

# *Les lœss sahariens et l'amélioration de leurs propriétés géotechniques*

Cas des Matmata  
et de leurs bordures, Tunisie

## INTRODUCTION

Dans le Sud tunisien comme dans l'ensemble des zones arides du monde, les faibles précipitations constituent une grave contrainte pour la mise en valeur et la gestion de l'espace rural, dont les ressources naturelles, par ailleurs, sont plus souvent limitées.

Dans ce contexte climatique, le massif des Matmata, d'une superficie estimée à 202 500 ha, se développe sur 3 régions naturelles (LE HOUÉROU, 1959) (fig. 1) :

- les Dahars septentrionaux ;
- le massif des Matmata proprement dit ;
- les glacis de raccordement avec la plaine de la Jeffara.

Dans ce cadre, s'est accumulé et conservé, sur des épaisseurs souvent remarquables, du matériau sablo-limoneux calcaire, dit lœss des Matmata ou limon à nodules calcaires. Dans les vallées et les vallons, quasiment secs, les habitants de ces zones ont édifié, à partir de ce matériau lœssique, de petits barrages (tabias) ; ceux-ci collectent les eaux de ruissellement, plus ou moins chargées, dont ils permettent l'infiltration ; ils favorisent l'accumulation des produits de l'érosion sur des surfaces le plus souvent vouées à l'arboriculture ou à la céréaliculture (jessours). La distribution des sols dans ces microbassins est rapportée à la figure 2. Dans ce lœss quaternaire très étendu (COUDÉ-GAUSSIN *et al.*, 1983 ; M'TIMET, 1983), l'érosion hydrique se manifeste sous diverses formes (ravinement) ; lors des années exceptionnelles (1933, 1969, 1979), elle conduit à la destruction de ces petits ouvrages d'hydraulique agricole de surface, bien décrits par BONVALLOT (1980) ; de grandes masses d'eau, dévastatrices, sont ainsi libérées (BONVALLOT, 1980 ; M'TIMET, 1979).

La lutte pour la protection de ces ouvrages revêt plusieurs aspects ; en vue d'améliorer éventuellement la résistance de ces ouvrages à l'érosion hydrique, elle peut conduire, par exemple, à envisager l'addition au matériau lœssique de margine (eau et résidus organiques collectés après décantation du produit obtenu lors du premier broyage des olives pour l'extraction de l'huile). L'évaluation des améliorations apportées par une telle addition nécessite que soient d'abord connues les caractéristiques physiques, mécaniques et géotechniques du lœss et qu'elles soient, si possible, comparées aux caractéristiques mesurées du nouveau produit (lœss additionné de margine).

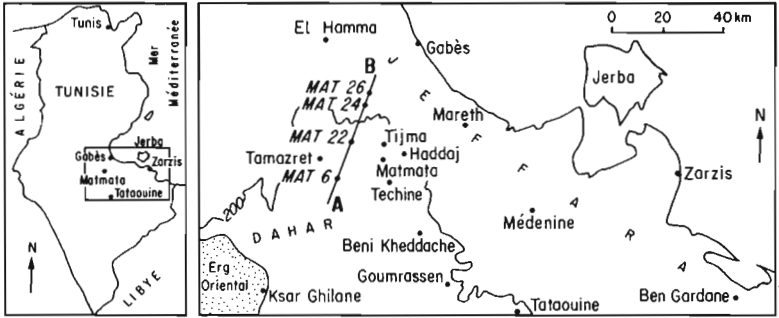


FIGURE 1 - Situation.

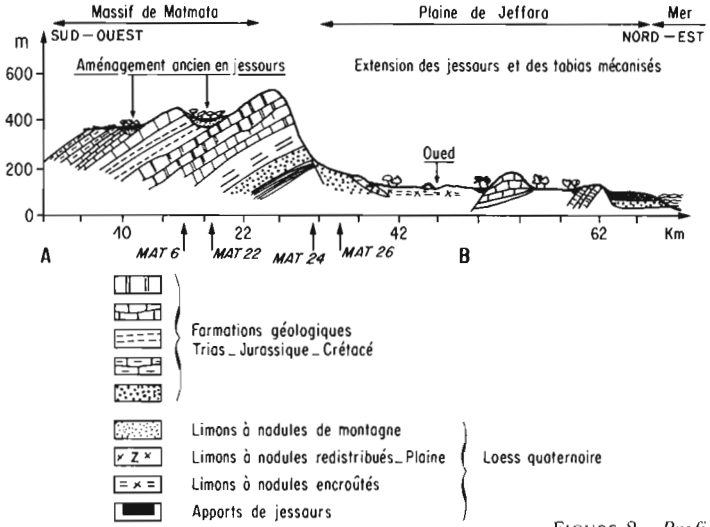


FIGURE 2 - Profil géologique et zone de contact Matmata-Jeffara.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour des matériaux loessiques dont les caractéristiques granulométriques sont rapportées au tableau I, les paramètres suivants ont été mesurés :

- la vitesse d'infiltration déterminée *in situ* par la méthode Müntz à la surface du sol et par la méthode de Porchet pour la tranche de sol ;
- les limites d'Atterberg pour l'appréciation de la consistance du sol ;
- le comportement du sol au compactage « essai Proctor » ;
- la résistance au cisaillement mesurée à la boîte de Casagrande ;
- la stabilité structurale par les tests Hénin réalisés en laboratoire ;
- la propension au ruissellement et à l'érosion, étudiée sur des placettes de 1 m<sup>2</sup> à l'aide d'un minisimulateur de pluies.

