

B. R. G. M.
Service Géologique des Antilles

Ministère de l'Urbanisme et du Logement
Direction des Affaires Economiques et
Internationales

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES
PROPRIETES PHYSIQUES ET GEOTECHNIQUES DES SOLS
ISSUS DE MATERIAUX VOLCANIQUES DES ANTILLES FRANCAISES

Par
Y. ATLAN et C. FELLER
(BRGM) (ORSTOM)

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote: A*15894 Ex: 1

RAPPORT B.R.G.M. 84. ANT. 004

Février 1984

AVANT - PROPOS

Le rapport BRGM n° 82 SGN 468 GEG intitulé "Etude des applications de la pédologie à la géotechnique routière. Exemple du Sénégal" (ATLAN et FELLER, 1982) avait pour objet l'examen des applications des données pédologiques (cartes, analyses de sols) aux problèmes géotechniques des régions tropicales d'Afrique. A l'exception des sols issus de l'altération des roches volcaniques les principales classes de sols rencontrés sous les tropiques ont été, à cette occasion, étudiées au Sénégal grâce à un financement conjoint DAEI (Ministère de l'Urbanisme et du Logement) - BRGM - ORSTOM.

Il a été décidé de compléter ce premier travail par une recherche sur les sols issus des roches volcaniques en mettant un accent particulier sur les sols à allophane et halloysite. Les régions d'étude choisies sont la Martinique et la Guadeloupe pour lesquelles on dispose de nombreuses données pédologiques et dont les sols d'origine volcanique sont caractéristiques de ceux rencontrés dans la zone caraïbe et latino-américaine. Le financement de cette deuxième étude est assurée à nouveau par la DAEI, le BRGM et l'ORSTOM.

La convention passée entre la DAEI et le BRGM prévoit deux phases d'études :

- une étude bibliographique,
- une étude expérimentale (analyses pédologiques et géotechniques).

Un premier rapport bibliographique (Rapp. BRGM 83.ANT.007, ATLAN, 1983) a été fourni à la DAEI en juin 1983. Le présent rapport constitue le rapport final de l'étude. Il intègre les premières recherches bibliographiques qui ont été complétées et présente les résultats expérimentaux.

Remerciements : Nous tenons à remercier vivement MM. COLMET-DAAGE et GAU-
THEYROU pour leur aide dans le choix des profils de sols
et leurs conseils bibliographiques.

R E S U M E

La Direction des Affaires Economiques Internationales (Ministère de l'Urbanisme) a confié au Bureau de Recherches Géologiques et Minières une étude à caractère général sur les matériaux provenant de l'altération des roches volcaniques sous le climat tropical des Antilles.

Ce rapport comporte trois parties :

- 1 - étude bibliographique
- 2 - examen de la pédogénèse des sols antillais
- 3 - résultat des campagnes d'échantillonnages spécifiques.

L'étude bibliographique montre l'intérêt de cette recherche : d'une part, les sols volcaniques tropicaux couvrent des étendues non négligeables de la planète, d'autre part les matériaux correspondant présentent des propriétés particulières au plan géotechnique. Ces propriétés sont liées à la minéralogie de leurs argiles donc à la pédogénèse.

L'étude expérimentale menée aux Antilles a été conduite en regroupant les matériaux en fonction de leur minéralogie, elle-même rapportée à la pédogénèse. On a cherché et établi ici des critères relativement simples permettant de classer les matériaux et donc de prévoir dans une certaine mesure leurs propriétés au moyen des essais d'identification et d'observations sur le terrain.

Plusieurs tableaux de résultats donnant des fourchettes de valeur sont ainsi présentés. Un résultat important est que la susceptibilité au séchage des caractéristiques géotechniques semble être un paramètre jamais négligeable a priori. En particulier l'essai Proctor sur matériau séché à l'étuve (comme il se fait d'habitude) n'est pas adapté à l'étude de la compactibilité de ce type de sol.

TABLE DES MATIERES

Avant - Propos

Chapitre I - Etude bibliographique

I.1 Délimitation du domaine étudié

- I.1.1 - Vocabulaire - Nature des sols et matériaux étudiés
- I.1.2 - Extension géographique

I.2 Pédogénèse des andosols et des sols à halloysite

- I.2.1 - Roche mère
- I.2.2 - Altération
- I.2.3 - Description des faciès caractéristiques
- I.2.4 - Test NaF

I.3 Propriétés physiques

- I.3.1 - Limites d'Atterberg
- I.3.2 - Granulométrie - structure
- I.3.3 - Teneur en eau naturelle et à différents pF
- I.3.4 - Contractions linéaires et volumiques - gonflement
- I.3.5 - Densités sèches et intrinsèques (γ_d et γ_s)
- I.3.6 - Compactabilité
- I.3.7 - Résistance au cisaillement
- I.3.8 - Compressibilité
- I.3.9 - Stabilisation des sols.

Chapitre II - Les principaux types de sol et matériaux meubles des Antilles Françaises.

II.1 - Les principaux types de sol

II.2 - Les sols dérivés de formations aériennes récentes

- II.2.1 - Sols peu évolués sur ponces et cendres (unité P)
- II.2.2 - Les andosols (unité T)
- II.2.3 - Les sols brun-rouille à halloysite (unité H)

II.3 - Les sols dérivés des formations anciennes

- II.3.1 - Les vertisols et sols rouges à montmorillonite (unités V et I)
- II.3.2 - Les sols ferrallitiques et fersiallitiques (unités G et K)

.../...

