

Étude des caractéristiques géotechniques et d'érodabilité des sols de la ville de Manaus (Brésil)

M. GOUTTE-LIMA

SEMEN TP
La Barrière Noire, BP 14
44220 Couëron
marislg@hotmail.fr

**J. CAMAPUM
DE CARVALHO**

Université de Brasilia
Faculté de Technologie
Programme de géotechnique
70910-900 Brasilia –
DF – Brésil
camapum@unb.br

C. ALVES DA FROTA

Université d'Amazonas
Faculté de Technologie
Laboratoire de Mécanique
des Sols
69073-970 Manaus –
AM – Brésil
cafrota@yahoo.com.br

Résumé

Cet article présente des relations entre les paramètres géotechniques obtenus pour les sols de la ville de Manaus, située dans la région amazonienne, au Brésil. Cette recherche a pour objectif l'interprétation de l'érodabilité des sols de quatre ravins dans la zone urbaine. Les résultats montrent que la minéralogie et les propriétés physiques de ces sols sont variables par rapport à la cote altimétrique de la ville. En effet, dans les cotes supérieures, le sol est argileux, dans les cotes intermédiaires, il est argilo-sableux et dans les cotes plus basses, il devient sableux. Pour cela, nous avons fait des essais de comportement mécanique en sols non remaniés d'un ravin situé dans une cote intermédiaire. Ces essais ont consisté en la mesure d'érodabilité dans l'appareil d'Inderbitzen, en cisaillement direct, en courbes de rétention d'eau et un essai SPT *in situ*. Des corrélations entre quelques caractéristiques physiques ont été possibles. Pourtant, en fonction des particularités de structure et de la composition minéralogique de ces sols, les corrélations entre le comportement mécanique et l'érodabilité n'étaient pas si évidentes. Malgré cela, on remarque la forte influence de la nature du sol sur les caractéristiques géomécaniques et d'érodabilité du profil de sol d'un de ces ravins.

Mots-clés : corrélations, érodabilité, géotechnique, sols tropicaux.

Study of the geotechnical characterization and soils erodibility in the town of Manaus (Brazil)

Abstract

This paper presents of the relations between the soils geotechnical properties obtained from the gullies in the town of Manaus, in the Amazonian region, in Brazil. This research aims at the interpretation of the soil erodibility came from four gullies in the urban district. The results show that the mineralogy and the physical soils properties are variable with the level dimension of the city. Indeed, it was observed that the soil profile of the city is very uniform, with a shallow clayey layer in regions above the sea water level and a sand layer in regions below it. For that, we carried out tests of mechanical behavior for the undisturbed soils from of the gully in the medium level. These laboratory tests consisted of the measurements of the erodibility soils from the Inderbitzen Test, Direct Shear, the curves characteristics and the field test SPT. The correlations between the soils properties were possible. However, according to the particularities of structure and mineralogical soil composition, the correlation between the other properties can't be obvious. In spite of that, it was noted the influence nature of the soil in the geomechanicals characteristics and erodibility in the soil profile of one of these gullies.

Key words : correlations, erodibility, geotechnical, tropical soils.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} mars 2009.

Introduction

La ville de Manaus, capitale de l'État d'Amazonas, située dans la région nord du Brésil, a une superficie de 11 458,8 km², sachant que l'État d'Amazonas a une superficie de 1 558 987 km². Sa localisation se trouve entre les parallèles 03° 00' / 03° 10' S et les méridiens 59° 55' / 60° 07' W, au centre géographique de l'Amazonie. La ville est limitée par la rive gauche de la confluence des rivières Negro et Solimões, qui forment ensemble le fleuve Amazone.

La ville a un relief modéré dont l'altitude moyenne est de 65 m au-dessus du niveau de la mer. D'après Fernandes Filho (1997), les surfaces topographiques les plus élevées de la ville de Manaus se trouvent près de la cote 100 m au-dessus du niveau de la mer. La région présente un climat humide et chaud, caractérisé par deux saisons prédominantes : une saison des pluies (l'hiver), qui se prolonge du mois d'octobre au mois de juin et une saison sèche (l'été), du mois de juillet au mois de septembre. Les précipitations annuelles moyennes varient entre 2 100 et 2 500 mm, ce qui provoque des crues périodiques dans la région.

D'après Fernandes Filho *et al.* (1997) la géologie régionale est représentée par les sédiments Meso-Cénozoïques de la formation « Alter do Chão » et les dépôts quaternaires de la formation « Solimões ». La formation Alter do Chão est un système géologique du Crétacé, caractérisé par des sédiments rouges et faiblement consolidés. Elle est constituée, essentiellement par des arénites, des limonites et des argilites, qui forment le substratum rocheux de la ville. L'arénite de cette formation est connue, régionalement, comme « Arénite Manaus », qui est la principale source de cailloux et de graviers pour les travaux publics dans la région.

Les sols de la ville de Manaus sont classifiés, pédologiquement, comme « latosols jaunes ». Ces sols ont une texture variable entre argileuse, sablo-argileuse ou argile-sableuse et encore, sableuse. Ils sont fortement drainés avec une coloration jaunissante et riches en minéraux de quartz et en minéraux argileux du type kaolinite.

Le processus d'érosion dans la ville est provoqué principalement par la concentration excessive des eaux pluviales et la déforestation près des lotissements qui, associés aux caractéristiques des sols, est à l'origine des ravinements. Ce phénomène se manifeste sur la couche la plus superficielle du profil de latosol jaune, provoquant d'abord des ruissellements et ensuite de grands ravins sur le terrain. Dans la plupart des cas, ces ravins arrivent à 18 m de profondeur. Les études régionales en cours permettront de mieux connaître les mécanismes d'origine et d'évolution de ces ravins. Elles aideront à concevoir des projets géotechniques de contrôle d'érosion dans la région. Cet article présente l'étude géotechnique réalisée sur quatre ravins situés dans trois zones et sur des cotes altimétriques différentes dans la ville de Manaus. Ces cotes ont été obtenues à l'aide d'un GPS et de la carte hypsométrique de la région. Sur la figure 1, on peut noter que les ravins étudiés sont le « Canaranas », qui se situe sur la cote altimétrique 100 m, « Distrito » entre les cotes altimétriques 75 m-100 m et finalement, deux ravins nommés « Tarumã 1 » et « Tarumã 2 » entre les cotes 50 m-75 m.



Erosion Location Map - Manaus City



FIG. 1 Les ravins étudiés dans la zone urbaine de Manaus.

Il faut signaler aussi que sur la carte des nappes phréatiques présentée par Bento (1998), nous avons constaté que sur les ravins Canaranas et Distrito, le niveau d'eau se trouve à des profondeurs supérieures à 30 m. Cependant, dans les ravins Tarumã, la nappe phréatique se trouve à des profondeurs qui varient de 0 à 10 m.