Tableau I - Granulométrie des sols avec décarbonatation

ZONE JEBEL				
MAT 6 (Secteur A)				
Horizon (cm)	Argile	Limons totaux	Sables fins	Carbonate de calcium
0 - 20	16	22	46	21
35 - 55	12	17	65	4
65 - 85	11	19	51	15
85 - 120	8	23	58	15
MAT 22 (Secteur B)				
5 - 30	10	19	66	7
50 - 70	8	20	60	5
90 - 100	17	11	53	23
130 - 150	12	11	67	12
200 - 230	10	13	51	24
300 - 330	6	20	58	14
ZONE PLAINE				
MAT 24 (Secteur A)				
5 - 40	02	21	67	10
80 - 100	11	25	37	25
150 - 170	12	20	66	2
250 - 270	04	24	48	24
MAT 26 (Secteur B)				
5 - 10	08	12	55	23
20 - 40	08	7	40	48
80 - 100	10	8	35	48
120 - 150	29	9	35	28

Une expérimentation a également été menée sur les modifications entraînées par l'addition de margine au niveau des propriétés mécaniques et géotechniques du loess de la région de Matmata-Nouvelle (plaine).

## RÉSULTATS

### Propriétés physiques, mécaniques et géotechniques du loess

#### LA PERMÉABILITÉ

Les valeurs mesurées pour le loess des Matmata sont les suivantes :  
- de 3,06 à 5,76 cm.h<sup>-1</sup> en surface (méthode Müntz) ;

- de 11,3 à 17,6 cm.h-1 en profondeur jusqu'à 1,20 m (méthode Porchet).

Le lœss apparaît donc comme un matériau assez perméable ; les valeurs fortes obtenues s'expliquent également, en partie, par la présence de nombreuses fentes latérales bien développées dans certains sols.

LES LIMITES D'ATTERBERG

Les limites mesurées varient comme suit pour ce lœss :

- limite de liquidité (Ll) de 19 à 27,5 % ;
- limite de plasticité (Lp) de 15 à 21 %.

Les valeurs de l'indice de plasticité (Ip), calculé comme la différence Ll - Lp, sont comprises entre 2,5 et 7,0, dans cette situation et selon les échantillons. Ces valeurs peuvent être comparées à celles obtenues (tabl. II), en France par exemple, pour des sols de textures différentes (BLPC, 1973 ; DEMDAMI, 1981) :

- lœss et alluvions argileuses du Sündgau ;
- formations sablo-limoneuse et limono-argileuse de la région de Narbonne.

La concordance est bonne entre les valeurs obtenues pour les lœss des Matmata et du Sündgau ainsi que pour les sols sablo-limoneux de la région de Narbonne. Les 2 autres formations présentent, quant à elles, des valeurs nettement plus élevées.

Resituées sur un diagramme de plasticité, ces valeurs indiquent bien que, aux Matmata, nous sommes en présence d'un matériau lœssique de type «silt» ou limon peu plastique. La faible capacité de rétention à l'eau, au pF 4,2, mesurée au laboratoire, est en corrélation avec la pauvreté du lœss en argile et en matière organique. De telles caractéristiques pourraient signifier que ce lœss ne présente que peu de risque de faillage ou de glissement quoique la faible pente de la courbe de liquidité atteste d'un passage brutal à l'état liquide.

Tableau II - Comportement des sols à texture variable (DEMDAMI, 1981 ; BLPC, Paris 1981)

Type de sol	L l (%)	L p (%)	I p
1. Vieux lœss ; Sündgau (France)	28,3	19,3	9
2. Sol sablo-limoneux ; Narbonne (France)	27	20	7
3. Sol limono-argileux ; Narbonne (France)	41	21	20
4. Alluvions argileuses ; Sündgau (France)	45,9	21,26	24,6
Valeurs maximales pour le lœss des Matmata (Tunisie)	27,5	21	7

L l = limite de liquidité  
 L p = limite de plasticité  
 I p = indice de plasticité = L l - L p

LE COMPORTEMENT AU COMPACTAGE

Ce test fait ressortir l'effet mécanique relatif d'un poids sur le matériau associé à de l'eau. Dans notre situation, un tel test permet, en particulier, d'évaluer les contraintes du lœss lors de l'édification des petits barrages d'hydraulique agricole déjà évoqués. C'est, en particulier, la comparaison de ces résultats avec ceux obtenus pour le matériau «amélioré» (cf. *infra*) qui permettra d'évaluer l'intérêt de ce dernier. Les divers

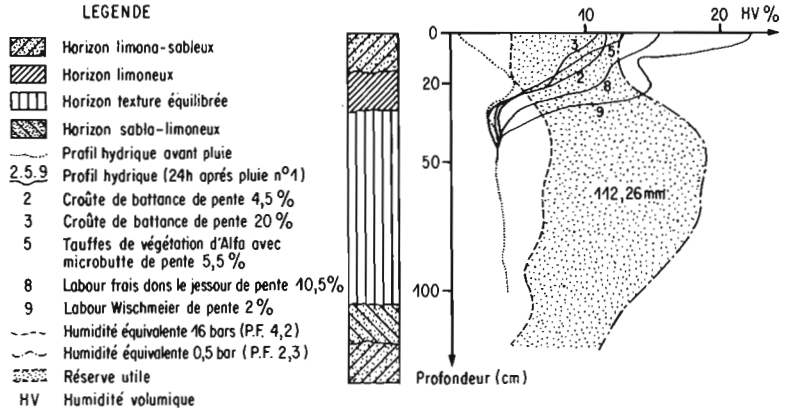


FIGURE 3 - Profils hydriques comparés des états de surface de sol (résultats obtenus au minisimulateur de pluies).

