

**APPLICATION DE LA PEDOLOGIE A LA CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DE QUELQUES
SOLS FINS DU SENEGAL**

**USE OF PEDOLOGY IN THE ENGINEERING CLASSIFICATION OF SOME FINE GRADED SOILS OF
SENEGAL**

ATLAN Y., Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Service géologique national), Dépt. génie
géologique, Orléans, France*

FELLER C., ORSTOM

APPLICATION DE LA PEDOLOGIE A LA CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DE QUELQUES SOLS FINS DU SENEGAL

USE OF PEDOLOGY IN THE ENGINEERING CLASSIFICATION OF SOME FINE GRADED SOILS OF SENEGAL

ATLAN Y., Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Service géologique national), Dépt. génie géologique, Orléans, France*
 FELLER C., ORSTOM

Résumé

L'utilisation des données pédologiques et en particulier des cartes pédologiques pour obtenir des informations géotechniques, est rendue en général difficile parce que les classifications géotechniques et pédologiques sont construites sur des principes différents.

L'étude en laboratoire des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de types de sols fins sélectionnés selon leur classification pédologique, a permis pour les sols sénégalais de mettre en évidence des corrélations qui rendent possible l'interprétation des unités de la classification pédologique en terme de comportement géotechnique. En plus, dans certains cas, pour des sols contenant de la montmorillonite, l'identification pédologique est plus rapide et permet mieux de prévoir le comportement géomécanique du sol que les corrélations classiques en géotechnique entre caractéristiques d'identification (teneur en eau, granulométrie, limites d'Atterberg) et comportement mécanique (essais Proctor et CBR).

Summary

The use of pedological data, and especially of pedological maps to get engineering data is difficult because geotechnical and pedological classifications do not have the same bases.

A laboratory survey of engineering characteristics of some types of fine-grained Senegalese soils chosen by taking into account their pedological classification made it possible to derive some correlation between the two classifications.

In addition, this survey seems to show that pedological identification of some type of soils as vertisol is easier and cheaper than geotechnical identification and is better correlated with mechanical properties such as CBR and Proctor tests.

Introduction

La pédologie et la géotechnique ont un même domaine d'étude en commun: le sol. Pourtant, les objectifs, les méthodes d'analyse, les concepts sont si différents dans chacune de ces disciplines, que rares sont les études routières qui tirent tout le parti possible des données pédologiques disponibles, notamment des cartes pédologiques et des classifications basées sur les caractéristiques physico-chimiques et la genèse des sols.

Une autre raison de cet état de fait est que, dans les pays développés où la technique routière a pour objet la construction de routes à fort trafic, l'application des études pédologiques est réduite puisque:

- les terrassements (déblais, remblais) sont suffisamment importants pour que le plus souvent le niveau de la plate-forme de la route ne soit pas, géométriquement, dans la frange des matériaux superficiels qui sont le domaine de la pédologie;
- le corps de chaussée est fait à partir de concassés souvent stabilisés au ciment, au bitume ou au laitier;
- l'épaisseur du corps de chaussée, couche anti-gélive éventuellement comprise, est assez grande pour absorber la majeure partie des contraintes (normales et de cisaillement) engendrées par le trafic et réduire ainsi l'influence sur la pérennité de la route de la nature du sol de plate-forme.

En pays en voie de développement, la situation est totalement différente. Le plus souvent pour des raisons économiques et d'adaptation

des structures de chaussée à un trafic relativement faible, on a:

- une route qui colle au terrain;
- un corps de chaussée fait à partir de matériaux naturels: sable, graveleux argileux, etc.;
- une épaisseur de chaussée inférieure à 40 cm.

En outre, même si des terrassements sont nécessaires, le niveau de la plate-forme reste en général dans le domaine étudié par la pédologie, car le développement des profils de sol peut atteindre plusieurs mètres du fait des processus d'altération de la roche-mère en région tropicale et équatoriale.

Des études géotechniques spécifiques ont été consacrées aux sols des pays tropicaux de l'Afrique de l'Ouest. L'examen de la littérature technique montre que deux catégories de sols ont surtout été étudiées:

- les latérites et les sols latéritiques et cela parce qu'ils couvrent géographiquement la majeure partie de l'Afrique de l'Ouest, et que les matériaux de viabilité les plus économiques sont souvent des horizons gravillonnaires des sols latéritiques (Atlas 1974; Lyon Assoc. 1971; Gidigas 1974);
- les argiles noires tropicales ou "black cotton soil" (vertisols en classification française), qui sont des sols gonflants posant de difficiles problèmes d'utilisation (Laroche 1973; Stephen 1953; Uppal 1965).

* Adresse postale: B. R. G. M., Département génie géologique, B. P. 6009, 45060 Orléans Cédex (France)