Cette recherche a nécessité un nombre considérable d'essais de caractérisation physique et minéralogique sur les profils de sol de ces quatre ravins. Étant donné que le profil de sol du ravin Distrito est situé sur la cote altimétrique intermédiaire, nous avons réalisé aussi des essais pour l'analyse du comportement mécanique et de l'érodabilité de ces sols. L'analyse des résultats est basée sur des corrélations entre les paramètres géotechniques obtenus.

La problématique d'érosion des sols au Brésil

L'érosion est définie comme l'ensemble des processus, par lesquels les matériaux de l'écorce terrestre sont détachés et transportés d'un endroit à l'autre par des agents érosifs, tels que l'eau (érosion hydrique), le vent (érosion éolienne) et la glace (érosion glaciaire), parmi d'autres.

Étude expérimentale

L'érosion hydrique, prépondérante au Brésil, est une conséquence du régime des pluies, de l'action des vagues au bord des lacs, de la mer, de l'océan, mais aussi tout au long des rivières et des fleuves. L'érosion par la pluie, qui est une des plus importantes dans les régions tropicales, a deux agents érosifs : la goutte qui tombe et l'écoulement superficiel qui en résulte.

Les régions du Brésil, comme les alentours de la capitale Brasilia, dans le District Fédéral et les villes de Goiânia, de São Paulo, de Manaus et les États du Paraná et du Rio Grande do Sul sont beaucoup trop affectés par le problème d'érosion des sols. Cette situation est due à l'occupation désordonnée du sol dans les communes urbaines et aussi par les pratiques parfois inappropriées dans les zones rurales. Plusieurs recherches sont menées au Brésil afin de trouver des solutions aux problèmes géotechniques qui caractérisent les processus érosifs liés à l'érosion hydrique.

Il faut remarquer qu'au Brésil, les régions affectées par les processus de ravinement sont caractérisées par un profil de sol poreux, résiduelle ou non, où presque toujours la nappe phréatique est profonde. Dans ce cas, toutes les modifications physico-chimiques des sols sont provoqués par l'écoulement dans un milieu non saturé, principalement après la formation des ravins due au processus d'érosion.

La formation du ravin peut aussi induire à un abaissement de la nappe phréatique, ce qui provoque le déclenchement de l'érosion interne et la dégradation physico-chimique du sol, par lessivage, près des talus de ces ravins.

Comme l'érosion dépend de nombreux facteurs, son occurrence intervient de façon différente selon les régions, ce qui demande des études et des solutions particulières. Par exemple, dans le District fédéral (au Centre-Ouest du Brésil), la plupart des ravins ont une forme en « V » dont la profondeur est limitée par les roches plus résistantes menant l'écoulement d'eau à s'encaisser dans les couches moins résistantes du substratum rocheux (Mortari et Camapum de Carvalho, 1994). Selon Vilar et Prandi (1993), à São Paulo (dans le Sud-Est du Brésil) et au Paraná (dans le Sud du Brésil), les formations des ravins ont plutôt une forme en « U » et à Manaus (dans le Nord du Brésil), les ravins ont, en grande partie, une forme d'amphithéâtre (Lima, 1999). La figure 2 montre ces types de ravins dans les villes de Manaus et de Brasilia. De cette manière, on peut constater que comme leurs formations et leurs évolutions sont différentes, il existe plusieurs propositions de modèles évolutifs pour expliquer ce processus érosif. Pour essayer de comprendre le mécanisme d'évolution des érosions à Manaus, nous avons établi un programme d'essais de laboratoire et des observations de mécanismes de rupture sur le terrain.



FIG. 2 Ravins dans les villes de Manaus et District fédéral.
a) Ravin Distrito (Manaus) ; b) Ravin District federal.

L'étude expérimentale a été conduite sur quatre ravins représentatifs des érosions de la ville de Manaus nommés : Canaranas, Distrito, Tarumã 1 et Tarumã 2 (Fig. 1). Après la caractérisation physico-minéralogique des profils de sols de chaque ravin, celui du Distrito a été choisi, en fonction de ses caractéristiques intermédiaires par rapport aux autres ravins, pour la poursuite des études sur le comportement mécanique et l'érodabilité des sols.

Les essais de caractérisation physique ont consisté en la détermination de la teneur en eau naturelle (w_{nat}), du poids volumique des grains (γ_s), des limites d'Atterberg (w_L et w_p) et des analyses granulométriques réalisées avec ou sans le défloculant.

La minéralogie a été déterminée en utilisant la technique de diffraction de rayons X sur les échantillons de sol passés sur le tamis de $74 \mu\text{m}$ (# 200). Les lames ont été confectionnées en exerçant une légère pression, pour éviter l'orientation de particules de sol.

L'étude du comportement mécanique réalisée pour le ravin, situé sur la cote intermédiaire (ravin Distrito), a consisté en des essais œdométriques et de cisaillement direct des échantillons dans les conditions saturées et non saturées, de déterminations de courbes de rétention d'eau et d'essais in situ, tels que le SPT (*Standard Penetration Test*) et SPT-T (mesure de la résistance à la torsion après chaque évaluation du nombre de coups dans l'essai SPT). Ainsi, l'essai SPT a été réalisé sans circulation d'eau et avec des mesures de torsion en utilisant une clé dynamométrique avec aiguille suiveuse de capacité jusqu'à 48 Kgf.m. Les essais ont été réalisés tous les mètres, avec des prélèvements d'échantillons, jusqu'à 13 m de profondeur. Les essais œdométriques réalisés dans les conditions saturée et non saturée ont permis d'évaluer le potentiel d'affaissement du sol pour les profondeurs de 3 m et de 5 m dû à la saturation. Les résultats des essais en conditions saturées ont permis aussi de définir une vitesse de cisaillement dans la boîte de Casagrande pour les essais drainés. L'essai de Casagrande dans les conditions saturée et non saturée a été réalisé pour les profondeurs de 1, 3, 5, 7 et 8 m. Il est possible, par exemple, de vérifier par l'inondation de l'échantillon, la susceptibilité des paramètres de résistance lorsque le sol a subi un événement pluvieux. Dans ce cas, la succion diminue significativement avec la variation de la teneur en eau sur le terrain.

Les courbes de rétention d'eau ont été mesurées par la technique du papier filtre. Les échantillons utilisés étaient ceux du carottage lors d'essai SPT et aussi des échantillons non remaniés prélevés aux profondeurs de 1, 3, 5, 7 et 8 m.

L'érodabilité se définit par la facilité des particules des sols à être désagrégées et transportées, ce qui reflète la prédisposition d'un type de sol à résister aux efforts des agents érosifs. De cette manière, l'érodabilité est conditionnée essentiellement par la résistance du sol à l'action des agents érosifs. Les essais d'érodabilité réalisés ont été l'Inderbitzen Test (Inderbitzen, 1961), le Pinhole Test (Sherard *et al.*, 1976) et des essais de désagrégation. On remarque ici que les données utilisées dans les corrélations avec les autres caractéristiques des sols, sont les pertes de sol obtenues dans l'essai d'Inderbitzen (conditions saturée et non saturée), car elles sont quantifiées, tandis que les autres (la désagrégation et le Pinhole Test) sont des mesures plus qualitatives.