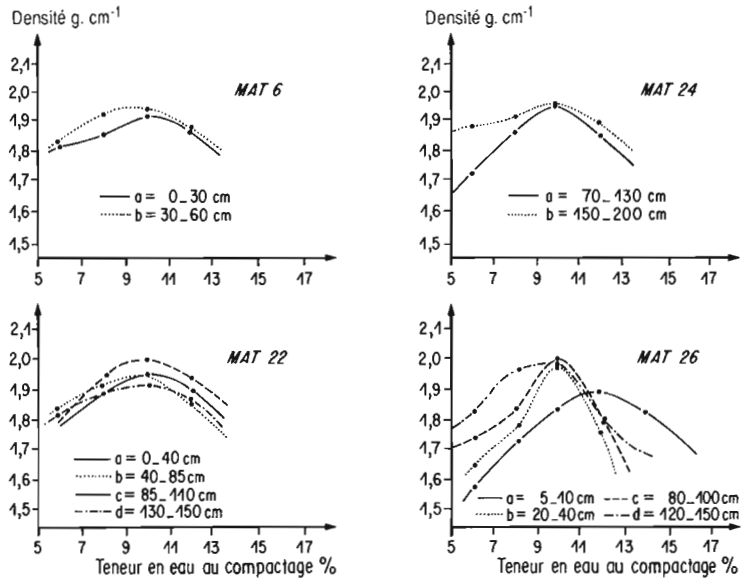


FIGURE 4 - Courbe de Proctor de différents sols sur less (profils MAT 6, 22, 24, 26).

états de surface, plus ou moins compactés, des impluviums ont des répercussions sur l'importance du ruissellement et sur celle de l'érosion en nappe ainsi que le laissent entrevoir les profils hydriques (fig. 3) réalisés lors d'essais au simulateur de pluies sur un microbassin (M'TIMET, 1987).

La densité sèche, à l'optimum Proctor, est variable d'un profil à un autre mais également d'un horizon à un autre d'un même profil. Pour les divers profils et les divers horizons étudiés cette valeur exprimée en  $\text{g.cm}^{-3}$  varie de 1,9 à 2,00 (fig. 4). La qualité et la quantité d'argile et la teneur en calcaire contribuent à élever ou à abaisser les valeurs de cette densité et la relation entre ces différents facteurs est très forte. En effet, de telles variations ont été mesurées à partir de profils de sol (MAT 6, 22, 24 et 26) assez pauvres en matière organique et par conséquent riches en calcaire (la valeur du calcaire fin, de l'ordre de 16 %, peut atteindre 22 %). Les valeurs les plus faibles de cette densité sèche ont été mesurées dans la partie amont des Matmata, où ces sols sont relativement riches en sables fins et en calcaire.

#### LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

Son calcul permet une meilleure connaissance de la stabilité des versants et de la propension du matériau étudié à l'érosion hydrique linéaire. Selon la loi de Coulomb, la résistance au cisaillement ( $\delta$  exprimée en  $\text{kg f.m}^{-2}$  répond à la formule) :

$$\delta = C + o \operatorname{tg} \phi$$

où :

C = la cohésion en  $\text{kg f.m}^{-2}$

o = la pression normale en  $\text{kg f.m}^{-2}$

$\phi$  = l'angle de frottement interne.

Des essais réalisés, à la boîte de cisaillement, sur les lœss des Matmata ont donné des valeurs de  $\phi$  comprises entre 29° et 36° (tabl. III). De fait, pour qu'un versant composé d'un matériau qui possède les caractéristiques de  $\phi$  du lœss des Matmata soit stable, il faut que son angle de versant (i) demeure inférieur à 29°. Les versants limoneux du secteur montagneux des Matmata, avec des pentes de l'ordre de 26° (qui atteignent parfois 30° et même 32°), ont un angle (i) compris entre 15° et 18° (tabl. III).

Tableau III - Résultats des essais de cisaillement sur 3 matériaux lœssiques (profils de sols MAT 6, 8 et 24)

PROFIL SUR LŒSS	PROFONDEUR (CM)	TENEUR EAU (%)	DENSITÉ SÈCHE ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	COHÉSION	ANGLE (°)
PLAINE					
	80 - 100	11	1,90	0	35
x MAT 24	150 - 170*	12	1,91	0	31
JEBEL					
	0 - 20	11	1,93	0	32
x MAT 6	35 - 55*	12	1,90	0	36
	170 - 190*	11	1,95	0	33
x MAT 8	300 - 320	12	1,98	0	29

\* Niveau rouge.

Compte tenu de cet ensemble de données, il ne peut y avoir, dans la situation des Matmata, de manifestation de l'instabilité des versants par glissement, ce qui confirme l'une de nos interprétations (*cf. supra*). De fait, dans la nature, on n'observe que le développement de griffes d'érosion et de ravines profondes.