N° de l'échantillon	Classe	Sous-classe	Groupe	Sous-groupe	Famille (matériau)	Classification LCPC
TP 10 TP 11 FKM 43	Sols peu évolués	Non climatiques	D'apport colluvio-alluvial D'apport alluvial	Modal Faiblement alcalisé	Sablo-argileux Argilo-limoneux	SA A _p
TP 2 FKM 12 FKM 33	Vertisols	A drainage externe possible	A structure anguleuse	Modal	Argileux (issu de dolérite) Argileux (issu de calcaire) Argileux (issu de schiste)	A _p A _t A _f
TP 5	Sols calcimagnésiques	Carbonatés	Brun calcaire	Vertique	Argileux (marne calcaire)	A _t
FKM 89 FKM 123 FKM 200 FKM 5 TP 6 FKM 122 TP 1	Sols isohumiques	Sous pédo-climat à température élevée en période pluvieuse	Brun subaride	Brun subaride modal Brun subaride modal Brun subaride vertique Brun subaride faiblement alcalisé Brun-rouge subaride	Sablo-argileux Sablo-argileux à argilo-sableux (issu de schiste) Argileux (issu des argiles de la "formation jaune") Sablo-argileux Argilo-sableux Sablo-argileux à argilo-sableux (issu de schiste) Sableux	L _p A _p A _p L _p A _f A _f
FKM 30	Sols brunifiés	Des pays tropicaux	Brun eutrophe	Hydromorphe	Argileux	A _p
NN HP FO NS 1 TP 14 PMF 12 TP 15 TP 9 TP 14 NGT TP 17 TP 13 PMF 9 PMF 1	Sols à sesquioxides de fer	Sols ferrugineux tropicaux	Peu lessivé Lessivé	Modal Modal sans tache A taches et concrétions Hydromorphe à pseudogley	Sableux faiblement argileux Sablo-argileux à argilo-sableux (faciès à horizon gravillonnaire à faible profondeur) Sablo-argileux (faciès rouge) Sablo-argileux à argilo-sableux (faciès beige) (faciès rouge) Sablo-argileux (faciès beige) Argilo-sableux (faciès beige) Argileux	SA SA L _p SA A _p A _p L _p SA L _p A _p A _p A _p
FKM 142 FKM 91 FKM 32 FKM 37	Sols hydromorphes	Minéraux	A pseudogley	A nappe perchée A nappe perchée et faiblement alcalisée	Sablo-limoneux Sableux Argilo-sableux Argilo-Sableux	A _p SA A _p A _p
FKM 36	Sols sodiques	A structure dégradée	A horizon B	A structure en colonnettes de l'horizon B	Argilo-sableux	A _p

Tab. 1: Classification des sols étudiés

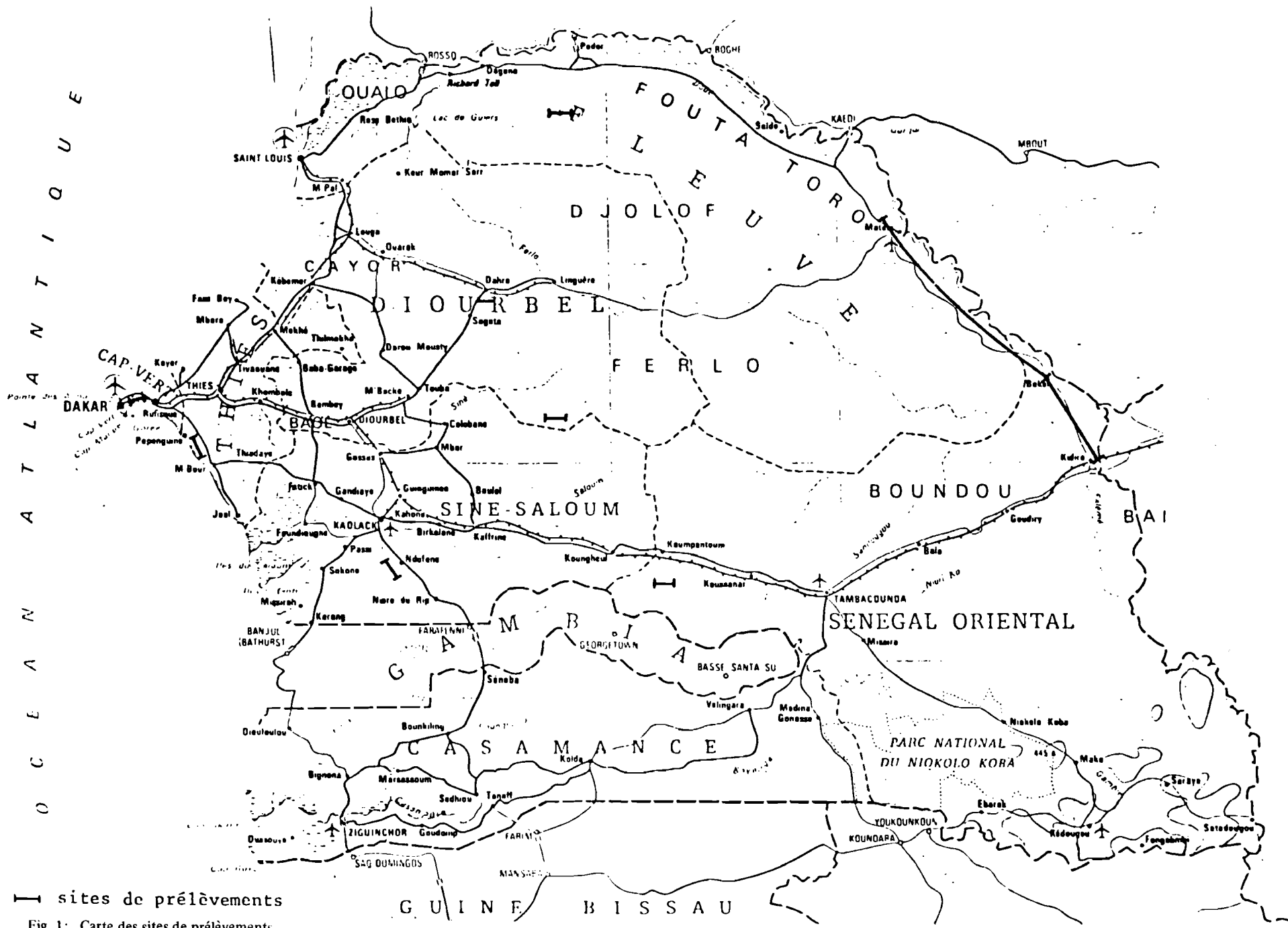


Fig. 1: Carte des sites de prélèvements

Dans les études les plus récentes, la genèse des sols est utilisée comme un des critères permettant de comprendre leur comportement mécanique. Mais il est rare que cette meilleure compréhension conduise explicitement à des recommandations pratiques. L'étude le Lyon Assoc. signale bien cette difficulté en notant que "les connaissances scientifiques détaillées sur les processus d'altération sont utiles à l'ingénieur en génie civil à peu près de la même manière que la connaissance de la chimie du ciment est utile au développement des principes et de la pratique du béton armé".

