l'économie de cette approche «béton» du matériau terre est très discutée.

4.1.4. Variabilité du matériau terre

Les constructions en terre se heurtent enfin à une extrême variabilité du matériau de base qui n'en facilite pas l'emploi. Certes, la pédologie permet de réaliser des classifications, mais le lien avec la géotechnique n'en est qu'à ses balbutiements.

Depuis de nombreuses années, il existe des essais d'identification efficaces : granulométrie-sédimentométrie, limites d'Atterberg, analyse minéralogique, analyse chimique avec, en particulier, la mesure des taux de matière organiques, de sulfates et de chlorures.

Cependant les deux derniers types d'analyses demandent un matériel assez sophistiqué et un personnel très qualifié. C'est pourquoi l'apparition récente de l'essai au bleu de méthylène (qui est rapide, simple, bon marché et qui semble permettre, dans l'état actuel des connaissances, une certaine quantification de l'activité des argiles liée à leur minéralogie) fait figure de petite révolution dans le milieu des laboratoires de géomatériaux. Couplé avec l'essai de sédimentométrie rapide «que l'on effectue au moyen d'analyseurs de type Sédigraph), il permet en effet de calculer un indice appelé «activité de bleu» qui semble présenter, selon les premières études* des corrélations étonnantes avec les deux grands paramètres géotechniques : cohésion et angle de frottement interne, qui conditionnent comme on l'a vu l'existence même des constructions en terre.

Quant aux analyses chimiques, elles perdent de leur importance à mesure que l'approche constructive - ou périmétrique - prend le pas sur l'approche «béton» et que les réactions secondaires de ciment ne sont plus à craindre avec le matériau, puisqu'on ne stabilise carrément plus ce dernier.

Ainsi, on tend aujourd'hui à construire le plus possible avec la terre locale sans la traiter, sauf véritable nécessité, et à s'affranchir de sa variabilité grâce à des dispositions constructives appropriées.

4.2. Grands thèmes de la mécanique des terres

Pour répondre aux buts qui lui ont été assignés, la mécanique des terres a à se développer selon trois grandes directions :

- l'étude du comportement mécanique
- l'étude des paramètres de constructivité
- l'étude de la durabilité

4.2.1. Comportement mécanique

Parmi tous les travaux réalisés jusqu'à ce jour, c'est sans doute cet aspect qui a le plus retenu l'attention des chercheurs. Dans ce qui va suivre, on ne prétend pas être exhaustif ; tout au plus voudrait-on présenter les grands axes des recherches que l'on entrevoit a priori et, de cette

* «Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil» par Danielle Laurin, Bulletin de liaison des LPC, n° 160, Février-Mars 1989, 13p.

façon, contribuer à la préparation des travaux à réaliser par exemple sous forme de thèses, de programme de travaux de fin d'études, etc....

Suivant la méthode indiquée par Monsieur Talobre, on peut subdiviser les études en deux parties:

- celles de nature théorico-expérimentale qui ne font pas intervenir, ou seulement de façon incidente, le mode de mise en oeuvre de la terre,
- celles qui touchent la dimension pratique et qui intéressent spécifiquement telle technique, voire tel matériel, de fabrication et/ou de mise en oeuvre.

4.2.1.1. Etudes théorico-expérimentales

Par ordre d'urgence, on peut citer :

a/ La mesure fine de la teneur en eau dans les éprouvettes en terre, y compris celles contenant des éléments grossiers comme celles en pisé.

En effet beaucoup d'études graviteront autour de la variation des caractéristiques géotechniques et mécaniques avec la teneur en eau et il faut pouvoir disposer (de façon simple, c'est-à-dire rapide et peu coûteuse) :

- d'éprouvettes à teneur en eau homogène dans tout leur volume,
- d'outils permettant de contrôler qu'il en est bien ainsi.

Contrairement à ce que certains pourraient croire, ceci n'est pas une étude académique. De fait, il n'est pas si facile d'obtenir dans une éprouvette de terre une teneur en eau homogène fixée à l'avance (si ce n'est la teneur en eau résiduelle à l'état «sec», mais son intérêt en sera vite épuisé). Car l'expérience montre qu'en fonction d'ambiance extérieure, le coeur est souvent plus humide que le périmètre de l'éprouvette (en phase de dessiccation) ou plus sec (en phase d'humidification), et que l'équilibre n'est pas si facile à tenir, surtout pour des teneurs en eau relativement élevées.

b/ Cette question étant supposée réglée, il conviendra de résoudre un problème géotechnique et mécanique fondamental : comment évoluent la cohésion c et l'angle de frottement interne Φ , la résistance en compression C et la résistance en traction T , avec la teneur en eau (et ceci pour chaque mode principal de mise en oeuvre : pisé, adobe et bloc compressé, et pour chaque grande valeur du paramètre principal de fabrication : énergie volumique de compactage, teneur en eau de fabrication, contrainte de fabrication) ?