#### LA STABILITÉ STRUCTURALE

Selon leur stabilité, les matériaux réagissent différemment lorsqu'ils sont placés en contact avec de l'eau ; les agrégats, qui peuvent former l'essentiel d'un matériau donné, se détruisent sous l'effet de certains processus tels que le gonflement, la dispersion ou l'explosion, lors de la pénétration de l'eau (BAVER, 1956 ; HÉNIN *et al.*, 1958). Les résultats du traitement à l'alcool, à l'eau ou au benzène (méthode Hénin) indiquent les pourcentages d'agrégats de taille moyenne qui sont stables (tabl. IV). Outre que les agrégats sont plus détruits au benzène ou à l'eau qu'à l'alcool, il apparaît à la lecture de ce tableau que les pourcentages d'agrégats stables sont jusqu'à 5 fois plus élevés en plaine que dans le secteur montagneux (zone Jbel). Comme dans la méthode Hénin les sables grossiers sont soustraits, ceci paraît dû surtout à la richesse relative du matériau de plaine en carbonates et en matière organique, ce qui entraîne une meilleure cohésion des agrégats à l'état humide (*cf.* fiches d'analyse MAT 6 et 26 en annexes). De ces données, il est possible de déduire un indice de stabilité structurale (Is) de ces agrégats. Pour le secteur Jbel (en amont) les valeurs de  $\log_{10} I_s$  sont supérieures à 1 ce qui traduit une mauvaise stabilité structurale. En plaine (aval), les valeurs de  $\log_{10} I_s$  restent égales ou inférieures à 0,8 et ces faibles valeurs sont révélatrices d'une bonne stabilité structurale. Dans le secteur Jbel, où la stabilité structurale est faible à moyenne, la pellicule de battance omniprésente en surface accroît le ruissellement et réduit donc les risques.

Tableau IV - Pourcentages d'agrégats, de taille moyenne, restés stables après traitement à l'alcool, à l'eau ou au benzène (M'TIMET, 1983)

MATÉRIAU	ZONE JBEL (amont)		ZONE PLAINE (aval)	
	MAT 28 (25-80 cm) rouge	MAT 28 (130-200 cm) beige	MAT 26 (20-40 cm)	MAT 83 (20-40 cm)
Alcool	2,50 %	2,5 %	14,5 %	1,6 %
Eau	1,25 %	2,1 %	8,2 %	4,8 %
Benzène	1,00 %	2,0 %	4,5 %	2,6 %

#### L'ÉRODIBILITÉ

Conscient de l'importance des organisations pelliculaires superficielles et des états de surfaces (HILLEL, 1960, 1964 ; VALENTIN, 1981 ; ESCADAFAL *et al.*, 1986) sur les régimes hydriques du sol et sur l'érodibilité, nous avons effectué des mesures à l'aide d'un simulateur de pluies (ASSELINE et VALENTIN, 1978) sur un microbassin du secteur Haddaj-Tijma (fig. 1) représentatif des glaciis loessiques du Pléistocène supérieur de la région.

Le protocole prend en compte :

- les pluies de référence (P1, P2,, P3) dont l'intensité (I en mm.h<sup>-1</sup>) et la hauteur (H en mm) sont déterminées suite à l'interprétation des données climatiques disponibles dans la région (stations de Matmata et de Gabès) ;

- les types de sols et d'utilisation du sol retenus, considérés comme les plus représentatifs dans la région (M'TIMET, 1987) où les secteurs montagneux (à forte pente) sont dominés par une végétation steppique souvent dégradée et où les plaines sont généralement cultivées (céréaliculture) ou plantées (arboriculture).

Les valeurs de l'ensemble de ces variables prises en considération sont rapportées au tableau V, de même que les résultats relatifs à :

- la hauteur de pluie infiltrée (W en mm) ;

- le coefficient de ruissellement «efficace» (Kre %) calculé selon la formule :

$$Kre : \frac{I_r}{P_e}$$

où :

I<sub>r</sub> = lame ruisselée (mm)

P<sub>e</sub> = pluie efficace (mm) ;

- le coefficient de ruissellement (Kru %) ;

- l'érodibilité (en kg.ha<sup>-1</sup>).

Il ressort assez nettement de cet ensemble de données que :

- la pluie efficace (proportion des hauteurs de pluies précipitées qui se sont réellement infiltrées), qui n'atteint que 20 % sur la croûte de battance (avec forte pente), atteint jusqu'à 80 % dans le labour ;

- les fortes averses n'engendrent pas, *a priori*, les fortes infiltrations et les pluies d'intensités inférieures à 80 mm.h<sup>-1</sup> sont les plus bénéfiques ;

- le coefficient de ruissellement (Kru %) atteint 79,7 % sur la croûte de battance (à forte pente) ; la valeur la plus faible est celle obtenue sur le labour traditionnel en plaine. Dans ce dernier cas, le ruissellement est même inférieur à celui mesuré sur le labour «Wischmeier». Le ruissellement maximal dépend également des états de surface, de la pente, de la technique culturale ainsi que d'un certain nombre d'autres facteurs non étudiés ici : état hydrique initial, direction des labours, type et recouvrement de la végétation naturelle en place, etc. (FLORET *et al.*, 1989) ;

- il n'y a pas de relation simple et étroite entre l'importance du ruissellement et la quantité de sol érodé ; celle-ci peut être accrue ou diminuée en fonction d'autres variables : état du surface, pente, etc. L'érosion, qui varie ici de 0,188 à 17,9 t.ha<sup>-1</sup>, dépend donc essentiellement de l'organisation superficielle, de la couverture végétale et de l'état hydrique initial. Ainsi, si nous considérons 2 états, un labour traditionnel et une croûte de battance (à 20 % de pente), ils présentent respectivement des Kru de 18,9 % et de 79,7 % et une érosion de 479 kg.ha<sup>-1</sup> et de 522 kg.ha<sup>-1</sup>. Exprimés en kilogrammes de produits érodés par millimètres d'eau ruisselée, nous obtenons respectivement 28 kg ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> et 8 kg ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> de pluie ruisselée, soit une variabilité de 1 à 3,5. Tous ces processus d'érosion sont confirmés à l'échelle des ouvrages de petite hydraulique agricole par l'importance de l'alluvionnement, surtout en années pluvieuses, à l'aval du barrage.