L'étude présentée ici s'est donnée comme objectifs de guider le géotechnicien qui souhaite utiliser les données pédologiques disponibles au Sénégal. La méthode employée a été:

- 1) d'étudier en laboratoire les caractéristiques physico-chimiques des types de sols fins (sélectionnés en fonction de leur classification pédologique, leur texture, la nature de leurs minéraux argileux, de façon à être représentatif de la majorité des sols rencontrés au Sénégal) et de réaliser parallèlement des essais géotechniques classiques d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg) et de portance (CBR);
- 2) de présenter et ordonner ces résultats expérimentaux en établissant les corrélations éventuelles entre données physico-chimiques et données géotechniques;
- 3) de définir alors comment doivent être groupées les unités de la classification pédologique pour obtenir des catégories de matériaux ayant des propriétés géotechniques semblables.

Sélection des échantillons de sols étudiés

Le tableau 1 donne la classification pédologique des sols étudiés, et la figure 1 donne les sites de prélèvement. La classification utilisée est la classification française (CPCS 1967). On pourra, pour juger de l'extension, au Sénégal, des zones couvertes par ces sols, se reporter à la carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000 (Maignien 1965). En fait, ces sols couvrent environ 60 % du territoire Sénégalais, ce qui justifie en dehors de toute considération méthodologique, leur étude détaillée.

Les règles et les méthodes de la classification pédologique française sont données en particulier par Aubert (1965), Aubert & Boulaine (1972), Duchaufour (1970).

La classification géotechnique utilisée est celle du LPC (France). Les méthodes d'essais sont décrites par Peltier (1969).

L'examen de la démarche du classificateur en pédologie et géotechnique fait ressortir les faits suivants, qui sont essentiels pour comprendre en quoi ces deux systèmes peuvent être complémentaires:

- la classification géotechnique est basée sur quelques caractéristiques propres du matériau. Celui-ci est testé essentiellement par des essais physiques et mécaniques. Peu importent l'origine et l'histoire de ce matériau;
- la classification pédologique, quant à elle, prend en compte l'ensemble des caractères intrinsèques du sol permettant d'en comprendre sa formation et son évolution. Parmi ceux-ci, la nature du matériau n'intervient bien souvent qu'à un niveau mineur de la classification: la famille. Qui plus est, l'identification à ce niveau n'est pas nécessairement celle du matériau-sol (bien que cela soit souvent le cas pour les sols tropicaux où la roche-mère est à grande profondeur) mais peut-être celle de la roche-mère. Enfin, pour de nombreux types de sols, des variations texturales importantes sont observées dans le profil, si bien que la définition du matériau ne concerne alors que les horizons de profondeur et non pas l'ensemble du profil.

Méthodes d'analyses

Analyses physico-chimiques

Les déterminations physiques et chimiques sont celles effectuées dans les laboratoires de pédologie de l'ORSTOM (Pelloux 1963).

Nous ne présenterons ici que les caractéristiques les plus importantes du sol:

- la teneur en argile + limon fin (A + Lf) % qui représente l'ensemble des particules de taille inférieure à 0,02 mm;
- la teneur en eau du sol à deux potentiels hydriques, pF 2,5 et

pF 4,2, correspondant respectivement à une estimation de la "capacité au champ" et du "point de flétrissement permanent";

- le pH;
- les teneurs en matière organique MO et calcaire actif CaCO_3 ;
- la capacité d'échange cationique CEC est l'aptitude du sol à fixer les cations. La CEC varie avec les teneurs en matière organique, en argile et, aussi, avec la nature des argiles.

Pour l'ensemble des notions et déterminations concernant le pF, la capacité au champ, et le point de flétrissement permanent, nous renvoyons le lecteur à Bonneau et Souchier (1979). Nous rappelons que:

- par définition $\text{pF} = \log P$
P = pression appliquée au sol et exprimée en cm de hauteur d'eau.

Les pF sont déterminés au laboratoire à l'aide d'une presse à membrane sur échantillons de sol remanié; ainsi, les teneurs en eau d'un sol à pF 2,5 et pF 4,2 représentent respectivement l'humidité conservée par l'échantillon préalablement saturé en eau et soumis à des pressions d'environ 0,3 et 16 atmosphères.

- la capacité au champ est la capacité de rétention du sol en place pour l'eau et se mesure après inondation et ressuyage du sol. Cette détermination qui se fait sur le terrain, demande beaucoup de temps et de nombreuses répétitions. Aussi, pour les études de routine, lui préfère-t-on la détermination d'un pF, préalablement défini en fonction du type de sol (en général pF 2,5);

- le point de flétrissement permanent est défini statiquement comme la teneur en eau du sol à pF 4,2 (16 atmosphères). Il représente la limite inférieure de l'eau utilisable par les plantes.

Analyses minéralogiques

Les méthodes d'extraction et de détermination des minéraux argileux sont celles du laboratoire de Géologie de l'ORSTOM (Centre de Dakar). Le diffractomètre est un modèle RIGAKU, Geiger Flex 2031. Sur ces notions nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage de Caillière et Hénin (1963).

La détermination des minéraux argileux est effectuée à l'aide d'un diffractomètre à rayons X sur la fraction argileuse du sol. Celle-ci est extraite par sédimentation dans l'eau, après destruction de la matière organique et élimination des sels et du carbonate de calcium. Pour une meilleure comparaison des argiles, celles-ci sont systématiquement rendues magnésiennes.