Caractérisation physique et minéralogique

Les tableaux I à IV montrent les résultats des caractéristiques physiques obtenus pour les quatre ravins. Ces résultats révèlent deux aspects importants pour les profils de sols étudiés. Le premier montre que la teneur en argile (déterminée avec l'agent dispersant) et les limites d'Atterberg ont tendance à diminuer par rapport à la profondeur dans chaque profil. Et le deuxième aspect montre, en observant tous les tableaux, que le sol du ravin Canaranas est plus argileux, ensuite que les sols du ravin Distrito possèdent les caractéristiques d'une argile sableuse ou d'un sable argileux et ceux des ravins Tarumã, sont les plus sableux. Comme chaque ravin se trouve dans une cote altimétrique différente, on peut aussi analyser ces propriétés par rapport à la cote altimétrique estimée pour chacun de ces ravins.

Dans les études de sols tropicaux, l'analyse minéralogique constitue un outil auxiliaire pour la compré-

hension d'un profil d'altération de sol, des propriétés physiques et des comportements mécaniques des sols. Pour vérifier l'influence des minéraux argileux sur les propriétés physiques de ces sols, sur le comportement mécanique et sur l'érodabilité, on a considéré les valeurs de l'intensité des pics de la kaolinite et du quartz dans chaque diffractogramme des rayons X. La kaolinite est un silicate d'alumine qui résulte de l'altération et le quartz est un minéral très résistant à la météorisation. La figure 3 montre les profils des résultats de caractérisation physique et minéralogique pour les quatre ravins en fonction de la cote altimétrique par rapport au niveau de la mer (Lima *et al.*, 2000). L'ensemble des résultats montre que la teneur en quartz et en kaolinite augmente avec la réduction de la cote altimétrique estimée pour les profils de sols. Cette figure met en évidence deux remarques : la continuité des profils des propriétés des sols avec la profondeur et l'évidence d'un profil sédimentaire unique ; l'intempérisation due au climat est semblable dans les quatre profils des sols analysés et en accord avec la teneur en quartz, peu altérable.

TABLEAU I Caractérisation physique (ravin Canaranas).

Prof. (m)	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_s (kN/m ³)	Avec dispersant (%)				Sans dispersant (%)			
						gravier	sable	limon	argile	gravier	sable	limon	argile
1	37,0	74,4	41,4	33,1	26,3	0,0	13,0	11,5	75,5	0,0	16,0	56,0	28,0
2	38,9	82,7	48,4	34,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	39,6	84,5	49,9	34,6	26,0	0,0	9,0	13,5	77,5	0,0	9,0	64,0	27,0
4	40,2	84,9	57,9	27,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	34,6	79,8	50,5	29,3	26,1	13,5	11,5	17,0	60,0	11,0	11,0	46,0	32,0
6	34,7	75,1	49,1	26,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	33,4	69,4	44,1	25,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	28,1	65,1	41,0	24,1	26,3	0,9	24,5	11,0	64,0	0,5	24,5	57,0	18,0
9	26,8	57,9	38,3	19,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	24,6	53,7	33,2	20,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	24,9	43,0	29,1	13,9	26,3	0,5	41,5	12,0	46,0	0,5	40,5	32,0	27,0
12	26,0	49,0	28,2	20,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABLEAU II Caractérisation physique (ravin Distrito).

Prof. (m)	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_s (kN/m ³)	Avec dispersant (%)				Sans dispersant (%)			
						gravier	sable	limon	argile	gravier	sable	limon	argile
1	25,2	61,5	40,0	21,5	26,40	25,0	38,5	10,5	26,0	25,0	50,0	19,0	6,0
2	24,8	56,2	38,7	17,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	17,1	46,3	30,1	16,2	26,26	1,0	61,0	10,0	28,0	1,0	57,0	29,0	13,0
4	21,1	41,0	26,8	14,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	14,9	35,4	23,2	12,2	26,19	1,0	49,5	13,5	36,0	1,0	52,0	35,0	12,0
6	15,3	34,6	21,5	13,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	13,7	27,0	17,1	9,9	26,31	0,0	60,0	7,0	33,0	0,0	63,0	25,0	12,0
8	10,4	22,8	17,6	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	14,4	24,2	20,0	4,2	26,3	0,0	55	13	32	0,0	55	44	1
10	11,1	24,6	19,1	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	6,3	NL	NP	NP	26,24	1,0	77,0	6,0	16,0	1,0	79,0	12,0	8,0
12	11,1	NL	NP	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABEAU III Caractérisation physique (ravin Tarumã 1).

Prof. (m)	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_s (kN/m ³)	Avec dispersant (%)				Sans dispersant (%)			
						gravier	sable	limon	argile	gravier	sable	limon	argile
1	9,2	18,9	14,8	4,1	26,6	3,0	71,0	9,0	17,0	1,0	74,0	21,0	4,0
2	9,4	20,0	15,2	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7,6	NL	NP	NP	26,4	0,5	83,5	4,0	12,0	0,5	83,5	10,0	6,0
4	11,1	25,4	15,7	9,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	11,2	NL	NP	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	15,6	NL	NP	NP	26,5	0,0	87,0	3,0	10,0	0,0	92,0	7,0	1,0
7	18,8	NL	NP	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-

TABEAU IV Caractérisation physique (ravin Tarumã 2).

Prof. (m)	w_{nat} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	γ_s (kN/m ³)	Avec dispersant (%)				Sans dispersant (%)			
						gravier	sable	limon	argile	gravier	sable	limon	argile
1	13,6	25,1	17,7	7,4	26,2	1,0	62,0	9,0	28,0	1,0	61,0	19,0	19,0
2	8,6	17,6	NP	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7,9	NL	NP	NP	26,3	2,0	74,0	7,0	17,0	2,0	76,0	19,0	3,0
4	11,3	19,2	15,1	4,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	8,1	NL	NP	NP	26,2	1,0	81,0	3,0	15,0	1,0	83,0	10,0	6,0
6	10,9	17,8	15,9	1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	16,2	20,3	16,6	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	22,6	16,8	15,4	1,5	26,9	0,0	73,0	8,0	19,0	0,0	74,0	11,0	15,0

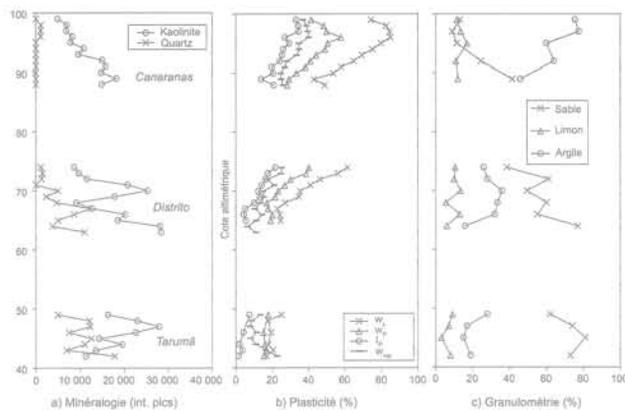


FIG. 3 Essais de caractérisation géotechnique en fonction de la cote altimétrique.