Tableau V - Résultats globaux des simulations de pluie à Haddaj-Matmata

État des surfaces	Pente (%)	Réf. I1	INTENSITÉ (mm.h <sup>-1</sup> )					HAUTEUR (mm)				Érodibilité kg.ha <sup>-1</sup>
			I2	I3	I4	I5	Précip. (H)	Infiltr. (W)	Kre %	Kru %		
Surfaces très caillouteuses avec gravillons	20	P1	21,0	30,2	84,1	-	-	33,8	10,6	73,4	68,7	1 086
		P2	30,4	60,0	-	-	-	25,1	5,4	81,7	78,5	338
		P3	120,0	-	-	-	-	30,0	9,1	72,8	69,7	65
		Total	-	-	-	-	-	88,9	25,1	75,9	72,3	1 489
Croûte de battance	4,5	P1	20,0	31,6	79,2	0,1	79,2	35,6	18,6	52,63	47,7	412
		P2	29,8	1,0	29,8	60,4	-	25,7	6,3	76,9	75,5	371
		P3	118,5	-	-	-	-	29,6	4,6	86,2	84,4	949
		Total	-	-	-	-	90,9	29,5	71,9	69,2	73,2	
	20	P1	21,0	31,3	83,0	-	-	33,9	9,4	79,2	72,3	224
		P2	30,0	61,6	-	-	-	25,4	6,4	79,1	74,7	83
		P3	125,4	-	-	-	-	31,4	2,5	95,3	92,1	275
		Total	-	-	-	-	-	90,7	18,3	84,5	79,7	582
Labour frais dans le jessour	10,5	P1	20,0	38,4	78,2	-	32,2	32,2	0,0	0,0	0,0	0,0
		P2	31,0	60,0	-	-	26,3	24,5	12,8	12,8	6,9	0,0
		P3	122,4	-	-	-	30,6	15,4	52,7	52,7	49,8	479
		Total	-	-	-	-	89,1	72,1	21,8	21,8	18,9	479
Labour 2 Wischmeier		P1	19,6	30,0	81,2	61,6	-	48,2	38,4	43,3	20,3	201
		P2	81,2	61,6	30,0	48,2	-	19,4	10,9	47,4	43,5	0,0
		P3	29,8	64,2	-	-	-	27,1	24,0	28,5	11,2	0,0
		P4	119,2	-	-	-	-	29,8	3,6	92,5	87,9	402
Total	-	-	-	-	-	124,5	76,9	52,9	40,7	603		
Touffes de végétaux d'alfa avec microbuttes(T1)	5,5	P1	20,1	29,6	84,0	-	-	33,1	18,5	47,4	44,1	188
		Total	-	-	-	-	-	33,1	18,5	47,4	44,1	188
Croûte de battance + T. végétale peu dense	11	P1	20,1	29,6	84,0	-	-	33,4	15,6	56,7	53,4	279
		P2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		P3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Total	-	-	-	-	-	33,4	15,6	56,7	53,4	279
Sol battu nu 9		P1	20,2	30,1	80,4	-	-	32,7	11,9	70,2	63,6	345
		P2	42,2	29,7	59,2	-	-	27,5	8,7	73,0	68,2	327
		P3	129,0	-	-	-	-	32,3	3,2	92,9	90,1	395
		Total	-	-	-	-	-	92,5	23,8	78,7	73,7	1367
Croûte de battance + T. végétale peu dense (T3)		P1	20,4	30,5	81,2	-	-	32,6	22,7	30,8	30,5	182
		P2	31,4	59,2	-	-	-	25,3	9,5	66,3	62,4	97
		P3	122,4	-	-	-	-	30,6	5,1	89,7	83,2	549
		Total	-	-	-	-	-	88,5	37,3	62,2	58,7	828

## Effet de l'addition de margine sur les propriétés géotechniques du loess

Les récentes expériences (SELMENE et BOUAZIZ, 1982 ; FRIAA, 1983) réalisées sur la margine, à l'École nationale d'ingénieurs de Tunis (Énit) ont démontré que ce sous-produit de l'oléiculture, peut être valorisé par son utilisation en vue d'améliorer les propriétés géotechniques du loess utilisé pour la création des routes et des pistes rurales. À partir de là, l'idée de l'appliquer également à la consolidation des levées de terre des ouvrages de petite hydraulique nous a paru intéressante pour tenter de réduire les risques de destruction (*cf. supra*).

L'addition de margine (dans la proportion de 13 à 14 %) a entraîné, en particulier au niveau du comportement au compactage et de la résistance au cisaillement, quelques améliorations, que nous allons examiner.

### LE COMPORTEMENT AU COMPACTAGE

Les résultats rapportés au tableau VI (à comparer avec ceux du tableau III, obtenus pour les matériaux originels) attestent d'une amélioration de la cohésion qui est passée de 0 à 5,4 %.