Chapitre III - Etude des propriétés géotechniques des matériaux meubles d'origine volcanique des Antilles Françaises

- III.1 - Echantillonnage et essais de laboratoire
 - III.2 - Sables ponceux peu ou pas altérés
 - III.3 - Matériaux des horizons B et C
 - III.3.1 - Tableau général des résultats sur échantillons frais
 - III.3.2 - Etude de l'influence du séchage
 - III.4 - Conclusions
-

FIGURES DANS LE TEXTE

- Figure 1 - Répartition mondiale des sols issus de l'altération de roches volcaniques (d'après Lyons Ass. 1976)
- Figure 2 - Position sur le diagramme de plasticité des andosols et latosols de Java (Wesley 1973)
- Figure 3 - Influence du séchage sur les limites d'Atterberg (d'après Lyons Ass, 1976)
- Figure 4 - Variation de W_L avec W_n d'après Maeda et al. 1976
- Figure 5 - Courbes Proctor des sols volcaniques de Java (Wesley 1973)
- Figure 6 - Carte pédologique et des pluies de la Martinique
- Figure 7 - Variation au séchage des limites d'Atterberg de sols volcaniques des Antilles
- Figure 8 - Variations des limites d'Atterberg avec séchage à l'air
- Figure 9 - Variation au séchage de la teneur en eau à pF 3,0
- Figure 10 - Courbes Proctor d'échantillons typiques de sol à allophane et de sol à halloysite.

TABLEAUX DANS LE TEXTE

- Tableau 1 - Processus de formation des minéraux argileux volcaniques
- Tableau 2 - Variation au séchage des L.A. et de la granulométrie de sols à allophane et à halloysite - WESLEY, 1973.
- Tableau 3 - Caractéristiques géotechniques des sols bruns de la Réunion
- Tableau 4 - Caractéristiques géotechniques des altérites sur roches volcaniques (Antilles Françaises).
- Tableau 5 - Contraction volumique et linéaire à pF 4,2.

ANNEXES JOINTES AU RAPPORT

- Annexe n° 1 - Caractéristiques géotechniques d'un sable ponceux non altéré et d'un sable ponceux peu altéré. S.G.ANT. 2965 à 2970
- Annexe n° 2 - Tableau et courbes récapitulant les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de matériaux regroupés dans les annexes
- 2.1 - matériaux allophoniques S.G.ANT. 2971
 - 2.2 - Matériaux à halloysite S.G.ANT. 2972
 - 2.3 - Ferrisols S.G.ANT. 2973
 - 2.4 - Matériaux à kaolinite et à montmorillonite. S.G.ANT. 2974
- Annexe n° 3 - Caractéristiques Proctor et CBR d'altérite à montmorillonite et/ou kaolinite. S.G.ANT. 2975 et 2976
-

CHAPITRE I - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique a porté principalement sur les sols issus de matériaux volcaniques et plus principalement sur les sols à allophane et à halloysite.

I.1 - DELIMITATION DU DOMAINE ETUDIÉ

I.1.1 - Vocabulaire - Nature des sols et matériaux étudiés

Le terme sol sera utilisé dans ce rapport dans son seul sens pédologique (sol = succession d'horizons de la surface à la roche saine). En géotechnique le concept de "sol" n'est pas identique à celui de la pédologie, il se rapproche plutôt de la notion de matériau (sables, argiles sableuses, etc.).

Selon l'âge des sols, la nature du substratum géologique et les conditions du milieu, divers types de sols peuvent se développer sur roches-mères volcaniques : sols bruns, ferrallitiques, fersiallitiques, vertisols, andosols. Deux types de matériaux issus de l'altération de roches-volcaniques ont des propriétés physiques et géotechniques particulières : les matériaux à allophane (andosols) et à halloysite (divers types de sols). Les matériaux d'autres types de sols (ferrallitiques, fersiallitiques, vertisols) ne se distinguent pas particulièrement de leurs homologues développés à partir de roches non volcaniques. Aussi ces derniers ne serviront-ils, dans cette étude, que de termes de comparaison pour les matériaux (ou sols) à allophane ou à halloysite.

Le terme "Andosol" est habituellement réservé aux sols à allophane. Le terme générique "sols volcaniques" est utilisé parfois abusivement car il recouvre des types de sols très différents. Il arrive aussi que sous le terme très général de "sols tropicaux" soient étudiés essentiellement des sols à allophane ou à halloysite (MICHALSKY et TEYSSONIERES, 1977). Les andosols des classifications françaises et FAO correspondent aux Andepts de la classification américaine. Le terme "Andisol" est parfois utilisé, en particulier par WARKENTIN et MAEDA (1980). Il a la même signification que Andosol. Signalons enfin que les sols jeunes, à textures grossières sur ponces volcaniques, à altération allophanique mais pauvres en éléments fins, ne sont pas ici classés comme "Andosols" (COLMET DAAGE, 1977). Aussi dans la suite de ce texte le terme "Andosol" sera réservé aux "sols à allophane" non compris les sols peu évolués sur ponces pour lesquels une revue bibliographique est faite par WARKENTIN et MAEDA (1980).

L'halloysite et la méta-halloysite sont des minéraux argileux cristallisés qui se rencontrent dans plusieurs types de sols. Les diverses classifications pédologiques ne comportent pas de classes de "sols à halloysite". Toutefois, les caractéristiques particulières des matériaux à halloysite aux plans physique et géotechnique conduisent à traiter ces matériaux comme un ensemble indépendant et ce, quelque soit le type de sol où ils sont trouvés. Notons que WESLEY (1973) étudiant les "latosols d'Indonésie" les présente comme typiques des matériaux à halloysite alors que les "latosols" d'autres régions (Brésil, par exemple) sont formés exclusivement de kaolinite. Aussi dans ce rapport nous n'utiliserons que les termes "sols ou matériaux à halloysite" et non pas des dénominations particulières de sols.