On ne peut plus se contenter en effet d'une résistance (en compression) «sèche» et d'une résistance «humide», sans mieux préciser ces états. D'abord parce qu'une telle approche revient à éliminer la terre crue non-s'ablissée, ce qui n'est raisonnable ni pratiquement, ni économiquement, ensuite parce que le chercheur ne peut que s'intéresser à un phénomène dont on sait qu'il est hautement non-linéaire.

Les quatre paramètres évoqués plus haut évoluent peu avec W jusqu'à un certain seuil à partir duquel leurs valeurs diminuent très rapidement. Quel est ce seuil ? A quelle distance de celui-ci doit-on se placer pour rester en sécurité raisonnable ? Et peut-on déterminer un coefficient de sécurité ? Comment évolue ce seuil lui-même avec le taux de stabilisation d'un liant donné. Et plus fondamentalement, comment expliquer cette évolution des valeurs des paramètres avec la teneur en eau ?

On retrouve ici toute une interrogation actuelle, et pas seulement au Maroc, sur le comportement des sols partiellement saturés ; mais ici la problématique est toute différente puisqu'il s'agit d'un matériau remanié conformément à certains paramètres constructifs.

c/ On pourra ensuite s'attaquer à un thème d'une grande importance pratique pour les laboratoires : la corrélation entre les paramètres géotechniques (cohésion c et angle de frottement interne Φ) d'une part et les paramètres mécanique (résistance en compression C et en traction T) d'autre part. En effet c et Φ ne peuvent être mesurés qu'à travers des essais de cisaillement qui ont pour inconvénient de demander un matériel particulier, d'être relativement longs et par suite assez coûteux, ce qui limite leur emploi.

Ne pourrait-on pas les appréhender à travers l'essai de compression et un essai de traction approché («brésilien» par fendage d'éprouvettes cylindriques ou par «flexion d'éprouvettes parallélépipédiques) qui sont beaucoup plus simples à réaliser ? On emploierait alors les formules déduites des constructions du plan de Mohr :

$$\Phi = \arcsin \frac{(C - T)}{(C + T)}$$

$$\text{et } c = 1/2 \sqrt{C \times T}$$

Dans ce cas, quelle correction faut-il apporter aux résultats expérimentaux pour avoir une «bonne» valeur de T ? et dans quelle mesure ces formules restent-elles vraies quand

on augmente progressivement W à partir de la teneur en eau résiduelle ?

d/ Un autre axe de recherche, extrêmement prometteur et qui commence tout juste à être exploré, consiste à rechercher des corrélations entre des paramètres représentatifs de l'état microscopique du matériau et les paramètres géotechniques à l'échelle macroscopique.

On a déjà fait part (cf 4.1.4.) de travail en ce sens qui montrent un lien à la précision assez surprenante entre l'activité au bleu de méthylène d'une part, la cohésion et l'angle de frottement interne d'autre part. Si de tels résultats sont confirmés pour un grand nombre de terres, on tiendra une méthode d'évaluation de leur aptitude à l'emploi en construction malgré leur grande diversité naturelle, au moins à leur teneur en eau résiduelle.

Car comment évolue une telle corrélation avec l'augmentation de la teneur en eau, c'est-à-dire lorsqu'on passe de c' et ϕ à c et ϕ «plus ou moins»? Tout un champ de recherches utiles et passionnantes s'ouvre aujourd'hui; et on peut penser que l'apport de pédologues comme Madame Lautrin ne représentera pas une mince contribution à ces travaux.

e/ Il existe un autre domaine de recherches qui n'a fait l'objet jusqu'ici que de quelques travaux isolés: il s'agit du renfort fibreux et de l'étude de la dimension composite. Certes mélangée de fibres ou de paille, la terre peut évoluer, au moins pour le praticien du bâtiment, des techniques rurales peu dignes d'une approche scientifique.

Mais aidé du pédologue, le technicien du bâtiment doit surmonter ses réticences - liée à une image de marque caricaturale - car la terre-paille possède un comportement mécanique fort intéressant. Même à teneur en eau résiduelle, il n'y a pas de rupture fragile et la terre-paille se présente comme un matériau à comportement partiellement plastique.