Tableau VI - Caractéristiques géotechniques du loess additionné de la margine (effectués à l'Énit)

PROFIL SUR LOESS	PROFONDEUR TENEUR EN MARGINE (%)	OPTIMUM PROCTOR SÈCHE g.cm <sup>-3</sup>	DENSITÉ	COHÉSION	ANGLE (°)
Plaine (aval)					
MAT 26	0 - 20	12,5	1,77	4,5	62
	20 - 40	12,5	1,85	4,5	60
Jebel (amont)					
MAT 28	50 - 70	13	1,86	2,8	56
	70 - 90	12,5	1,87	3,8	60
MAT 82	10 - 30	13,1	1,85	3,5	62
	30 - 50	14	1,87	5,0	64
Sol sableux sans margine (environs de Tunis)					30 - 40°
Formation argileuse sans margine (environs de Tunis)					70 - 80°

### LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

Les valeurs de l'angle  $\phi$  (tabl. VI et fig. 6) sont à comparer à celles obtenues sur les matériaux originels (tabl. III). Il est aisé de s'apercevoir que, par addition de margine,  $\phi$  est ainsi passé de valeurs comprises entre 29° et 35° à des valeurs comprises entre 56° et 66°.

Il ressort de ces améliorations que la margine peut être utilisée avec profit dans la réalisation d'ouvrages en terre compactée et son addition au lœss permet sans nul doute de gagner à la fois sur l'emprise des ouvrages, sur le volume de terre nécessaire à leur confection et sur leur résistance au ravinement.

## CONCLUSIONS

Depuis 1980, un projet de lutte contre l'érosion sur les lœss des Matmata a été mis en œuvre ; il concerne également ces microbarrages, en terre compactée et consolidés par des pierres, qui barrent les petites vallées et qui permettent, par l'accumulation des eaux et des terres, le développement de la céréaliculture et de l'arboriculture.

Diverses propositions ont été faites :

- protection des pentes fortes, à matériau lœssique épais, contre l'érosion par la mise en défens (si la végétation naturelle existe) ou le reboisement ;
- construction de terrasses ;
- intensification des plantations fruitières derrière les ouvrages ;
- construction ou creusement de citernes de captage des eaux de ruissellement qui, en outre, pourront être utilisées pour l'arrosage des plantations.

À ce faisceau d'actions, nous ajoutons désormais celle, en cours, qui consiste en l'addition de margine aux terres de remblais utilisées pour la construction des microbarrages. Nous espérons que la connaissance, à approfondir, de l'intérêt de la margine contribuera à résoudre les graves problèmes du ruissellement et de l'érosion qui, en zone aride tunisienne, accentuent dangereusement le déficit en eau et accroissent d'autant la difficulté pour les êtres vivants de s'adapter à la sécheresse.

---

A. M'Timet : *pédologue*, ministère de l'Agriculture, Direction des sols, Tunisie

---

## BIBLIOGRAPHIE

- ASSELIN (J.) et VALENTIN (C.), 1978. - Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 15 (4) : 321-349.
- BAVER (L. D.), 1956. - Soil physics. J. Wiley and Sons, New York, Chapman and Hall, London 3<sup>e</sup> ed. XVIII, 489 p.
- BOIFFIN (J.), 1984. - La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse doct. ing. Paris 1na, 320 p.
- BONVALLOT (J.), 1980. - Comportement des ouvrages de petite hydraulique dans la région de Médénine. Tunisie du Sud ES 161 - Division des sols, Tunis.
- BLPC (Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées), 1973. - Remblais sur les sols compressibles. Paris, n° spécial.
- COUDÉ-GAUSSIN (G.), OLIVE (P.) et ROGNON (P.), 1983. - Datation des dépôts lœssiques et variations climatiques à la bordure Nord du Sahara algéro-tunisien. *Rev. géol. dynam. et géol. phy.*, vol. 24n, fasc. 1 : 61-73, Paris.
- DEMDAMI (L.), 1981. - Étude géotechnique des sols du Sündgau. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, univ. Paris-VI, 162 p.
- DEPLOEY (J.), 1983. - Runoff and rill generation on sandy and loamy top soil. *Z. Geomorph.*, NP 46 : 15-23.
- DUCHAUFOR (P.), 1970. - Précis de pédologie. Masson, Paris, 481 p.