Les diagrammes RX obtenus permettent une détermination quantitative des proportions relatives des différentes argiles (kaolinite, illite, montmorillonite, attapulgite, etc.) présentes dans les échantillons.

Analyses géotechniques

- L'indice de plasticité I_p est la différence:

$$I_p = w_L - w_p$$

w_L limite de liquidité

w_p limite de plasticité

- L'essai Proctor a pour objet de préciser pour un sol donné et un compactage normalisé, l'influence de la teneur en eau. Le sol étudié est compacté, selon les normes définies, au moyen d'une dame, à différentes teneurs en eau w . On mesure chaque fois la densité sèche du matériau compacté et on trace la représentation graphique de la variation de γ_d en fonction de w .

Cette courbe dite "courbe Proctor" est une courbe en cloche qui présente un point haut: pour une énergie de compactage donnée, il existe une teneur en eau optimale w_{op} qui permettra d'obtenir une densité maximale d_p . Teneur en eau optimale et densité sèche maximale sont les caractéristiques Proctor du sol étudié.

Il existe deux essais Proctor, correspondant à des énergies de compactage différentes. L'essai dit Proctor modifié est celui où l'énergie de compactage est plus grande.

- Le Californian Bearing Ratio ou CBR mesure l'aptitude du sol à servir de support à une route, ou à être utilisé en matériau de viabilité.

N° échantillon	Caractéristiques physiques			Caractéristiques minéralogiques de la fraction argileuse				Caractéristiques chimiques				Caractéristiques mécaniques				
	A + Lf Z	pF 2,5 Z	pF 4,2 Z	K Z	I Z	M Z	Divers Z	M.O. Z	pH	CaCO ₃ Z	CEC meq/100 g	I _p Z	w _p Z	dp	CBR	C mm
Série n° 1																
TP 1 (70-120)	3	1,7	0,9	60	40	-	-	0,2	5,0	-	2,9	n.d.	12,0	1,73	22	-
DN (10- 30)	4	2,3	1,0	100	-	-	-	0,2	5,5	-	n.d.	n.d.	10,0	1,81	11	-
DN (30- 50)	5	2,5	1,0	100	-	-	-	0,3	5,5	-	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
NN HP (50- 90)	12	3,9	2,1	100	-	-	-	0,1	5,8	-	n.d.	3,5	7,5	2,18	30	-
FO (30- 60)	15	5,1	2,5	100	-	-	-	0,2	7,9	-	2,7	4,5	13,5	n.d.	n.d.	n.d.
TP 14 (0- 35)	16	7,9	3,4	100	-	-	-	0,6	5,8	-	1,6	3,5	6,5	2,10	62	-
NGT (20- 40)	17	8,3	1,6	100	-	-	-	0,4	4,6	-	4,5	6,0	14	n.d.	n.d.	n.d.
TP 10 (50-130)	20	10,4	5,4	100	-	-	-	0,4	5,7	-	7,2	9,5	8,0	2,09	30	-
TP 17 (50-160)	20	9,2	5,5	100	-	-	-	0,3	5,8	-	2,5	8,5	7,0	2,10	44	-
TP 11 (50-200)	24	11,4	6,2	100	-	-	tr.	0,3	5,7	-	3,6	9,5	8,0	2,10	43	0,1
PMF 12 (60- 80)	25	n.d.	n.d.	100	-	-	-	0,5	7,2	-	n.d.	12,0	10,5	n.d.	n.d.	n.d.
NS 1 (30- 60)	26	15,0	9,0	100	-	-	-	0,5	4,9	-	n.d.	19,5	11,4	1,96	46	-
TP 9 (70-140)	26	11,4	6,6	100	-	-	tr.	0,3	5,6	-	4,1	13,0	7,5	2,08	40	0,1
FKM 142 (40- 60)	26	9,5	3,3	75	25	-	-	0,2	6,5	-	2,9	4,0	14,5	n.d.	n.d.	n.d.
TP 16 (35-215)	27	10,1	6,3	100	-	-	-	0,4	5,5	-	2,4	12,0	7,5	2,10	36	0,1
TP 15 (40-115)	32	12,7	7,7	100	-	-	-	0,4	5,2	-	3,1	12,0	8,5	2,07	39	0,2
PMF 4 (60- 80)	33	13,1	7,4	100	-	-	-	0,5	5,5	-	4,8	16,0	11,5	n.d.	n.d.	n.d.
TP 13 (35- 95)	35	13,4	7,9	100	-	-	-	0,4	5,2	-	2,9	12,0	7,5	2,08	33	0,3
FKM 37 (15- 60)	40	19,0	8,5	70	30	-	-	0,3	6,0	-	9,9	13,5	13	n.d.	n.d.	n.d.
PMF 1 (60- 80)	48	20,0	13,5	100	-	-	-	0,5	5,3	-	7,2	20,0	15	n.d.	n.d.	n.d.
FKM 200 (15- 30)	59	21,4	11,9	100	-	-	-	0,8	6,7	-	15,8	20,5	16	n.d.	n.d.	n.d.
Série n° 2																
FKM 89 (0- 25)	11	5,1	2,1	70	10	20	-	0,4	6,2	-	3,2	-	9,4	1,87	14	-
FKM 91 (0- 40)	15	4,5	2,0	65	10	25	-	0,4	5,9	-	3,4	8,0	13,5	n.d.	n.d.	n.d.
FKM 123 (30- 50)	28	15,7	6,3	20	35	45	-	0,6	7,0	-	12,2	11,0	12,5	2,10	5	2,4
FKM 36 (15- 60)	33	20,3	7,9	55	5	40	-	0,3	8,9	0,13	11,1	16,0	13,5	2,06	4	2,2
FKM 92 (2- 20)	36	16,6	7,4	60	10	30	-	0,8	5,1	-	13,8	15,5	12,5	n.d.	n.d.	n.d.
FKM 30 (15- 30)	44	26,0	8,5	30	50	-	20	0,6	7,7	-	15,0	19,0	15,5	2,08	3	2,7
FKM 43 (17- 50)	47	35,1	14,3	50	10	40	-	0,2	9,5	0,32	18,2	13,5	16	2,04	3	1,8
Série n° 3																
FKM 9 (20- 60)	27	16,4	7,8	30	-	70	-	0,4	6,5	-	21,2	18,0	14	2,03	5	2,3
TP 6 (35-120)	34	20,1	13,3	10	10	80	-	0,7	7,8	-	25,3	24,5	11,0	1,95	5	2,3
FKM 122 (11- 30)	36	14,7	5,6	15	20	65	-	1,1	9,6	0,17	12,1	12,5	8,3	2,10	5	1,3
TP 2 (0- 55)	51	28,8	16,7	10	-	90	-	1,0	7,6	0,07	23,8	35,0	12,0	1,91	3	2,8
FKM 33 (30- 60)	56	27,9	14,2	-	-	-	-	0,8	8,1	0,07	29,0	33,0	16	1,98	2	4,3
FKM 12 (40- 80)	74	31,6	17,2	40	-	60	-	0,4	8,7	7,4	39,1	35,0	16,0	1,81	2	4,3
TP 5 (15- 90)	84	35,3	21,5	5	5	50	40	1,3	8,2	42,2	18,4	59,5	20,5	1,60	0	n.d.