I.1.2 - Extension géographique

Les sols à allophane et/ou halloysite sont particulièrement bien développés sur les matériaux volcaniques (en particulier pyroclastiques) de diverses régions du monde (figure 1) : Caraïbes, Cordillère des Andes, Amérique Centrale, Etats-Unis, Alaska, Philippines, Japon, Indonésie, Nouvelle-Guinée, Nouvelle-Zélande, Hawaï, Afrique (Cameroun), Madagascar, Iles Canaries, Europe (France, Italie).

Toutefois, ces sols sont restreints aux zones humides (d'altitude ou non) car le maintien de leurs propriétés particulières est lié à celui de l'humidité du sol.

x
x x

I.2 - PEDOGENESE DES ANDOSOLS ET DES SOLS A HALLOYSITE

I.2.1 - Roche mère

Les sols étudiés se forment sur des roches mères volcaniques. En règle générale, il s'agit de cendres ou de ponces, mais il n'est pas rare non plus de les trouver en produit d'altération de lave ou de tufs volcaniques. Compte tenu de la spécificité du vocabulaire pétrographique utilisé, on trouver ci-dessous la définition des termes employés.

.../...

B.R.G.M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES DES ANTILLES FRANÇAISES

RÉPARTITION MONDIALE DES SOLS ISSUS DE L'ALTÉRATION
DE ROCHES VOLCANIQUES (d'après LYONS Ass. 1976)

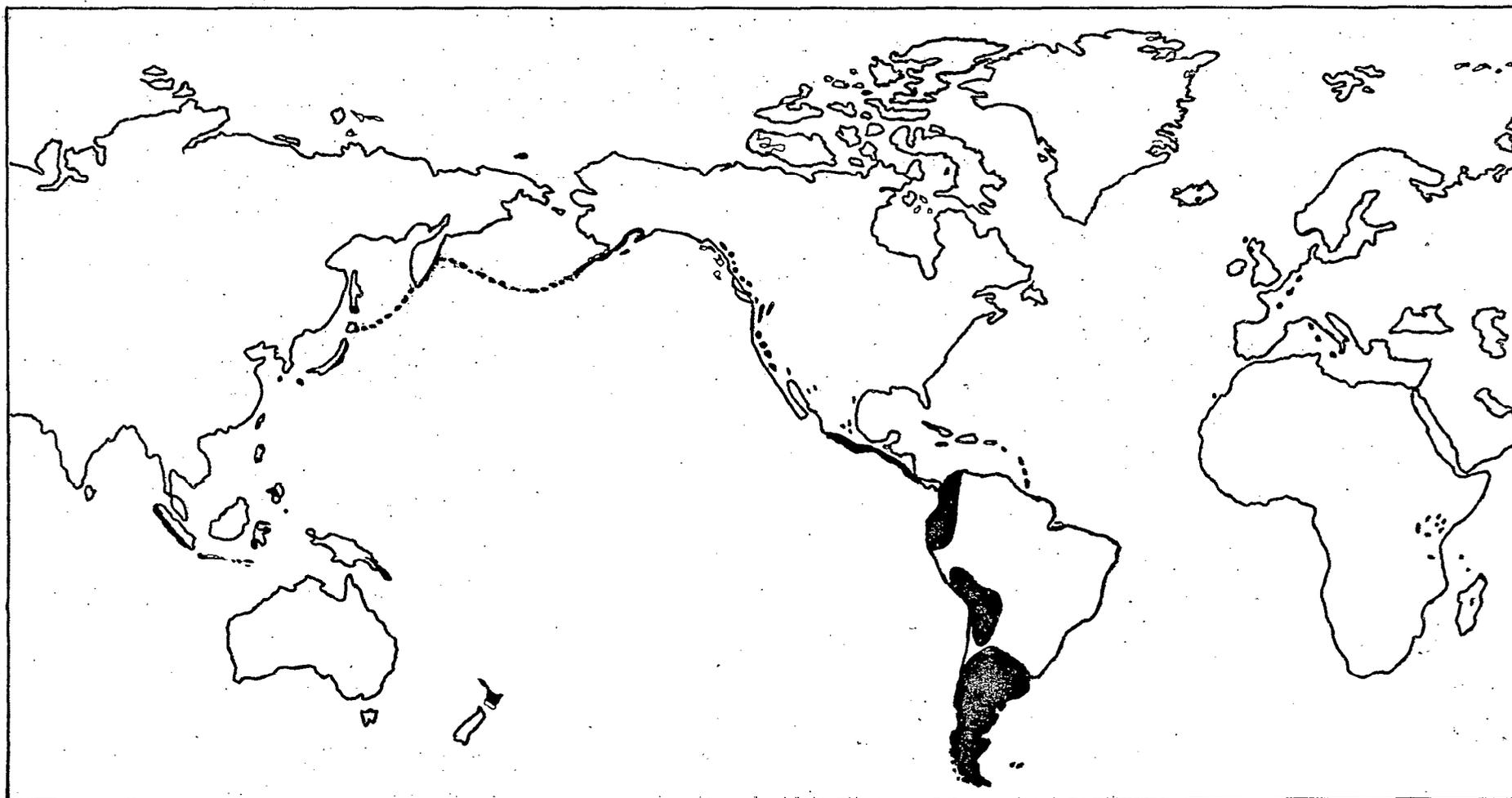


FIGURE 1

lave : roche émise en fusion par les volcans et donnant des coulées d'extension variable. Selon leur composition chimique et on peut les classer par acidité décroissante comme suit :

noms	minéraux essentiels
rhyolite	quartz, orthose
dacite	quartz, plagioclase, hornblende
andésite	plagioclase, hornblende
basalte	plagioclase, hornblende, augite, olivine.

scories : fragments de lave valcuolaire. Se trouve dans les projections volcaniques, ou sur des coulées dont la surface est craquelée.