- EL AMANI (S.), HADRI (H.), CHABBI (A.), M'TIMET (A.) et MAMOU (A.), 1984. - Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie, 67 p. CRGR, Tunis.
- ESCADAFAL (R.), M'TIMET (A.) et ASSELINE (J.), 1986. - Étude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride (Bir Lahmar Sud Tunisien). Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Direction des sols Tunis., 57 p., ES 231.
- Flanders research centre for soil erosion and soil conservation, 1985. - Assessment of soil surface sealing and crusting. Proceeding of the symposium held ineghen, Belgium, Ed. F. Callebaut, 374 p.
- FLORET (C.), M'TIMET (A.) et PONTANIER (R.), 1989. - Caractérisation écologique des régimes hydriques et de l'érodibilité des sols en zone aride. ORSTOM, Tunis, Cepe/CNRS, Montpellier, *multigr.* 44 p.
- FRIAA (A.), 1983. - Matériaux locaux en Tunisie : quelques perspectives d'utilisation en génie civil. In *Appropriate Building Materials for low Coast Housing Slon* : 190-199.
- HÉNIN (S.), 1976. - Cours de physique du sol. 2 vol. initi. *Doc. techn.* n° 28 et 29, ORSTOM, Paris, 159 p.
- HÉNIN (S.), MONNIER (G.) et COMBEAU (A.), 1958. - Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agro.*, 1 : 73-92.
- HILLEL (D.), 1960. - Crust formation in Loessial soil. 7th int. cong. soil sci. Madison : 1-33 : 330-337.
- HILLEL (D.), 1964. - Infiltration and rainfall runoff as affected by surface crusts VIIIth Intern. Congress of soil science, Bucharest, Romania, 1 : 53-62.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1959. - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. Inst. rech. sah. univ. Alger, Mémoire h.-s., 617 p.
- M'TIMET (A.), 1979. - Étude du bassin versant d'oued Métemeur (Zone aval) E. 545 - Division des sols, Tunis, 134 p. + annexes, 3 cartes h.-t.
- M'TIMET (A.), 1981. - Les limons à nodules : le matériau, les sols, la sauvegarde et la mise en valeur. *Communic. au 1<sup>er</sup> Congrès national des sciences de la terre.* Tunis 28 septembre-4 octobre 1981, 7 p.
- M'TIMET (A.), 1983. - Contribution à l'étude pédologique des limons des Matmatas (Sud Tunisien), Thèse 3<sup>e</sup> cycle. Univ. P.-et-M.-Curie, Paris, 183 p. + annexes, 7 cartes h.-t.
- M'TIMET (A.), 1984. - Sauvegarde des Oasis du Gouvernorat de Gabès (Réactualisation sommaire des données pédologiques) CRDA Gabès, Arrondissement des sols, 16 p.
- M'TIMET (A.), 1987. - Évaluation de la sensibilité des sols arides à l'érosion hydrique (étude de simulation de pluies sur les sols d'un microbassin type jessour - Matmata). Tunisie présaharienne, ES 240, 51 p. Direction des sols, Tunis.
- REMY (J.-L.), 1971. - Influence de la constitution physique des sols sur leur comportement mécanique. Signification des limites d'Atterber en matière de travail du sol. *Ann. Agro.*, n° 22, 5 : 267-290.
- SELMENE et BOUAZIZ, 1982. - Étude d'un sol traité à la margine. *Projet de fin d'études.* ÉNIT, Département de génie civil, Tunis, 38 p.
- TERAGUI (K.) et PECK (R. B.), 1961. - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Dunod Éd., Paris, 565 p.
- VALENTIN (C.), 1981. - Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de région subdésertique (Agadez, Niger). *Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau.* Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Paris, *Études et thèses ORSTOM*, 1985, 259 p.
- VAN KEULEN (H.), 1975. - Simulation water and herbage growth in arid regions. Wageningen Centre for agricultural publishing and documentation, 176 p.
- WISCHMEIER (W.), 1959. - A rainfall index o for anniversal soil - loess equation. *Agron. Eng.*, 39, 8 p.

## Annexe 1

## FICHE ANALYTIQUE

PROFIL MAT 6 Jebel													HRZ	
		9	AD SD		AD SD		AD SD							
Horizon		13												GR
Groupe		17												SG
Sous-groupe		21												FM
(Famille)		25												SR
(Série)		29												RG
(Région)		33												SAC
Numéro du sac		37												PMI
Profondeur minimale en cm		41	5		35		65							PMA
Profondeur maximale		45	20		55		85							REF
Refus		49												CDC
Granulométrie en 10 <sup>-2</sup>		53	1,2		2,1		2,9		4	15				ARG
Carbonate de calcium Tot.		57	16		12		12		14	11	21			LMF
Argile		61	6		22		5		8	5	9			LMG
Limon fin 2 à 20 µ		65	16		28		12		19	14	21			SBF
Limon grossier 20 à 50 µ		69	46		36		65		58	51	49			SBG
Sable fin 50 à 200 µ		73	T		T		T		T	T	T			CARTE
Sable grossier		13	0,14		0,07		0,08							C
Matières organiques en 10 <sup>-3</sup>		17	0,005		0,025		0,035							N
Azote		21	0,24		0,12		0,13							AH
M.O.		25												AHB
Acides humiques bruns		29												AHG
Acides humiques gris		33												AF
Acides fulviques		37	7,8		8,0		7,9							PHE
pH eau 1/2,5		41												PHK
pH chlorure de potassium		45												CAE
Cations échangeables en mé		49												MGE
Calcium Ca ++		53												KE
Magnésium Mg ++		57												NAE
Potassium K +		61	6,8		5,2		5,2							T
Sodium Na +		65	157,0		-		-							PT
Capacité d'échange T		69												PAT
Acide phosphorique en 10 <sup>-3</sup>		73	2		2		2		2	2	2	2	2	CARTE
Phosphore total PPM		13	138		138		113							PAO
Phosphore assim. Olsen		17												PAC
Phosphore ass. citrique		21	5		2		3							PRT
Éléments totaux (triacide) en 10 <sup>-2</sup>		25												BSD
Résidu		29												SI
Silice Si O <sub>2</sub>		33												AL
Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		37	27,0		27,0		20,8							FE
Fer Total Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		41												TI
Titane Ti O <sub>2</sub>		45												MN
Manganèse Mn O <sub>2</sub>		49	6,0		6,5		5,0							FEL
Fer libre Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		53												CA
en mé		57												MG
Calcium Ca ++		61	2,93		3,17		2,35							K
Magnésium Mg ++		65												NA
Potassium K +		69	48,4		41,96		46,15							PRS
Sodium Na +		73	3		3		3		3	3	3	3	3	CARTE
Structure et caractéristiques hydriques		13	14,7		9,5		13,3							PF2
pF XE 2,7		17	34,0		32,0		35,0							PF3
Saturat. %		21	5,2		4,9		5,4							PF4
pF 4,2		25	1,3		2,33		1,8							IS
Instabilité structurale log		29	2,05		1,88		1,5							PMB
Perméabilité log 10 K		33	2,9		2,3		3,3							L
Solé soluble, extrait pâte saturée en mé		37	4,4		4,1		8,5							CL
Conductivité L en m-mho/cm		41	36,6		36,8		40,0							SO4
Chlorures Cl <sup>-</sup>		45												CO3
Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		49	1,0		1,6		1,0							HCO
Carbonates CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		53	30,0		29,5		34,0							CAS
Bicarbonates HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		57	5,0		9,0		6,5							MGS
Calcium Ca ++		61	0,2		0,1		0,9							KS
Magnésium Mg ++		65	2,7		2,9		8,1							NAS
Potassium K +		69												L 10
Sodium Na +		73	4		4		4		4	4	4	4	4	CARTE