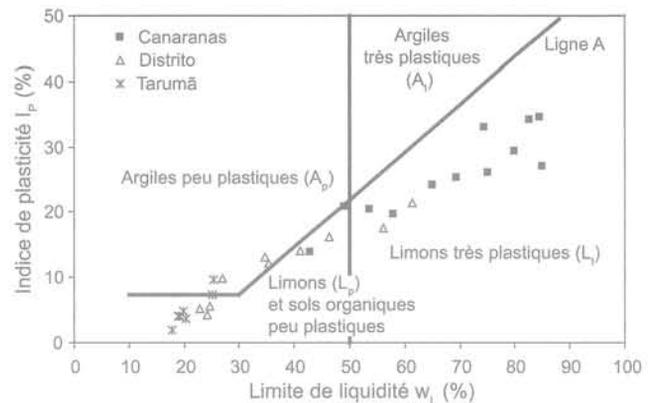


FIG. 4 Diagramme de Casagrande.

On remarque d'une manière générale, dans tous les ravins, que la teneur en argile diminue par rapport à la profondeur et que le pourcentage de limon est plus important dans les analyses granulométriques sans l'utilisation de dispersant, ce qui indique, qu'il s'agit, en partie, d'agrégats des sols et non seulement de particules indépendantes. La figure 4 montre le diagramme de Casagrande et la position de chaque ravin dans ce graphique. On peut constater que les sols du ravin Canaranas sont caractérisés comme L_t , ceux du ravin Distrito, la moitié est L_t et l'autre partie en fonction de la profondeur est A_p et les sols du Tarumã sont classifiés comme L_p . On remarque dans ce diagramme que la majorité des points se trouvent au-dessous de la ligne A, caractéristique non rare dans les sols tropicaux.

3.2

Comportement mécanique

La figure 5 montre les profils de SPT (N), de torsion (T) et de succion matricielle ($u_a - u_w$) pour le ravin Distrito jusqu'à la profondeur de 13 m. Dans ce cas les valeurs de succion ont été obtenues à partir d'échantillons de sols prélevés lors des essais SPT. On remarque que les valeurs de N et des torsions (T) ont tendance à diminuer par rapport à l'augmentation de la profondeur jusqu'à 6 m, et à partir de cette profondeur, ils ont tendance à augmenter. On peut observer aussi que les mesures de succion ont tendance à diminuer en fonction de la profondeur, ce qui est en accord avec

les variations des propriétés des sols, tels que la granulométrie, la plasticité et la teneur en eau naturelle tout au long de la profondeur. On peut dire aussi, que les paramètres N et T dépendent aussi bien de la succion que des propriétés physiques tel l'indice de vides.

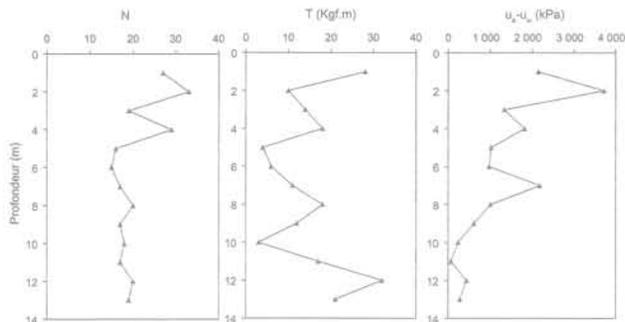


FIG. 5 Profils de N (SPT), T (torsion) et $u_a - u_w$ (succion) (ravin Distrito).

Le tableau V présente les paramètres de résistance (c et ϕ) obtenus dans la boîte de Casagrande (cisaillement direct) pour les conditions naturelle (non saturée) et saturée (succion = zéro) à des profondeurs de 1, 3, 5, 7 et 8 m. Ces résultats montrent une réduction de la cohésion du sol avec l'inondation au fur et à mesure que la profondeur augmente.

TABLEAU V Paramètres de résistance (ravin Distrito).

Profondeur (m)	Naturel (non saturé)		Inondé (saturé)	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
1,0	64,8	39,5	28,8	39,5
3,0	41	31,3	16	31,4
5,0	11,3	35,4	5,6	41,1
7,0	24	35,7	3	32,2
8,5	69	27,1	41	22,4

3.3

Essais d'érodabilité

L'érodabilité des sols a été déterminée par l'essai d'Inderbitzen (1961). Cet essai consiste à passer un écoulement d'eau sur un échantillon de sol avec une déclivité de 10° et un débit de 50 ml/s. Les valeurs de perte de sol sont déterminées après un temps d'essai de 30 minutes d'écoulement d'eau. Ces résultats sont montrés dans le tableau VI. L'unité des valeurs de perte de sol est donnée par (g/mm^2). Les essais ont été réalisés sur des échantillons naturel (non saturé) et saturé (succion = zéro), pour le ravin Distrito. Ces résultats montrent une liaison directe entre l'érodabilité (perte de sol) et la cohésion du sol saturé. Il est cependant important de remarquer que pour la condition non saturée, il n'y a pas une liaison directe entre la cohésion et l'érodabilité dû à l'influence contraire de la réduction

de la succion lors de l'écoulement. En effet, la pénétration de l'eau dans le sol non saturé engendre, dans les pores, une pression d'air qui provoque le détachement de particules quand elle dépasse la cohésion effective ou la cimentation du sol.

TABLEAU VI Pertes de sol (essai d'Inderbitzen) (ravin Distrito).

Prof. (m)	Perte de Sol ($\times 10^{-3} g/mm^2$)	
	Naturel (non saturé)	Saturé
1,0	0,2941	0,5017
3,0	0,9906	0,5971
5,0	0,2305	0,233
7,0	0,7996	0,8887
8,5	0,8874	0,0929

3.4

Courbes de rétention d'eau

Les mesures de succion ont été faites, par séchage, en utilisant la technique du papier filtre, d'après les recommandations de l'ASTM (1992). Nous avons essayé de les mettre en corrélation avec les paramètres géotechniques obtenus et de vérifier l'influence directe de ceux-ci sur l'érodabilité des sols pour la région urbaine de Manaus. La figure 6 montre les courbes de rétention d'eau pour le profil de sol sur le ravin Distrito. On remarque les grandes variations de succion sur la couche superficielle à 1 m au-dessous du niveau du terrain. Il est évident que cette couche a été plus exposée à la météorisation, soumise à des cycles de séchage et d'humidification.