La teneur en eau à la fabrication, le taux de paille et la préparation du mélange sont aussi des facteurs de grande importance sur la densité finale et les valeurs des paramètres géotechniques et mécaniques.

Economique, totalement locale, favorisant la sécurité de par son comportement mécanique particulier (que l'on devrait d'ailleurs approfondir jusqu'à son niveau le plus fondamental: celui de l'interaction entre la matrice argileuse et la fibre), la terre-paille mérite elle aussi toute la sollicitude du mécanicien des terres.

4.2.1.2. Etudes pratiques

D'autres études sont possibles, qui sont en relation directe avec le mode de mise en oeuvre. Là non plus, sans vouloir être exhaustif, on peut citer:

a/ pour le pisé, l'optimisation de la forme et de la section du putoir, de sa course et de la fréquence des coups, de l'épaisseur des couches; l'étude de l'interaction entre les banches et la terre compactée en faisant varier les différents paramètres précédents; etc....

Certes, de tels travaux ont déjà été menés; mais en des lieux différents (Etat-Unis et France principalement), à des époques différentes (années 50, années 80) et un effort de capitalisation et de synthèse d'une part, de communication d'autre part, reste à faire;

b/ pour l'adobe, l'optimisation de la longueur et de la rigidité de la paille, de la technique de mélange terre humide - paille afin d'avoir un matériau aussi homogène que possible; là encore, un effort de capitalisation et de diffusion des connaissances déjà acquises reste à accomplir

c/ pour le bloc compressé, la décennie 80 a vu l'aboutissement de nombreux travaux: mise au point de l'essai Proctor statique, explicitation des conditions d'un contrôle intégré de fabrication des blocs, économie de cette filière de production etc.....

Tous ces travaux plus appliqués qu'au paragraphe précédent, ont une importance économique certaine dans la mesure où ils permettront d'établir des cahiers des charges pertinents pour les fabricants de matériels, et pas seulement pour les presses de blocs de terre.

4.2.2. Etude des paramètres de constructivité

Sous cette expression un peu vague, on désigne les études susceptibles de répondre à des interrogations très concrètes des constructeurs telles que:

- comment fixer des cadres de baies, des cloisons préfabriquées, etc.... dans les constructions en terre?

- à quelle distance minimale des nus des murs (intérieurs et extérieurs) doit-on placer les ancrages?

- dans quelle mesure peut-on suspendre des objets pesants (lavabos, cumulus)?

- quelles sont les précautions à prendre pour la fixation et la protection des conduites d'eau ?

- comment encastrer des gaines électriques ?

- quelle est l'adhérence de tel enduit intérieur sur un mur en terre ?

- sa valeur ne risque-t-elle pas de varier en fonction de paramètres d'usage : hygrométrie de la pièce, chocs éventuels.... ?

- etc.....

A toutes ces questions qui sont fortement liées, on l'aura noté, aux problèmes de second oeuvre, on peut en ajouter d'autres à connotation plus mécanique et plus en relation avec le gros oeuvre.

- quelle est l'épaisseur minimale et la constitution (blocs, joints) d'une cloison en terre vis à vis d'un choc latéral ?

- dans quelle mesure tel ou tel enduit, peut-il en améliorer la résistance ?

- quelle est la charge maximale et/ou la longueur minimale d'abouts de poutres ou de linteaux sur un mur en terre construit avec telle ou telle technique ?

- compte tenu de sa sensibilité aux variations dimensionnelles, à partir de quelle reprise d'eau telle ou telle terre sera-t-elle susceptible de provoquer des désordres dans un mur ?

- ce taux d'eau, est-il inférieur à celui du seuil de perte rapide des performances mécaniques et géotechniques ?

- etc.....

Plus peut-être que les recherches fondamentales évoquées au début du paragraphe précédent, c'est la réponse aux questions pratiques et concrètes ci-avant qui conditionnera le développement des constructions en terre dans les prochaines années ; car ce sont ces réponses qu'attendent en priorité les entrepreneurs et les usagers.

Le problème de l'étude des paramètres de constructivité provient de ce qu'il s'agit de travaux à caractère principalement technologique qui requièrent des équipements spéciaux, souvent importants, et donc onéreux.

En arrière plan se profile donc un problème financier et institutionnel que les différents pays intéressés par le développement des constructions en terre n'ont pas nécessairement les moyens de résoudre.