## Annexe 2

## FICHE ANALYTIQUE

PROFIL MAT 26		Horizon								HRZ										
		9																		
Plaine		15	AD	SD	AD	SD	AD	SD	AD	SD										
	Horizon	9																		GR
	Groupe	15																		SG
	Sous-groupe	17																		CR
	(Familie)	21																		FM
	(Serie)	25																		SR
	(Region)	29																		RC
	Numero du sac	35																		SAC
	Profondeur minimale en cm	37		5	20	80	120													PMI
	Profondeur maximale	41		10	40	100	150													PMA
Granulometrie en 10 <sup>-2</sup>	Refus	45		22	18	23														REF
	Carbonate de calcium	49		21	48	48	28													CCD
	Argile	55		8	11	8	24	10	22	29	6									ARG
	Limon fin 2 à 20 µ	57		3	11	2	17	2	22	2	30									LMP
	Limon grossier 20 à 50 µ	61		9	6	5	7	6	8	7	17									LMG
	Sable fin 50 à 200 µ	65		55	72	40	50	35	45	35	42									SBF
	Sable grossier	69		T	1	T	2	T	2	T	1									SBG
		73		1	1	1	1	1	1	1	1									CARTE
Matières organiques en 10 <sup>-3</sup>	Carbone	13		0,3	0,27	-	-													C
	Azote	17		0,035	0,05	0	0,01													N
	<del>Carbone M.O.</del>	21		0,51	0,46	-	-													AH
	Acides humiques bruns	25																		AHB
	Acides humiques gris	29																		AHG
	Acides fulviques	33																		AF
Acidité	pH eau 1/2,5	37		8,4	8,6	8,3	9,7													PHE
	pH chlorure de potassium	41																		PHK
Cations échangeables en mē	Calcium Ca ++	45																		CAE
	Magnésium Mg ++	49																		MGE
	Potassium K +	53																		KE
	Sodium Na +	57																		NAE
Acide phosphorique en 10 <sup>-3</sup>	Capacité d'échange	61		4,3	3,8	4,8	5,2													T
	Phosphore total PPM	65		170,0	200,0	105,0	140,0													PT
	Phosphore assim. Truog	69																		PAT
		73		2	2	2	2	2	2	2	2									CARTE
Éléments totaux (triacides) en 10 <sup>-2</sup>	Phosphore assim. Olsen	13		50,0	30,0	35,0	125,0													PAO
	Phosphore ass. citrique	17																		PAC
	<del>Phosphore ass. citrique</del> Gypse %	21		T	T	T	18,0													PRT
	Résidu	25																		RSD
	Silice Si O <sub>2</sub>	29																		SI
	Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33																		AL
	Fer total Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37		14,4	10,4	12,4	16,8													FE
	Titane Ti O <sub>2</sub>	41																		TI
	Manganèse Mn O <sub>2</sub>	45																		MN
en mē	Fer libre Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49		4,2	2,7	2,7														FEL
	Calcium Ca ++	53																		CA
	Magnésium Mg ++	57																		MG
	Potassium K +	61		2,6	1,76	1,82	2,17													K
	Sodium Na +	65																		NA
Structure et caractéristiques hydriques	Porosité en 10 <sup>-2</sup>	69		46,34	47,2	50,39														PRS
		73		3	3	3	3	3	3	3	3									CARTE
	pH <sub>NaCl</sub>	15		14,5	11,5	13,5	11,6													PF2
	pH <sub>CaCl2</sub> Saturation %	17		34,0	33,0	35,0	44,0													PF5
	pH 4,2	21		7,5	8,3	7,5	7,2													PF4
	Instabilité structurale log	25		1,6	1,6	1,9	1,49													IS
	Perméabilité log 10 K	29		1,67	1,31	1,23	-													PMB
Sels solubles, extrait pâte saturée en mē	Conductivité L en m-mhor/cm	35		0,8	1,63	0,51	2,67													L
	Chlorures Cl <sup>-</sup>	37					12,0													CL
	Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	41					30,0													SO4
	Carbonates CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	45					-													CO3
	Bicarbonates HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	49					2,1													HCO
	Calcium Ca ++	55					34,0													CAS
	Magnésium Mg ++	57					4,0													MGS
	Potassium K +	61					0,19													KS
	Sodium Na +	65					3,0													NAS
extrait un dixième	Conductivité L 1/10 en m-mhor/cm	69																		L10
		73		4	4	4	4	4	4	4	4									CARTE