lappilis: fragments de lave (éléments pyroclastiques) projetés par les volcans, granulométrie 2 mm à 30 mm. Leur accumulation est appelée lapilli, ou pouzzolane.

cenbres (volcaniques) : fragments de laves (éléments pyroclastiques) directement projetés par les volcans de granulométrie inférieure à 2 mm. Ces fragments sont constitués de magma pulvérisé (cendres vitreuses) et/ou de roches broyées provenant en particulier des parois de la cheminée. Les dépôts sont meubles ou peuvent avoir été consolidés (cinérites, tuf volcanique).

tuf: (volcanique) : roche formée par accumulation de projections volcaniques en fragment de quelques mm, pouvant contenir des blocs et/ou des cenbres, et consolidée sous l'action de l'eau.

tuffite : roche volcano-sédimentaire marine contenant 50 % au moins de lapilli et cenbres pris dans un ciment argileux ou calcaire.

ponce : roche magmatique volcanique vitreuse très poreuse. Elle se forme à partir de fragments de magma visqueux acide (rhyolitique, dacitique) qui, projetés en l'air par un volcan subissent une brutale chute de pression.

I.2.2 - Altération

I.2.2.1 - Processus d'altération

L'altération de la roche mère en climat chaud et humide est essentiellement une hydrolyse de ses silicates favorisée par :

- la chaleur qui entraîne une accélération de la vitesse des réaction
- l'eau de pluie qui apporte des ions H^+ .

Les éléments alcalins et alcalino terreux (K, Ca, Mg) sont ionisés et transportés ; le silicium, le fer et l'aluminium le sont dans une moindre mesure, ce qui explique que sur roche mère équivalente les sols de climats chauds sont plus riches en fer que les sols tempérés.

La réaction d'hydrolyse sera poursuivie et donc plus ou moins complète que si les ions hydratés sont éliminés, ce qui nécessite un bon drainage de milieu et un renouvellement constant de l'eau libre.

I.2.2.2 - Les produits d'altération

Selon FIELDS (1966) la séquence d'altération suivie par les roches volcaniques commence par la formation de produits amorphes transformés ensuite en argiles du type allophane, halloysite et montmorillonite -voir tableau n° 1

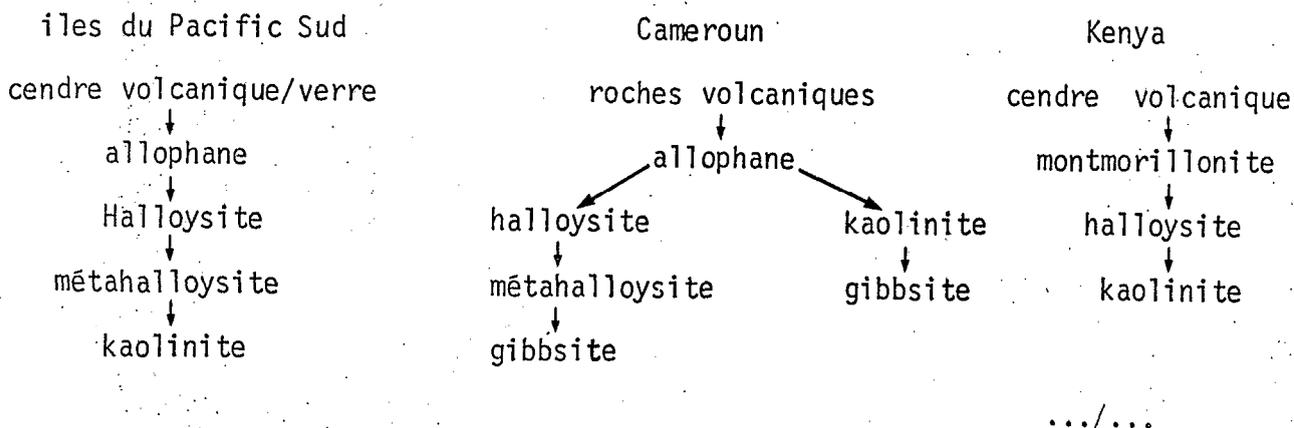
D'après BESOAIN (1969) cité par MICHALSKY (1977) les temps nécessaires pour arriver aux différents stades d'altération seraient les suivantes :

cencre en allophane	:	plusieurs siècles
allophane en halloysite	:	40 à 80 siècles
halloysite en kaolinite	:	plusieurs milliers de siècles.

- un bon drainage et une pluviométrie annuelle supérieure à 1,5 m conduisent à la formation d'allophanes et d'halloysite. L'allophane se trouve généralement sur les cendres les plus jeunes, ou bien là où des dépôts successifs de cendres renouvellent le matériau originel, à des altitudes plus élevées, sous des pluviométries importantes. L'halloysite est généralement trouvée sur des cendres plus vieilles à des altitudes moins élevées et une pluviométrie moins importante, comprenant une saison sèche. Il existe probablement des matériaux intermédiaires, semi-cristallins, se situant entre halloysite et allophanes.
- un mauvais drainage conduit à la formation de montmorillonite.

tableau n° 1

Processus de formation des minéraux argileux volcaniques



1.2.2.3 - Description des argiles dominantes

- Allophane

C'est un silicate d'alumine hydraté amorphe dont la composition varie de $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ à $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$. La capacité d'échange cationique CEC est forte : voisine de 100 selon DUCHAU-FOUR(1977). La structure poreuse des agrégats d'allophane leur permet de retenir des quantités importantes d'eau hygroscopique.

L'allophane ne diffracte pas les rayons X. A l'analyse thermique différentielle elle montre un pic endothermique à environ 100° . L'allophane est plus difficile à détecter en présence d'halloysite hydratée ou de gibbsite car il peut alors y avoir confusion des pics ATD. Son dosage est délicat et s'effectue le plus souvent par des hydrolyses acido-alcalines séquentielles.