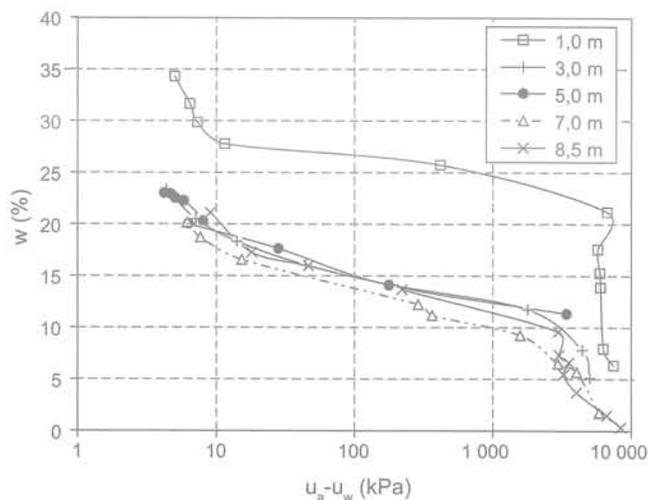


FIG. 6 Courbes de rétention d'eau (ravin Distrito).

Corrélations

4.1

Propriétés physiques

Les corrélations présentées ici ont été ajustées aux meilleures tendances. Les résultats de caractérisation physique montrent que les sols du ravin Canaranas sont plus argileux, étant identifiés par une plasticité élevée et des valeurs importantes de la teneur en eau naturelle. Les sols du ravin Distrito sont caractérisés comme des sables argileux et moyennement plastiques. Enfin, les sols du ravin Tarumã sont plus sableux par rapport aux deux autres profils analysés, présentant une faible plasticité, voire aucune plasticité dans les grandes profondeurs.

En faisant la corrélation entre les résultats de la teneur en eau naturelle (w_{nat}) et les propriétés de consistance (w_L , w_p et I_p) des profils des ravins analysés, on observe qu'il existe une tendance à la corrélation linéaire entre ces indices, en montrant une augmentation de la teneur en eau par rapport aux propriétés plastiques (Fig. 7). On peut aussi vérifier sur cette figure que les caractéristiques d'humidité et de plasticité des profils des ravins se décalent selon la position des cotes altimétriques où ils se trouvent. Ce résultat révèle, en plus de la caractérisation du profil de sol typique pour la région de Manaus, que la composition minéralogique de ces sols est fondamentalement la même.

La figure 8 confirme l'influence du pourcentage d'argile sur les limites de plasticité (w_L et w_p) et l'indice de plasticité (I_p), c'est-à-dire, plus le pourcentage d'argile est élevé, plus les limites de plasticité, les indices de plasticité et les teneurs en eau naturelles seront importantes. Il faut remarquer que l'inclinaison de la droite sur la figure 8, qui corréle l'indice de plasticité et le pourcentage d'argile, représente le coefficient de l'activité moyenne de Skempton (I_a), qui est d'environ 0,46, ce qui classe ces sols comme inactifs. La plus grande dispersion de ces résultats par rapport aux résultats de la figure 7 peut être, au moins en partie, expliquée par le fait que, sur cette figure les résultats ont été obtenus pour les sols à l'état d'agrégation naturel, sur la figure 8, la teneur en argile a été obtenue après la désagrégation du sol par une solution de défloculant.

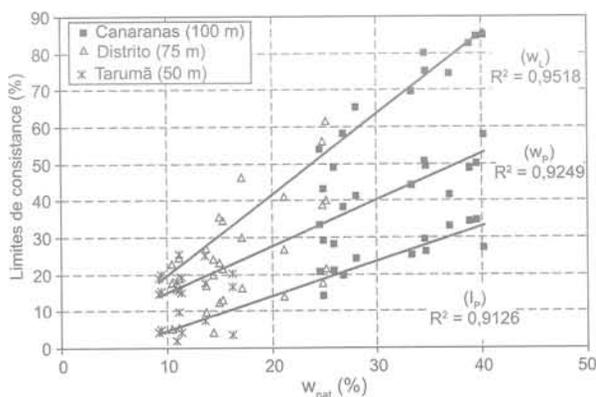


FIG. 7 Corrélations entre w_{nat} et les limites de consistance.

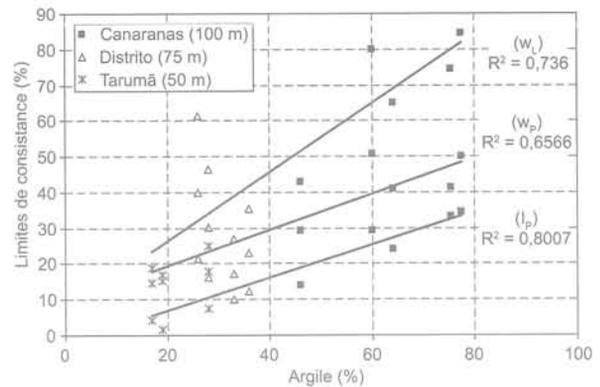


FIG. 8 Corrélations entre le pourcentage d'argile et les limites de consistance.

Benevelli *et al.* (2003) montrent que dans les sols tropicaux, le niveau de désagrégation par l'action de la solution défloculant dépend de la stabilité des agrégats et conséquemment du niveau de la météorisation qui a contribué pour la formation du sol.

Dans un profil de sol tropical, l'action des intempéries est généralement minimisée en fonction de l'augmentation de la profondeur, indépendamment de la cote topographique du relief. En analysant ces mêmes corrélations avec le pourcentage d'argile sans l'utilisation de la solution défloculant, nous avons constaté la même tendance du graphique vu dans la figure 8.

Les coefficients de corrélation entre la plasticité et la somme des pourcentages d'argile et de limon (Fig. 9) ont été légèrement supérieures aux coefficients, où on avait considéré seulement le pourcentage d'argile (Fig. 8). Les tableaux I à IV montrent que dans les analyses granulométriques sans l'utilisation de la solution défloculant, le pourcentage de limon est trop élevé, ce qui peut indiquer que, soit la fraction limon est active, soit, elle est transformée en argile, dans les analyses avec l'utilisation de la solution défloculant.

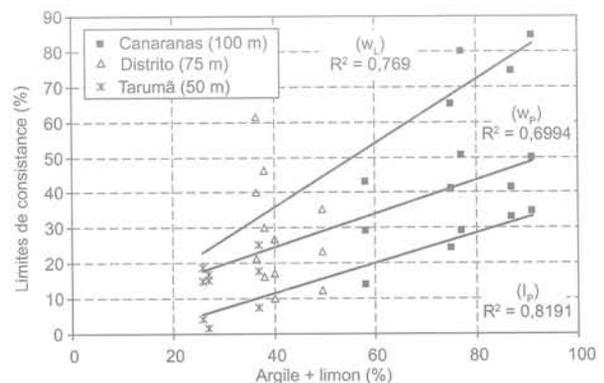


FIG. 9 Corrélations entre les sommes d'argile et de limon et les limites de consistance.

Propriétés physiques et minéralogiques

Afin d'analyser le niveau de corrélation existant entre la minéralogie, les limites de plasticité et la granulométrie, nous avons déterminé les intensités des pics de la kaolinite et du quartz. Ces valeurs ont été obtenues à partir des diffractogrammes des essais aux rayons x à chaque profondeur.