Mais ceci est bien sûr un autre débat ; qu'il nous suffise, à notre niveau, de retenir que la recherche sur le matériau

terre ne doit pas faire oublier les constructions en terre elle-mêmes.

4.2.3. Durabilité

Il n'est pas douteux que l'érosion à la pluie de l'extérieur des murs des constructions en terre crue a fortement contribué au discrédit qui a frappé - et frappe encore - ce type de constructions.

Ce phénomène s'inscrit dans le cadre plus général de la durabilité des constructions en terre, durabilité qui est conditionnée principalement par la réponse de ces constructions aux différentes actions de l'eau.

Plus haut, on a vu quelles pouvaient être ces actions. Ici, on va passer en revue les essais qui, a priori,

devraient être mis au point pour étudier les phénomènes d'érosion et d'imbibition capillaire du matériau terre.

Mais en préambule, il convient de souligner qu'on ne part pas dans le vide, que les agronomes et les pédologues (cf bulletin de liaison des LPC, N° 133, Mars 1986) ont là encore acquis plusieurs longueurs d'avance sur les constructeurs et qu'il pourrait être utile de s'inspirer de leurs travaux (réalisés, cela va sans dire, dans une toute autre optique).

a/ Les réflexions menées à ce jour au LPEE tendent à appréhender l'érosion de la terre, qu'elle soit crue, stabilisée ou enduite, à travers trois types d'essais :

- pour le pisé, il s'agirait d'un brossage contrôlé d'éprouvettes cylindriques soumises à un courant d'eau lui aussi contrôlé. Les paramètres mesurés seraient la perte de matière brute et par unité de temps. Dans l'appareillage projeté, l'éprouvette tournerait et la brosse serait fixe ;

- pour les maçonneries d'adobes et de blocs, on effectuerait un brossage rotatif ou alternatif (contrôlé évidemment) sur un assemblage fixe constitué de blocs et joints, et soumis lui aussi à un courant d'eau contrôlé, voire à des impacts supplémentaires de gouttes. Là encore, les mesures porteraient sur la perte de matière (brute et par unité de temps) ;

- à plus grande échelle et pour les différentes techniques de mise en oeuvre, des panneaux verticaux de hauteur d'étage seraient exposés à un film d'eau, permanent ou non, ainsi qu'éventuellement à un bombardement de gouttes, les deux actions étant contrôlées. Outre les pertes de matière,

on pourrait mesurer le gradient transversal de teneur en eau et la cinétique d'humidification.

b/ L'essai précédent regroupe en fait l'étude de deux phénomènes : l'érosion et l'imbibition capillaire. Mais celle-ci peut être étudiée de façon spécifique à travers l'essai bien connu de capillarité et la mesure du coefficient c (que l'on suggère d'appeler L pour éviter des confusions avec la cohésion). Cependant, on a observé que ce coefficient croît avec le taux de stabilisation de sorte que l'on risque de tirer des conclusions erronées si on ne le couple pas avec des indications sur la performance mécanique du matériau imbibé.

4-3 Conclusion

Le panorama précédent du contenu de la mécanique des terres ne prétend pas être complet. En particulier, il pêche sans doute par deux lacunes :

- l'insuffisante manifestation du rôle des deux disciplines connexes : la pédologie et surtout l'architecture,
- l'insuffisante mise en évidence des travaux déjà réalisés, parfois depuis des décennies, aux quatre coins du monde;

En fait, il se voudrait simplement une base de départ, un cadre général à partir duquel une discussion entre experts pourrait s'établir et déboucher sur un schéma plus pertinent, car moins personnel.

5/ Conclusion générale

Si l'on veut à terme sortir les constructions en terre du secteur informel où elles se trouvent marginalisées et sans reconnaissance véritable des milieux économiques nationaux et internationaux, il faut qu'elles s'intègrent dans les grandes filières de construction et que tous les intervenants dans ces filières puissent les faire leur.

Aujourd'hui, faute d'un outil d'appréhension approprié, deux participants à l'acte de bâtir restent à l'écart des constructions en terre : les bureaux d'études et ingénieurs conseils d'une part, les bureaux de contrôle d'autre part ; et il s'ensuit que plusieurs acteurs périphériques comme les banques et les assurances hésitent à s'engager.

La mécanique des terres se voudrait cet outil par lequel les ingénieurs pourront investir la filière des constructions en terre.