ABREVIATIONS : A + Lf = Argiles + limons fins (particules de taille inférieure à 0,02 mm)
pF 2,5 et pF 4,2 = capacité de rétention de l'eau à pF 2,5 et 4,2
K = kaolinite
I = illite
M = montmorillonite
Divers = cette rubrique comprend de manière indéterminée les argiles "interstratifiées", vermiculites et attapulgites
MO = matière organique
CaCO₃ = calcite actif

CEC = capacité d'échange cationique
I_p = indice de plasticité
w_p = teneur en eau à l'optimum Proctor modifié
dp = densité apparente à l'optimum Proctor
CBR = Californian Bearing Ratio
C = gonflement en mm
n.d. = non dosé
(-) = les traits indiquent les valeurs pratiquement égales à zéro, du même ordre que la précision et la mesure.

Tab. 2: Résultats des analyses physico-chimiques

Caractéristiques physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des sols étudiés

Il s'agit d'un essai empirique. L'échantillon de sol étudié est compacté dans un moule (moule CBR, de diamètre 15,2 cm et de hauteur 15,2 cm) après avoir été amené à une teneur en eau homogène et bien définie.

Il est ensuite poinçonné et on déduit de la pression nécessaire à ce poinçonnement (les modalités du poinçonnement sont normalisées) un indice qui caractérise la qualité routière du matériau dans les conditions de compacité et de teneur en eau de l'essai. Les valeurs CBR données dans ce rapport correspondent à un essai exécuté sur un matériau compacté à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, à une densité égale à 95 % de la densité optimale Proctor modifié et soumis à une imbibition pendant 4 jours.

Résultats

Les résultats sont portés dans le tableau 2 où les matériaux analysés ont été classés en trois séries selon la minéralogie de la fraction argileuse.

Série 1: présence uniquement de kaolinite (K) et éventuellement d'illite (I).

Série 2: présence simultanée de kaolinite (K), illite (I) et de montmorillonite (M), avec dominance de (K + I) $(K + I) \% > (M + \text{divers}) \%$.

Série 3: présence simultanée de kaolinite (K), illite (I) et de montmorillonite (M), avec dominance de (M) $(K + I) \% < (M + \text{divers}) \%$.

A l'intérieur de chaque série, les échantillons sont classés selon leur granulométrie (teneurs croissantes en A + Lf du début à la fin de la série).

Nous étudierons, en fonction de la texture, pour les trois séries, les variations de teneur en eau à l'optimum Proctor w_{op} , de la densité à l'optimum Proctor d_p , de l'indice de plasticité I_p et de l'essai CBR. Les sols très sableux $[(A + Lf) < 10 \%$] en raison de leur comportement très particulier et du faible nombre d'échantillons analysés, ne feront pas l'objet de commentaires ici.

Corrélation entre teneur en eau à l'optimum Proctor w_{op} , densité optimale Proctor d_p et le pourcentage de particules de taille inférieure à 0,02 mm (Fig. 2)

Pour une valeur $A + Lf = 15 \%$ environ, w_{op} présente un minimum et d_p un maximum. Une interprétation possible du maximum de compacité est la suivante: si le matériau comporte peu d'argile (donc de fines particules), elles ne suffisent pas à remplir les interstices que laissent entre eux les grains de diamètre plus gros, même quand ils sont jointifs. Si le matériau comporte beaucoup de fines, les grains de diamètre supérieur ne sont plus tous jointifs et sont emballés en partie dans les fines. Dans les deux extrêmes on aura une compacité faible, et entre les deux un pourcentage $A + Lf$ correspondant à un maximum.

Il ne semble pas y avoir d'effet de la nature des argiles sur d_p et w_{op} .

Corrélations I_p et $A + Lf$ (Fig. 3)

On note une augmentation de l'indice de plasticité I_p avec celle des éléments fins ($A + Lf$). Qui plus est, les valeurs d' I_p sont d'autant plus fortes que le matériau est riche en montmorillonite, comme l'indique la position des points de la série 3, les séries 1 et 2 restant à peu près confondues.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus par Skempton (1953) qui définit l'activité d'une argile comme le rapport de l'indice de plasticité à la teneur en argile exprimée en pourcentage (rapport du poids des grains de dimensions inférieures à 0,002 mm au poids des grains inférieurs à 0,4 mm).