La figure 10 présente le graphique de corrélation entre la kaolinite et l'indice de plasticité. Cette même tendance a été observée pour les limites d'Atterberg. Cette figure montre qu'il y a une diminution de la « teneur » de la kaolinite avec l'augmentation des propriétés plastiques et conséquemment du pourcentage d'argile. Ceci paraît contrarier les concepts sur les limites de plasticité, dont les mesures sont dépendantes du type et de la quantité des minéraux argileux présents dans les sols.

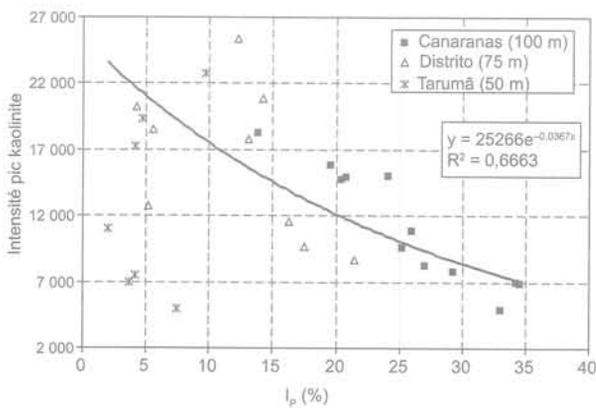


FIG. 10 Corrélation entre l'intensité du pic de la kaolinite et l'indice de plasticité.

Cette relation est due, probablement, à la présence d'un autre type de minéral argileux qui n'a pas pu être identifié dans les analyses de rayons x et que sa présence a une influence remarquable sur la plasticité de ces sols. Cardoso (2002) montre que la plasticité des sols tropicaux augmente avec la teneur en oxyhydroxyde de fer. Il est possible qu'une analyse minéralogique complémentaire puisse nous expliquer ces corrélations inverses. Toutefois, dans cet ensemble, les dispersions entre les deux paramètres sont importantes et on remarque la nécessité de la compréhension des résultats à partir des profils d'intempérie et de la formation des sols dans la région.

On peut observer que sur les cotes supérieures, et partant du domaine plus argileux (profil Canaranas et partie du profil Distrito), les propriétés de sols sont groupées dans une tendance prédéterminée et le reste dans une autre tendance, mais en gardant un certain parallélisme entre elles. Même si dans cet article, on ne présente pas la corrélation de l'intensité de pic de la kaolinite avec la teneur en argile, on remarque qu'elle a la même tendance que celle observée sur la figure 10.

Sur la figure 11, on trouve la corrélation espérée existante entre l'intensité du pic de quartz et l'indice de plasticité. C'est-à-dire que plus importante est la teneur en quartz, plus petit sera l' I_p . Ces résultats confirment

les hypothèses antérieures puisqu'il y a une bonne corrélation entre ces deux paramètres. Or comme l'altération du quartz est difficile, il peut être considéré comme un élément tampon. La figure 12 montre une bonne relation entre le pourcentage de sable et l'intensité du pic de quartz, ce qui démontre que la fraction de sable est, en grande partie, quartzreuse.

Les corrélations vues ci-dessus ont montré que les différences tout au long des profils, de sols de même qu'entre les ravins, sont fortement associées aux variations de cotes altimétriques. Chaque profil de sol étudié a été affecté par les processus d'intempérie et de météorisation qu'il a subis tout au long du temps. C'est-à-dire, que sur les cotes similaires, nous avons des propriétés et des caractéristiques des sols similaires. Cela pourra changer si le processus d'intempérie et la matière organique ont agi différemment.

Fatalement, c'est le cas pour les cotes de ces ravins, ce qui interfère imperceptiblement sur les propriétés et le comportement mécanique de ces sols. Il est évident, cependant, que le ravin Distrito, en terme de caractéristiques de sol, présente un comportement intermédiaire si on le compare aux autres ravins étudiés, ce qui nous a fait opter alors pour la poursuite et l'approfondissement des recherches sur ce ravin.

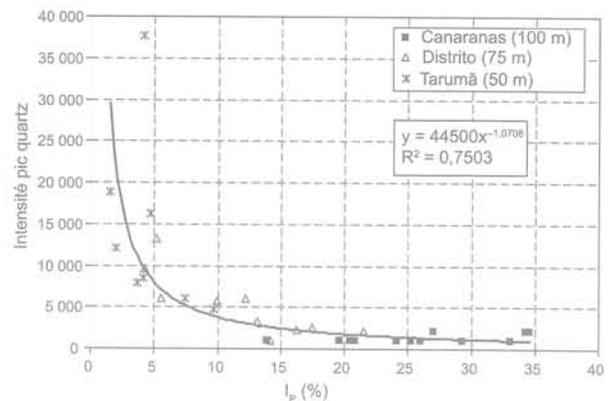


FIG. 11 Corrélation entre l'intensité du pic du quartz et l'indice de plasticité.

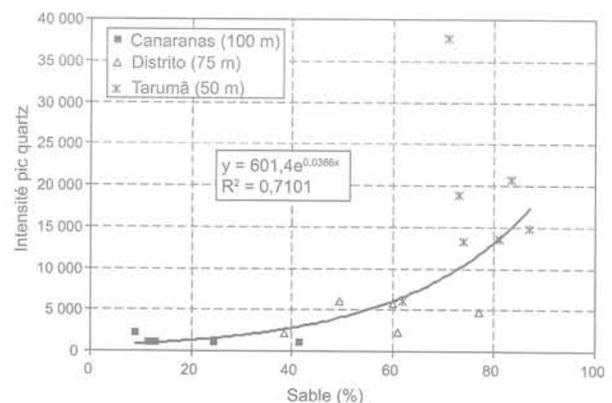


FIG. 12 Corrélation entre l'intensité du pic du quartz et le pourcentage de sable.

Propriétés physiques, minéralogiques et de comportement mécanique

Les analyses de corrélations entre les caractéristiques physico-minéralogiques et le comportement mécanique ont été obtenus pour le ravin Distrito. Il faut signaler que nous avons travaillé avec la tendance des graphiques car le nombre des résultats a été limité.

Le graphique de la figure 13 met en relation les valeurs de cohésion et les intensités de pics de la kaolinite. Cette figure montre que plus l'intensité de pic de la kaolinite est importante, plus la cohésion du sol est élevée, tandis qu'en faisant la même relation pour l'angle de frottement, on a trouvé un comportement inverse, comme on pouvait l'espérer. Un autre aspect doit être mis en question sur ces résultats : la kaolinite n'est pas un minéral argileux très actif et pourtant il est cohésif. Il faut remarquer que, dans le cadre de la météorisation des sols tropicaux, les oxyhydroxydes de fer et d'aluminium contribuent à un type de cimentation pour ces sols, en plus de la kaolinite. Leroueil et Barbosa (1999) introduisent la composante de cohésion due à la cimentation dans la résistance des sols tropicaux.