A partir d'arguments épistémologiques, historiques et analogiques, on a tenté de montrer qu'il ne s'agissait pas d'une discipline «ad hoc» pour justifier les constructions en terre

aux yeux d'acteurs dont on a tout lieu de penser qu'ils sont en priori réticents.

Au contraire, en explicitant la situation, les buts, la problématique, les méthodes et le contenu de cette discipline, on espère avoir été suffisamment convainquant de sa consistance, de sa pertinence et de l'urgence de la développer. Certes, personne ne méconnaît les obstacles à ce développement, et l'éclairage retrospectif de la mécanique des sols nous fait mesurer mieux la difficulté de l'entreprise.

Si dans les années 20, la mécanique des sols a émergé, c'était à cause de la pression de la réalité économique. La densification extraordinaire des grandes villes américaines que l'on songe à la presqu'île de Manhattan à New York par exemple! sous le poids d'enjeux fonciers et économiques considérables, a été un catalyseur extrêmement puissant pour fédérer toutes les connaissances existantes (et en acquérir d'autres) dans le domaine des fondations de bâtiments.

La mécanique des terres ne bénéficie malheureusement pas d'un tel contexte pour son développement. Cette discipline intéresse au premier chef des pays qui n'exercent pas de leadership économique à l'échelle mondiale. On dit même que certains d'entre eux sont en crise.

Pourtant les enjeux, au moins sociaux, sont extrêmement importants; mais ils sont diffus aux yeux des décideurs et ils concernent en premier lieu une frange de la population mondiale sans grande influence économique.

Alors quel sera le catalyseur de la mécanique des terres ?

Une forte volonté politique dans quelques états ?

L'obstination et la curiosité scientifique de chercheurs très motivés ? L'intérêt économique de fabricants de matériels flairant de nouveaux créneaux et investissant à la hauteur des besoins en recherche-développement ? Une pression écologique et sociale de plus en plus forte sur cette planète ? Un effort institutionnel au niveau de la formation (Institut terre par exemple) et de la communication entre les laboratoires qui défrichent le terrain depuis quelques décennies (TC 96 de la RILEM) ?

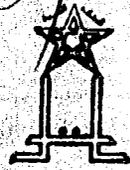
Sans doute un peu tout cela à la fois. Mais ce qui est certain, c'est que même si le développement de la mécanique des terres risque d'être nettement plus long aujourd'hui que celui de la mécanique des sols naguère, il est des ingénieurs qui estiment que les constructions en terre sont dignes d'intérêt, aussi bien au niveau professionnel qu'humain, et qui ont décidé de les développer et de les promouvoir.

69480 (5)

BORDEREAU DE SAISIE

C.N.D

MAROC



ISN	
NONAT A 110	
NAC A 090	92-0209
CODBI A 121	
COTRA A 122	
NIVUD A 131	M C
NIVSO A 132	M C

TYPREL A 141	T	G	S	R
NOAP A 142				
NACAP A 143				

CODUD	
INDEX A 010	020202
NAME A 020	

STATUT A 150	C	D	FAYS PROD. A 160	MA	TYPE BIBL. A 171	J
-----------------	---	---	------------------------	----	------------------------	---

INDICATEURS BIBLIOGRA- PHIQUES	REUNION	DICTIONNAIRE	DONNEES NUMERIQUES	THESE	TEXTE LEGISLATIF	BIBLIOGRAPHIE	CARTES INCLUSES	RESUME	NON CONVEN- TIONNEL
A 172	K	L	N	U	W	Z	Y	E	V

UNITE DOCUMENTAIRE (A/M/C)	A 120 AUTEUR ET AFFIL	MARTIN, M. / Librairie Publie d'Essais et d'etudes - Casablanca / MA.
	A 220 COLLEC TIVITE AUTEUR	
	A 230 TITRE UD	La mecanique des terres.
	A 240 A 250	TITRES TRADUITS Utiliser le bordereau 2 : données complémentaires

SOURCE : DOCUMENT GENERIQUE (M/C/S)	A 310 AUTEUR		
	A 320 COLLEC- TIVITE AUTEUR		
	A 330 TITRE DOCUM GENER		
	A 340	TITRE GENERIQUE . . . utiliser le bordereau 2 : données complémentaires	
	A 410 TITRE PUBLIC EN SERIE	Revue Marocaine du Genie Civil.	
A 420 VOLNUM	no. special	A 430 ISSN	0854-6446

NOTES D'INDEXATION

DATIN D 100	
DATSA D 110	
DATMI D 120	

FIN

النهاية

22

مشاهد

VUES