Ici, puisqu'il s'agit uniquement de matériaux fins et pour rendre plus facile l'utilisation des résultats, la corrélation a été faite avec $(A + Lf)$. On trouve alors, très approximativement, que pour une même teneur en argile, l'indice de plasticité est multiplié par 2, quand on passe d'un matériau où la montmorillonite n'est pas l'argile dominante (séries 1 et 2) à un matériau où la montmorillonite est l'argile dominante.

Corrélation I_p , teneur en eau à pF 2,5 (Fig. 4)

La figure 4 montre qu'il existe une très bonne corrélation entre I_p et la teneur en eau à pF 2,5. Ce résultat est intéressant car la dé-

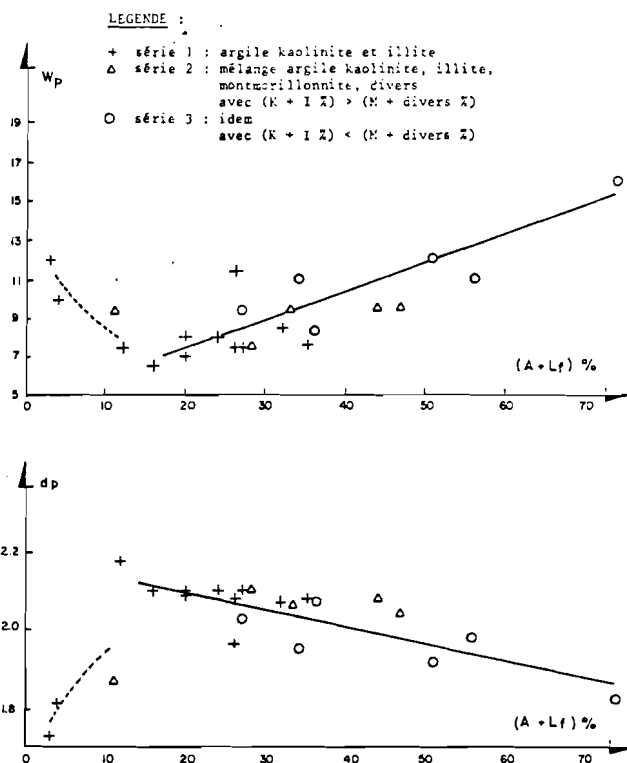


Fig. 2: Variations de w_{op} et d_p en fonction de la teneur du sol en éléments fins et de la nature des argiles

En trait plein régression linéaire pour les couples où $(A + Lf) > 15 \%$, $d_p = 2,24 - 0,006 (A + Lf)$. Coefficient de corrélation $K = 0,73$.

termination de la teneur en eau à pF 2,5 est une opération simple, peu coûteuse, ne nécessitant que quelques grammes de sol et surtout très rapide (60 analyses par jour). Par contre, la détermination des limites d'Atterberg est assez complexe, lente (un laborantin ne peut guère réaliser plus de quatre essais par jour) et donc coûteuse. Par ailleurs, le mode opératoire des limites d'Atterberg laisse une place importante au "coup de main" de l'opérateur, ce qui peut induire des erreurs systématiques. Toutes ces raisons conduisent à penser que si la méthode des potentiels hydriques (pF 2,5) peut rendre les mêmes services que I_p dans la classification géotechnique, il est peut-être souhaitable de généraliser sa détermination. Les résultats rapportés ici (Fig. 4) sont encourageants mais nécessitent bien entendu une confirmation expérimentale et statistique importante.

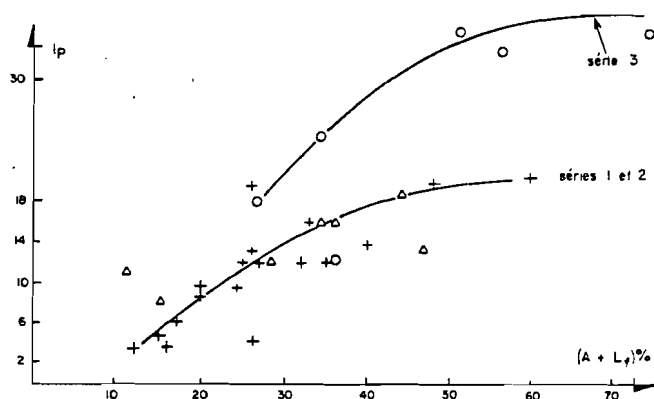


Fig. 3: Variations de I_p en fonction de la teneur du sol en éléments fins et de la nature des argiles

En trait plein la tendance de la relation entre I_p et $A + Lf$. Il s'agit ici simplement d'un essai de visualisation de cette tendance, sans interprétation statistique.

Légende: voir figure 2

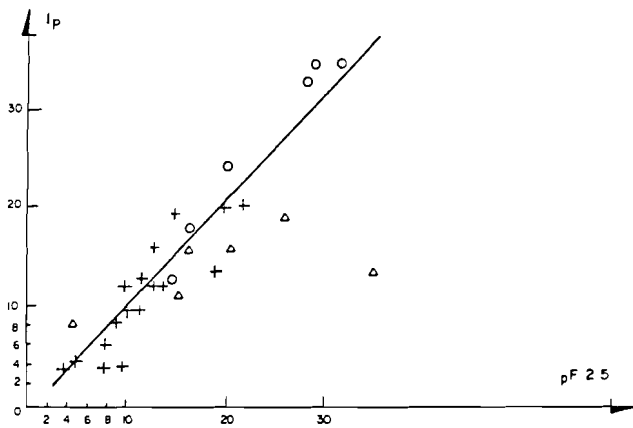


Fig. 4: Variation de I_p en fonction de la teneur en eau à pF 2,5

- 1) Régression linéaire $I_p = - 2,13 + 1,11 pF$
Coefficient de corrélation $K = 0,66$
- 2) Si on ne tient pas compte du point $I_p = 14$, teneur en eau à pF 2,5 = 35 % (qui est tout à fait en dehors du nuage de point), on a:
 $I_p = 1,84 + 1,10 pF$
 $K = 0,84$