- Halloysite

Existe sous deux formes : l'halloysite hydratée $\text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{SiO}_2, 4 \text{H}_2\text{O}$ et la métahalloysite $\text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{SiO}_2, 2 \text{H}_2\text{O}$.

• Halloysite hydratée :

Elle est constituée de feuillets de kaolinite qui se succèdent sans ordre et séparés par une couche d'eau monomoléculaire de $4 \text{H}_2\text{O}$.

L'équidistance entre deux feuillets est de $10,1 \text{ \AA}$

La formule de la demi-maille est :

$\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ avec "n" le plus souvent égal à deux (CAILLERE et HENIN, 1963).

Par déshydratation vers $60-70^\circ\text{C}$, parfois même à la longue au laboratoire, le minéral perd une partie de son eau et se transforme en métahalloysite. La déshydratation n'est totale que vers 400°C . Sur la courbe thermique différentielle, le départ de l'eau interfeuillets se confond avec celui de l'eau hygroscopique. Il s'accompagne d'une contraction du minéral entre 0 et 100°C et se traduit par un fort accident endothermique.

• Métahalloysite

Elle se rapproche beaucoup plus de la kaolinite, c'est un empilement désordonné de feuillets de kaolinite avec parfois une couche d'eau monomoléculaire entre les feuillets (au maximum, une couche d'eau pour quatre feuillets de kaolinite).

Il provient de la déshydratation irréversible de l'halloysite par perte partielle d'eau interfeuillet.

L'équidistance entre deux feuillets va de 7,36 à 7,9 Å (7,2 Å pour la kaolinite).

Formule de la demi-maille : $\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4 + 0,5 \text{ à } 1,5 \text{ H}_2\text{O}$ (GRIM, 1958).

Symétrie pseudo-hexagonale (la kaolinite est triclinique).

I.2.3 - Description des faciès caractéristiques

- Andosols

Le terme Andosol vient du Japon : il signifie sol noir, car la couche supérieure de ce sol est souvent gris sombre ou noire à cause de sa haute teneur en matière organique, du moins au Japon.

Un caractère spécifique des andosols est que l'allophane y est l'argile dominante. On y trouve aussi de l'halloysite et de la kaolinite, de la cristobalite, de la gibbsite.

Ils ne sont pas, en général, noirs en profondeur mais plutôt brun-jaunâtre. Les profils sont de type A, (B), C. L'épaisseur est variable, elle atteint 50 m à JAVA où ces sols se développent sur des dépôts de cendres volcaniques formées de cendre successives, chaque couche ayant été déjà altérée quand elle a été recouverte par la couche précédente.

La texture est d'apparence limoneuse et au "toucher onctueux" à l'état humide. Le matériau, pressé entre les doigts, résiste jusqu'à une certaine limite puis cède en libérant de l'eau (thixotropie).

Les andosols proviennent en général de l'altération de cendre volcanique ou de ponces et toujours sous l'effet d'un climat humide sans saison sèche marquée. Certains auteurs notent qu'ils ne se forment qu'à partir de 1000 m d'altitude. Il semble bien que l'altitude n'intervienne ici que parce que elle induit des pluies plus abondantes et peut être une température plus froide évitant le dessèchement entre deux précipitations.

Sols à halloysite

Ce sont des sols rougeâtres dont l'argile dominante est l'halloysite. On y trouve également kaolinite et allophane.

Ils se trouvent dans les zones moins pluvieuses que celles où se forment les allophanes. Certains auteurs notent que ces sols se forment qu'à des altitudes inférieures à 1000 m. Ici aussi ce critère doit en réalité être remplacé par celui de la pluviométrie et peut être de la température. En tout cas, ces considérations expliquent la disposition en auréole des sols à halloysite autour des sols à allophanes.

Les profils d'altération sont profonds et atteignent souvent 10 mètres

I.2.4 - Test NaF

La présence de quantité importante de substances amorphes dans les andosols permet souvent grâce à un test de terrain très simple de les distinguer des sols avoisinants à minéraux argileux cristallisés (Test de FIELDER et PERROT, appelé aussi "Test NaF"). Nous décrivons ce test en détail car il est d'une importance capitale pour la reconnaissance des matériaux à allophanes et mériterait d'être utilisé systématiquement dans les laboratoires géotechniques situés dans les régions volcaniques.

Nous reprenons ici la description de QUANTIN (1972).

"En Nouvelle-Zélande, M. FIELDER et K.W. PERROT (1966), reprenant une découverte d'EGAWA (1960) sur la propriété des "allophanes" de développer avec le fluorure de sodium une réaction alcaline (pH 9,5 à 11), ont mis au point un test applicable sur le terrain ou au laboratoire. L'alcalinité d'échange provoquée par la réaction de l'allophane avec le fluorure de sodium peut être soit décelée sur le terrain par la coloration en rouge vif de la phénol-phtaléine, soit mesurée au laboratoire avec un pH - mètre.

Sur le terrain on dépose une pastille de sol humide sur un papier filtre imprégné de phénol-phtaléine ; on verse sur celle-ci quelques gouttes de fluorure de sodium (solution saturée) jusqu'à saturation du sol ; en quelques secondes la coloration rouge de la phénol-phtaléine apparaît vivement si l'allophane est abondante, ou médiocrement si le sol n'en contient que des traces. Elle n'apparaît pas en seule présence d'argiles ou d'hydroxydes bien cristallisés.

Au laboratoire on met en contact 1 g de sol et 50 ml de NaF, pendant une heure ; on mesure le pH qui doit atteindre 10 à 11 en présence d'une forte quantité d'allophane.