Nous n'avons pas pu obtenir de relations entre les paramètres de résistance et les intensités de pics de quartz. D'après le graphique de la figure 12, la phase granulaire de ce sol, à l'état naturel, peut être constituée d'autres minéraux, en plus de quartz, ce qui provoque la dispersion entre les points. Le même comportement a été observé pour des relations avec la somme entre l'argile et le limon.

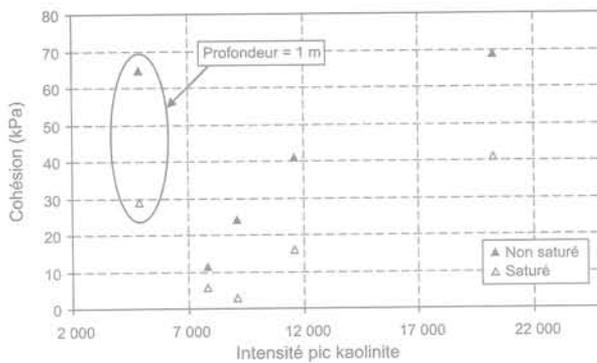


FIG. 13 Corrélation entre la cohésion et l'intensité du pic de la kaolinite.

Dans les sols tropicaux, la fraction limon et sable est, dans la plupart des cas, composée par des agrégats d'argile, limon et/ou sable. Le ciment dans ces agrégats peut être formé par ponts d'argile ou par oxyhydroxydes de fer et/ou d'aluminium.

Benevelli *et al.* (2003), montrent que les agrégats existants sur les profils des sols tropicaux ne sont pas, en leur majorité, désagrégables sous l'effet d'hexamétophosphate de sodium, qui est la solution de défloculant utilisée dans les essais de sédimentation au Brésil. Il faut remarquer que certains agrégats présents dans les sols tropicaux demandent de l'énergie mécanique pour être défaits.

Nous savons que le type de minéral d'argile, l'indice de vides et le degré de saturation ou la teneur en eau, sont des facteurs importants dans la définition de la succion d'un sol. En plusieurs cas, les corrélations avec chacun de ces facteurs séparément, conduisent à déterminer, parmi eux, lequel exercera une plus forte influence sur la succion pour un certain type de sol. Dans l'étude de la succion matricielle du profil de sol du ravin Distrito, nous avons analysé l'influence de la nature du sol sur ce paramètre. D'autres analyses sont présentées par Lima (1999).

Les mesures de succion utilisées dans la corrélation ont été obtenues à partir des échantillons prélevés avec l'humidité naturelle pendant l'essai du SPT. Pour cela, on a utilisé la technique du papier filtre.

Comme la succion dépend de la composition granulométrique, celle-ci étant d'autant plus importante que le sol est plus argileux, on a essayé d'établir une corrélation entre les propriétés plastiques et les mesures de succion matricielle. La figure 14 montre la relation entre la succion matricielle et l'activité de Skempton (I_a) pour ces sols, ce qui indique qu'il existe une influence de la nature du sol dans son comportement.

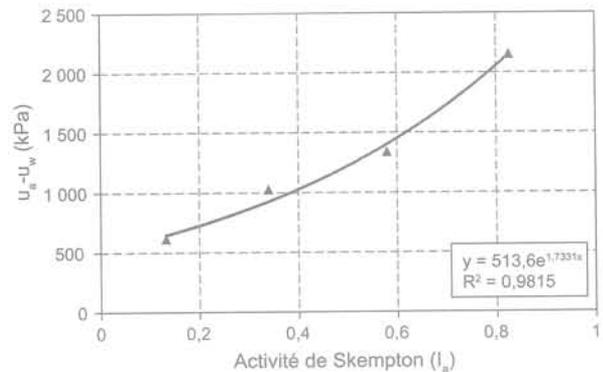


FIG. 14 Corrélation entre la succion matricielle et l'activité de Skempton.

4.4

Propriétés physico-minéralogiques, comportement mécanique et érodabilité

La corrélation entre l'érodabilité des sols et les paramètres géotechniques est très difficile due au grand nombre de variables qui interfèrent dans cette propriété. Les essais d'érodabilité n'ont été réalisés que pour le ravin Distrito. Ainsi, nous avons obtenus quelques relations entre les valeurs de pertes de sol (P.S.) trouvées dans l'essai d'Inderbitzen et les autres propriétés des sols.

Il faut tenir compte du fait que dans les essais d'Inderbitzen sur des sols non saturés, au fur et à mesure que les essais sont réalisés, le degré de saturation, et par conséquent, la succion et le comportement propre du sol vont changer. Ces altérations se produisent au cours d'essais imposant des limitations pour l'obtention de corrélations avec les autres propriétés du sol. La seule tendance de corrélation acceptable de la perte de sol à l'état initial non saturé a été obtenue avec la fraction de sable (Fig. 15).

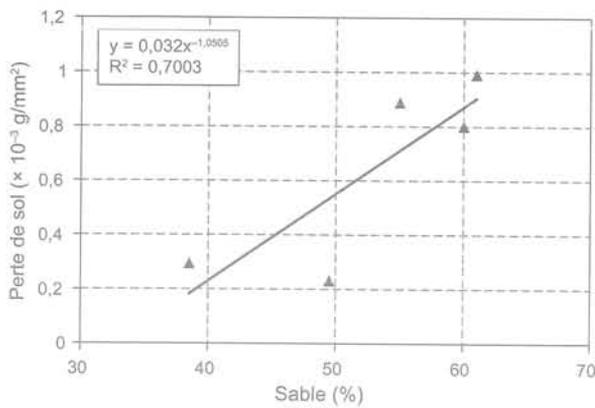


FIG. 15 Corrélation entre la perte de sol (non saturé) et le pourcentage de sable.

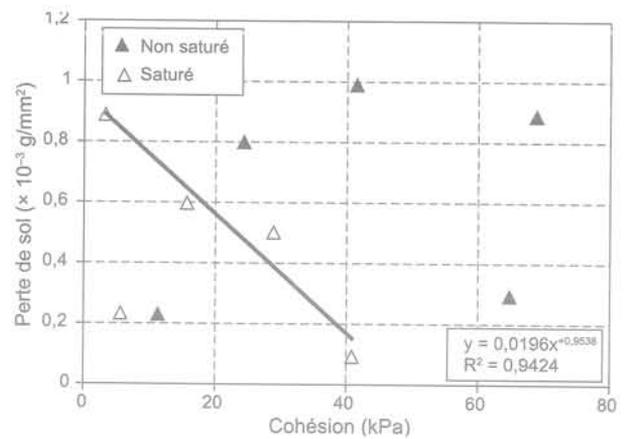


FIG. 17 Corrélation entre la perte de sol et la cohésion.