Légende: voir figure 2

Corrélation entre CBR et $A + L_f$ (Fig. 5)

Les faits importants qui apparaissent sur la figure 5 sont que:

- pour les sols de la série 1, la corrélation CBR - $A + L_f$ est faible. Cependant, dès que $A + L_f$ est supérieur à 10 %, les sols ont des CBR compris entre 20 et 50, ce qui les classe dans la catégorie des sols pouvant être utilisés en plate-forme, ou même pour les meilleurs en couche de forme ou de fondation.
- pour les sols des séries 2 et 3, il n'y a pas de corrélation CBR - $A + L_f$. La présence de montmorillonite, même en faible quantité ($A + L_f < 10\%$) amène uniformément le CBR à être inférieur à 10 (et inférieur à 5 dès que $A + L_f$ est supérieur à 20 %).

Ces résultats sont intéressants à noter car ils permettent de prévoir le comportement d'un sol à partir de la minéralogie des argiles qu'il contient, mieux que ne le permet la corrélation classique en géotechnique (pour des sols fins) entre I_p et CBR. En effet, quand I_p croît, CBR décroît (Fig. 6) mais la corrélation est mauvaise et ne permet pas de faire une différence décisive entre sol à rejeter (CBR < 5) et sol acceptable (CBR > 10); par contre la figure 5 montre bien la nette différence de comportement due à la présence de montmorillonite (ou d'argile interstratifiée et attapulgite).

Discussions et conclusions

Les corrélations étudiées dans le paragraphe précédent mettent en évidence des tendances qui sont connues. Plus un sol est argileux et

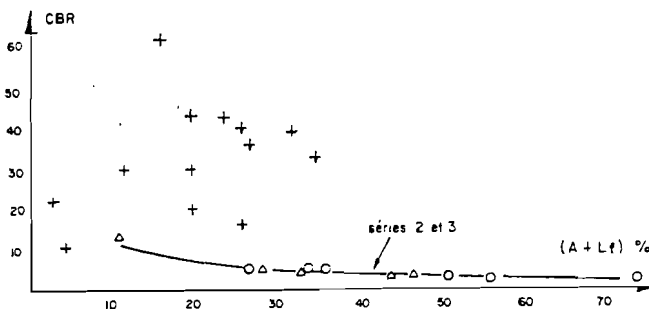


Fig. 5: Variations de CBR en fonction de la teneur du sol en éléments fins et de la nature des argiles

Le trait plein est uniquement tracé pour aider à la visualisation de la corrélation entre CBR et $A + L_f$ pour les séries 2 et 3, sans qu'il y ait ici interprétation statistique.

Légende: voir figure 2

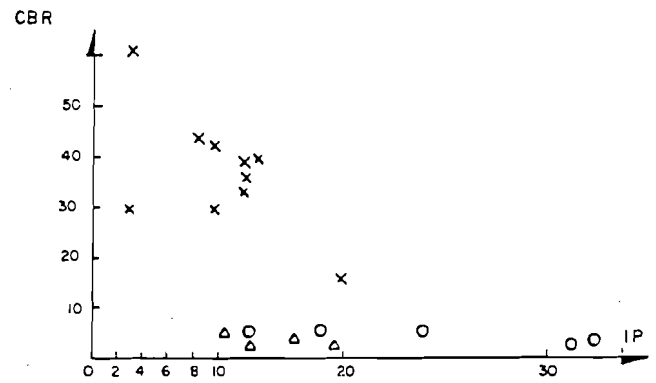


Fig. 6: Variations de CBR en fonction de I_p .

Légende: voir figure 2

plus les argiles qu'il contient sont actives, moins il constitue un bon matériau routier.

Elles ont cependant l'intérêt de préciser ces tendances dans le cas des sols sénégalais, ce qui a permis d'obtenir deux résultats qui, techniquement, présentent peut-être des applications intéressantes.

- La présence de montmorillonite, **même en faible quantité**, est un facteur décisif du comportement des sols étudiés.
- Il existe une corrélation étroite I_p - teneur en eau à pF 2,5 qui peut, si elle est vérifiée, permettre d'alléger et de rendre plus fiable, l'identification géotechnique des sols.

Application à l'utilisation des données pédologiques

Trois cas peuvent se présenter quand on veut passer de données pédologiques à des indications géotechniques.

1) Une unité de sol correspond univoquement à un type de matériau routier. Exemple: la classe des vertisols.

Dans ce cas très particulier, il y a une relation univoque entre les classifications pédologiques et géotechniques. En effet, les vertisols sont **toujours** des sols argileux (teneurs en argile supérieures à 35 %) où dominent les argiles gonflantes. Le matériau-sol présentera donc toujours les mêmes caractéristiques géotechniques qui sont commandées ici par la granulométrie et la nature des argiles. La lecture de la carte pédologique ou l'interprétation de la classification, est alors immédiate pour le géotechnicien.

2) Une unité de sol correspond à plusieurs types de matériaux routiers.

C'est le cas de la majorité des classes de sols. L'exemple des sols peu évolués est caractéristique à cet égard puisque ces sols peuvent avoir des textures très variables allant des sables argileux, aux sables, aux argiles et aux matériaux gravillonnaires, avec des variations importantes selon la profondeur. Des sels, des argiles gonflantes, du calcaire peuvent être présents. Aussi, même au niveau de la famille, la classification pédologique devra nécessairement être réinterprétée en termes géotechniques.