De nombreuses réserves ont été faites à ce test, notamment par J.E. BRYDON et J.H. DAY (1969) ; les sols contenant des carbonates (sols calcaires), des hydroxydes d'alumine non cristallisés (B₂ de podzols), ou de la gibbsite finement broyée, certaines espèces d'illite ou de chlorite, réagissent aussi à ce test. Par contre, la présence abondante d'une matière organique très acide dans les sols de montagne peut masquer la réaction du fluorure avec les substances "amorphes" (alumine non cristallisée et "allophanes").

Cependant, il faut reconnaître, en dépit de réserves généralement prévisibles, que le test de FIELDS et PERROT est confirmé le plus souvent par les analyses de laboratoire et qu'il peut donc rendre d'appréciables services sur le terrain".

En Martinique et Guadeloupe, on a pu constater que le test était négatif (ou très faible) dans les sols à halloysite, kaolinite ou montmorillonite ne contenant pas d'allophane. Par contre, les ponces non complètement altérées réagissent positivement au test NaF.

X
X X

I.3 - PROPRIETES PHYSIQUES

On sait depuis longtemps (TERZAGHI, 1958) que certains matériaux meubles situés sur des roches mères volcaniques en région tropicale humide montrent des propriétés inhabituelles. Ces sols ont souvent des teneurs en eau très élevées mais pourtant de hautes résistances au cisaillement. Certains ont un aspect sableux ou silteux mais après remaniement se transforment en argiles saturées très plastiques. La plupart de ces sols ont des caractéristiques qui changent - de façon irréversible - avec le séchage à l'air.

Actuellement, il semble acquis que ces propriétés sont dues à la présence d'allophane et d'halloysite (LYONS Ass, 1976). Il s'agit donc spécifiquement des types de sols que nous avons ici appelés andosols (allophane dominant) et sols à halloysite (halloysite dominant, allophane accessoire).

La susceptibilité au séchage est un caractère extrêmement important de ces matériaux (ne serait-ce que par les conséquences que l'on doit en tirer quant aux méthodes expérimentales de détermination des caractéristiques repré-

.../...

sentatives du matériau in situ) qui a été observé notamment sur les résultats* de (s) :

- l'analyse granulométrique : KUBOTA (1972) (W), WESLEY (1973), COLMET-DAAGE et al. (1972), VAN SCHUYLENBORGH (1954)
- les teneurs en eau à différents pF : COLMET-DAAGE et al. (1967), GAUTHEYROU (1981) ;
- densités apparentes : GAUTHEYROU (1981) ;
- limites d'Atterberg (et en particulier de la limite de liquidité W_L) : LYONS (1976), MAEDA et al. (1976) VAN SCHUYLENBORGH (1954). L'effet du temps de mélange est aussi noté par WESLEY (1973) ;
- caractéristiques PROCTOR : WESLEY (1973), KUNO et MOGAMI (1949) (M), LARSON et al. (1979) (W) ;
- résistances au cisaillement : WILLIS (1946) (W), ADACHI et al. (1977) (W) ;
- cohésion : YAMANAKA (1964) (M), MAEDA et SOMA (1974) (M)

Les résultats obtenus sont assez dispersés : la teneur en eau du matériau, le pourcentage d'allophane expliquent en partie cette dispersion notée par GEIST et STRICKLER (1978) dans le cas des andosols et pour les horizons de profondeur.

1.3.1 - Limites d'Atterberg

La figure 2 donne les domaines occupés sur le diagramme de Casagrande par les "latosols" et les andosols de Java testé par WESLEY, (1973). Le point à noter est que pour les andosols la droite de régression IP/W_L n'est pas parallèle à la droite A mais à une pente plus faible : l'indice de plasticité varie moins que la limite de liquidité, ce qui, exprimé, autrement signifie que le domaine de variation de IP est plus faible que celui de W_L .

* Certaines des références citées dans ce chapitre (en particulier pour les travaux japonais) concernent des articles que nous n'avons pu lire in extenso mais qui sont analysés dans les revues bibliographiques de MAEDA et al. (1977) et de WARKENTIN et MAEDA (1980). Nous indiquerons la source de ces références par les lettres (M) et (W) selon qu'elles proviennent de l'un ou l'autre de ces deux articles. Nous les avons tout de même reportées dans la liste bibliographique de façon aussi complète que possible, en utilisant pour cela la "chronobibliographie des sols à allophane" de GAUTHEYROU (1976 et suppléments)

Nous avons négligé de citer les références ayant trait aux effets de la matière organique sur les propriétés physiques et géotechniques des sols étudiés puisque les horizons humifères sont systématiquement éliminés des prélèvements géotechniques.

B.R.G.M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES
DES ANTILLES FRANÇAISES

POSITION SUR LE DIAGRAMME DE PLASTICITÉ
DES ANDOSOLS ET LATOSOLS DE JAVA (WESLEY, 1973)