La figure 16 montre la corrélation entre la perte de sol (échantillon à l'état saturé) et le pourcentage de limon obtenu sans l'utilisation de la solution défloculant. On peut noter l'influence positive du limon à l'état naturel dans l'érodabilité. On remarque que cette même tendance a été observée pour la relation avec de la kaolinite. Dans la condition saturée, il est possible de vérifier que la perte de sol, et donc l'érodabilité, augmente avec la diminution de la cohésion du sol, alors que dans la condition non saturée, on n'a trouvé aucune tendance (Fig. 17). La figure 18 montre cependant qu'il y a une bonne corrélation entre la perte de sol, à l'état initial saturé et la variation de cohésion (Δc). Dans cet article, la variation de cohésion (Δc) est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta c = \frac{c_{\text{saturé}} - c_{\text{non saturé}}}{c_{\text{non saturé}}} \times 100 \quad (1)$$

Dans les sols tropicaux, Bender (1985) a vérifié que l'érodabilité est directement liée à la résistance au cisaillement. Ce fait a été constaté aussi par Bastos (1999). Dans cet article, pour les sols de Manaus, on a remarqué qu'il y a aussi une relation entre la variation de la résistance au cisaillement et les valeurs d'érodabilité (perte de sol saturé).

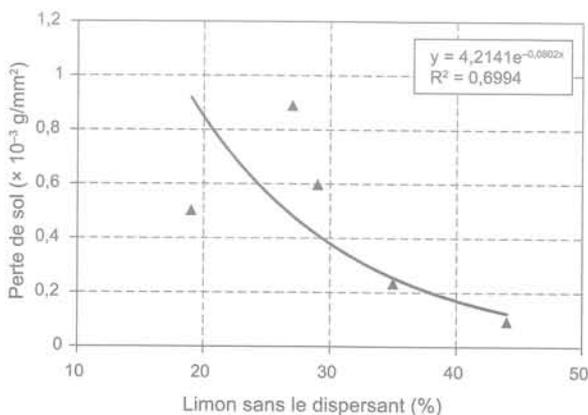


FIG. 16 Corrélation entre la perte de sol et le pourcentage de limon sans le dispersant.

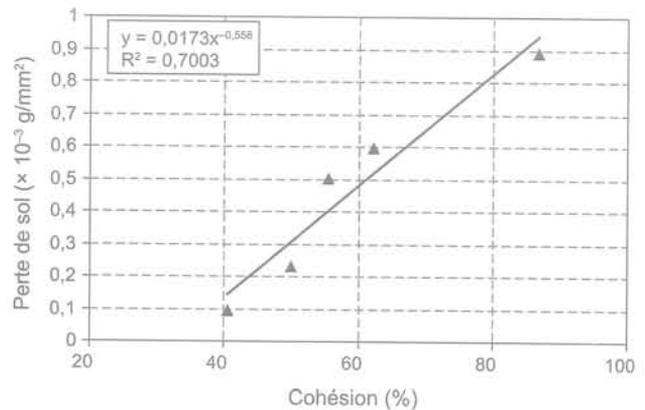


FIG. 18 Corrélation entre la perte de sol et la variation de perte de cohésion.

5

Conclusion

Des résultats, on peut constater que :

- les caractéristiques de la teneur en eau, de la plasticité et les fractions granulométriques des ravins étudiés dans la ville de Manaus se trouvent alignés et ne sont décalés que par les positions sur les cotes altimétriques ;
- les relations entre les pourcentages d'argile, les limites de plasticité et la teneur en eau sont convenables et cohérentes. Dans ce cas, les résultats valident l'influence de l'argile sur les propriétés plastiques du sol et sur la teneur en eau naturelle, ce qui revient à dire que, plus le pourcentage d'argile est important, plus les limites de liquidité et de plasticité, l'indice de plasticité et aussi la succion sont élevés ;
- les caractéristiques de succion, les paramètres de cohésion et aussi l'érodabilité sont influencés par la nature du sol ;

– la perte de cohésion de sol due au processus de saturation montre un excellent indicateur pour la prévision de l'érodabilité pour les sols tropicaux ;

– les meilleures relations ont été obtenues avec les valeurs de perte de sol dans l'état saturé. Étant donné les facteurs qui influencent conjointement les propriétés des sols dans l'état naturel tels que : la succion, la

cimentation, la macrostructure d'origine pédologique ou géologique, les relations avec la perte de sol à l'état naturel n'ont pas été possibles ;

– en fonction du grand nombre de variables intervenants dans l'érodabilité des sols, leurs relations avec d'autres propriétés des sols présentent des difficultés non négligeables.

Bibliographie

- ASTM 1992. D-5298 – *Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper*. Annual Book of ASTM Standards, vol. 15.09, p. 1312-1316.
- Basto C.A.B. – *Estudo Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Thèse de doctorat en génie civil, UFRGS, Porto Alegre, RGS, Brésil, 1999, 270 p.
- Bender H. – Érosion : un problème de résistance au cisaillement en fonction du chemin des contraintes pendant l'infiltration. *International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. Proceedings*, Brasília/DF, Brésil, ABMS, 1985, vol. 2, p. 15-25.
- Benevelli R.M., Oliveira C.G.M., Camapum de Carvalho J. – Influência do tipo de defloculante de partículas finas na determinação da granulometria. *I Symposium de Géotechnique du Centre-Ouest*, Brasília, DF, Brésil, 2003 (document numérique).
- Bento A.H. – Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Manaus, AM. Mémoire de Master en sciences environnementales. Domaine Géotechnique, CCA/UA, Manaus, AM, Brésil, 1998, 200 p.
- Cardoso F.B.F. – *Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília, DF, 2002, 358 p.
- Fernandes Filho L.A., Costa M.L., Costa J.B.S. – Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus, AM. *Revista de Geociências*, Université de l'État de São Paulo (UNESP), vol. 16, 1997.
- Inderbitzen A.L. – An erosion test for soils. *Materials Research & Standards* 1 (7), 1961, p. 553-554.
- Leroueil S., Barbosa P.S.A. – Combined effect of fabric, bonding and partial saturation on yielding of soils. *Proc. Asian Conf. on Unsaturated Soils*, Singapore, 1999, p. 527-532.
- Lima M.C. – Contribuição Estudo do Processo Evolutivo de Boçorocas na Área Urbana de Manaus. Mémoire de Master en Géotechnique, Université de Brasília, Brasília, DF, Brésil, 1999, 150 p.
- Lima M.C., Camapum de Carvalho J., Frota C.A. – Caracterização Geotécnica do perfil de solo típico da cidade de Manaus, AM. *Sols et Roches*, revue latino-américaine de géotechnique, vol. 23 (3), 2000, p. 143-155.
- Mortari D., Camapum de Carvalho J. – Modelo encaixado, uma proposição para a evolução das erosões no Distrito Federal. *10^o Congrès brésilien de mécanique des sols et génie géotechnique*, vol. 4, ABMS, Foz do Iguaçu, PR, Brésil, 1994, p. 1085-1092.
- Sherard J.L., Dunnigan L.P., Decker R.S., Steele E.F. – Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 102 (1), 1976, p. 69-85.
- Vilar O.M., Prandi E.C. – *Erosão dos Solos. Sols dans l'intérieur de São Paulo* (eds. J.C.A. Cintra & J.H. Albiero), ABMS, EESC, USP, Brésil, 1993, p. 177-206.