3) Plusieurs unités de sol correspondent à un seul type de matériau routier: exemple (Sénégal): les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et les sols isohumiques brun-rouge subarides sur matériaux sableux.

Dans ces deux cas, bien que les sols appartiennent à deux classes différentes, ils sont toujours développés sur des matériaux très sableux.

Les unités pédologiques correspondantes pourront donc être regroupées en une seule unité géotechnique.

De ces observations, il découle qu'une utilisation rationnelle des cartes pédologiques et géologiques à des fins géotechniques (pour les matériaux fins) doit se faire à deux niveaux d'approche.

Premier niveau: les unités cartographiques seront d'abord isolées ou regroupées en fonction de la présence ou de l'absence de montmorillonite dans les sols. La lecture de la carte pédologique se fait alors essentiellement au niveau de la **famille de sols**.

Exemple du Sénégal:

On pourra regrouper en:

- unité géotechnique "sans argile gonflante" tous les sols développés sur des matériaux à texture variable mais à pôles minéralogiques "kaolinite-illite"

les sols sur matériaux sableux dunaires:

- sols bruns subarides
- sols brun-rouges subarides
- sols ferrugineux tropicaux peu lessivés.

les sols sur matériaux issus des grès argileux du Continental terminal ou du Maestrichtien:

- sols peu évolués d'apport
- sols ferrugineux tropicaux lessivés
- sols faiblement ferrallitiques
- sols hydromorphes.

- unité géotechnique "à argiles gonflantes"

les sols sur matériaux alluviaux du Walo et du Fondé de la vallée du Sénégal:

- sols peu évolués
- vertisols
- sols hydromorphes

les sols sur niveaux calcaires ou marno-calcaires à faible profondeur (région de Dakar, Thiès et Matam) ou sur roches volcaniques (régions de Dakar):

- sols carbonatés
- vertisols
- sols bruns eutrophes
- sols isohumiques plus ou moins vertiques

les sols alluviaux ou non sur matériaux issus des altérations du socle primaire du Sénégal oriental (altérations de schistes, pélites, grès feldspathiques, roches éruptives) conduisant à la néoformation d'argiles de type montmorillonite:

- sols peu évolués d'apport (modaux, vertiques, alcalisés)
- vertisols
- sols bruns eutrophes
- sols hydromorphes
- sols sodiques.

Deuxième niveau: dans les unités géotechniques "sans argile gonflante" définies au niveau 1, des sous-unités pourront alors être retenues en fonction de la texture du matériau (sableuse, sablo-argileuse, argilo-sableuse, argileuse).

Les résultats établis ici semblent alors montrer qu'à l'intérieur d'une sous-unité, on pourra établir des corrélations suffisamment étroites entre propriétés mécaniques et critères d'identification (géotechnique et/ou pédologique) pour pouvoir être utilisable en technique routière et permettre d'alléger le coût des études, particulièrement celles de faisabilité.

Remerciements

M. Sall, directeur de CEREEQ (Laboratoire national du ministère des Travaux publics du Sénégal) a permis la réalisation de ce travail

en nous aidant de ses conseils et en mettant son laboratoire à notre disposition. M. Sagnax, chef du laboratoire géotechnique au CEREEQ a supervisé les essais géotechniques. M. Paychenc a exécuté dans les laboratoires de l'ORSTOM Dakar les essais de caractérisation physico-chimiques.

M. Combeau (ORSTOM) a bien voulu contrôler ce travail et nous aider de ses conseils.

Qu'ils trouvent tous ici l'expression de nos remerciements.

Bibliographie

- ATLAN Y. (1974): Classification géotechnique routière des sols latéritiques ivoiriens. *Revue Générale des routes* n° 495.
- AUBERT G. (1965): Carte ORSTOM, série Pédologie, 3 (3), 269 - 288.
- AUBERT G. - BOULAIN J. (1972): La pédologie. Collection "Que sais-je?" n° 352, PUF ed.
- BONNEAU - SOUCHIERS (1979): Pédologie. Ed. Masson.
- CAILLERE - HENIN (1963): Minéralogie des argiles. Ed. Masson.
- C. P. C. S. (1967): Classification des sols.
- DUCHAUFOUR (1970): Précis de pédologie. Ed. Masson.
- GIDIGASU M. D. (1974): Degree of weathering in the identification of laterite materials for engineering purposes. A review. BRR I Prog. Rep. SM 7.
- LAROCHE C. (1973): Etude des sols pour la route Waza Maltam, sur argile gonflante. *Revue générale des routes* n° 486.
- LYON ASSOCIATES, Inc. - BRR I (1971): Laterite and lateritic soils and other problem soils of Africa. A report for Agency for International Development.
- MAIGNIEN R. (1965): Carte pédologique du Sénégal au 1/1 000 000. ORSTOM, 63 pp., 1 carte.
- PELLOUX (1963): Méthodes d'analyses. SSC ORSTOM.
- PELTIER (1969): Manuel du laboratoire routier. Ed. Dunod.
- SKEMPTON A. W. (1953): Soil Mechanics in relation to Geology. *Proc. Yorkshire Geol. Soc.*, 29, Pt. 1 (3), 33 - 62.
- STEPHEN L. (1953): A petrographic study of a tropical black earth and grey earth from the Gold Coast. *Inv. Soil Sci.* 4, 211 - 219.
- UPPAL H. L. (1965): Field study on the movement of moisture in black cotton soils under road pavements. In: *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*, G. D. Aichinson, ed. Butterworths, Australia, 165 - 174.