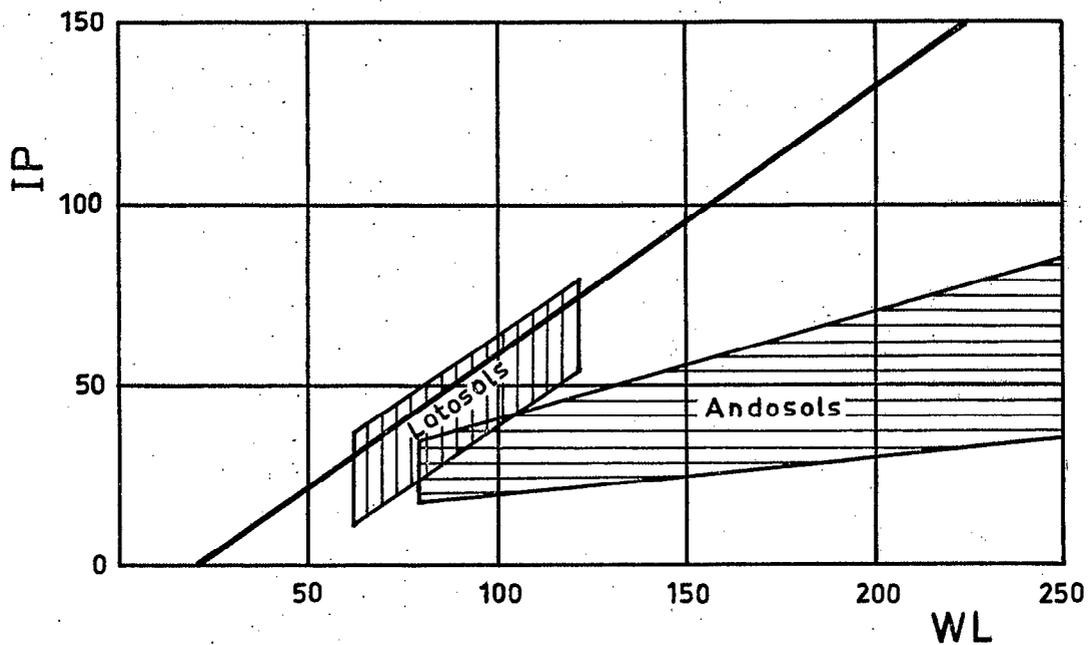


FIGURE 2

Pour la zone Caraïbe il faut citer les travaux de WARKENTIN (1974), WARKENTIN et MAEDA (1974), MAEDA et WARKENTIN (1975). Ces auteurs comparent les caractéristiques d'Atterberg pour différents types de sols en fonction de leur minéralogie : montmorillonite, kaolinite-halloysite (sec ou humide). L'ordre de variation de IP est le suivant :

Montmorillonte	>	Kaolinite-Halloysite	>	Allophane frais	>	Allophane sec		
IP =		37 à 80		30		11 à 25		0 à 8

De très bonnes corrélations sont trouvées entre W_L , W_P ou W_L (frais - sec) et teneurs en allophane (mesurées par réhydratation) ainsi qu'entre W_L et pF 4,2.

A partir des mesures de IP et de la teneur en argile on calcule un coefficient d'activité $m = \frac{IP}{A} \%$. Pour les matériaux à allophane, NORTHEY (1966) (M) mesure des valeurs $A \%$ de m de 1,2 à 1,5 alors que WESLEY (1973) trouve 0,6. Ces variations sont probablement dues aux difficultés d'estimation de A %.

WARKENTIN et MAEDA (1974), THRALL (1979), McNABB (1979) proposent des estimations de l'intensité du caractère allophane à partir des mesures de limites d'Atterberg. WARKENTIN (1972) estime que la mesure de W_L pour les allophanes est préférable à celle de la teneur en argile pour caractériser de façon simple ces matériaux.

- Influence du séchage

Le séchage du sol amène une diminution de ses limites d'Atterberg, W_L diminuant plus que W_p ; (LYONS, 1976, ROSELLO et CHEVIN, 1983).

Cette variation (voir figure 3) est attribuée à une deshydratation irréversible des allophanes. Les sols à halloysite présentent aussi ce phénomène mais moins marqué. On l'attribue alors soit à la transformation des halloysites hydratés en métahalloysite soit et, c'est une interprétation plus récente, à la deshydratation d'allophanes que contiennent également les sols à halloysite.

Pour de fortes teneurs en eau, W_L reste constant quand W diminue, c'est à dire au cours d'un séchage graduel du sol. Puis W critique est atteint en-dessous duquel W_L diminue (voir figure n° 4). Ce point critique se situe entre pF 3,8 et 4,4 pour plusieurs sols japonais (SOMA, 1978 - cité par WARKENTIN et al., 1980). Un résultat analogue est donné par COLMET-DAAGE et al., 1967 et GAUTHEYROU, 1981.

B.R.G.M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES DES ANTILLES FRANÇAISES

INFLUENCE DU SÉCHAGE SUR LES LIMITES D'ATTERBERG (d'après LYONS Ass.)

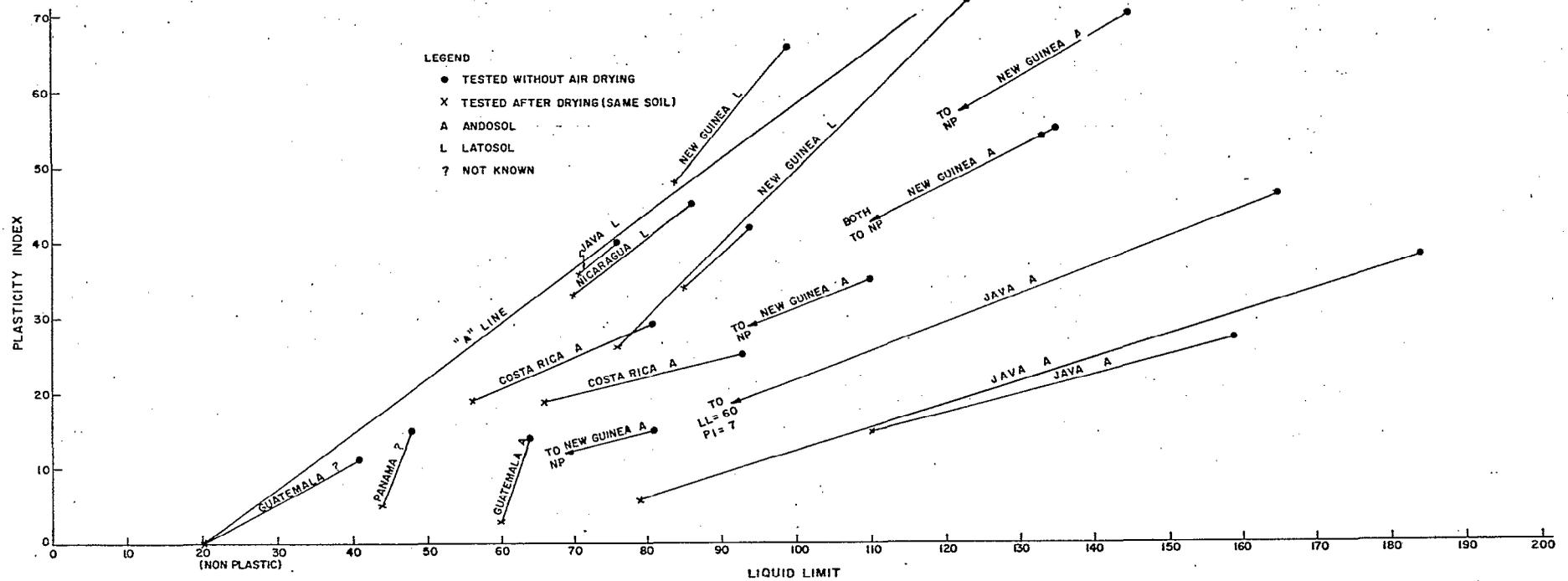
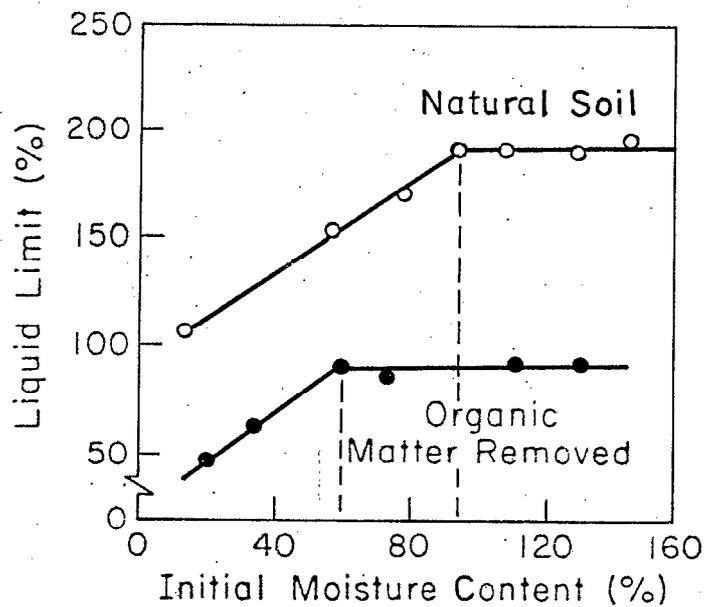


FIGURE 3

B.R.G.M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES
DES ANTILLES FRANÇAISES

VARIATION DE WL AVEC W_n
D'APRÈS MAEDA ET al. 1976



Le tableau ci-dessous d'après WESLEY, (1973) donne pour des échantillons prélevés à Java la variation au séchage des limites d'Atterberg et de la granulométrie.

Tableau n° 2

	Allophane			Halloysite		
	humide	séché à l'air	séché au four	humide	séché à l'air	séché au four
W _L	165	60	43	94	75	62
IP	44	6	1	30	16	10
argile %	65	10	5	76	65	60
silt %	28	22	10	19	28	28
sable %	7	68	85	5	7	7

- Influence du remaniement

La durée du malaxage qui précède les mesures des limites d'Atterberg semble avoir une influence dans le cas des andosols. Une augmentation de 45 minutes de la durée du malaxage (par rapport à la durée minimum nécessaire pour mesurer W_L) entraîne une baisse de W_L de 14 points (WESLEY, 1973).

Ceci expliquerait que les teneurs en eau naturelle mesurées sur échantillon intact soient parfois supérieures à W_L, sans pourtant que l'on observe que les massifs de sol soient instables.

I.3.2 - Granulométrie - Structure

Les granulométries donnent des résultats qui dépendent du séchage préalable de l'échantillon et de l'agent dispersif utilisé.

Ces variations sont importantes quant l'allophane est l'argile dominante. Elles sont moins sensibles lorsque c'est l'halloysite.

- Influence du séchage

Il entraîne une granulation du matériau, qui s'accompagne semble-t-il de transformations minéralogiques irréversibles.

allophane —————> halloysite
halloysite —————> métahalloysite

On se reportera au tableau n° 1 pour les résultats obtenus par WESLEY sur des sols de Java.

- Influence de l'agent dispersif

Dans les matériaux riches en allophane la détermination exacte des teneurs en argiles et limons est très aléatoire par suite de la difficulté d'assurer une bonne dispersion du gel (COLMET DAAGE et al. 1972, MAEDA et al. 1977, WADA, 1977). Des techniques spéciales doivent être mises en oeuvre : ultra-son, dispersion à pH variables (3,0 et 9,0) à l'aide de polyphosphates. AHMAD et PRASHAD (1970) ont proposé d'utiliser un sel de zirconium qui permet l'obtention de particules à charges positives ce qui facilite la dispersion.

WARKENTIN et al. (1980) concluent que la teneur en argile des andosols ne peut être utilisable comme paramètre d'identification : l'influence de l'énergie de dispersion, de l'agent défloculant, de la composition minéralogique (action de la gibbsite) rendent les résultats non significatifs.

FLACH (1969) propose de déduire la teneur en argile des mesures de teneur en eau à pF 4,2.

- La structure des andosols

Selon MAEDA et al. (1977) deux unités structurales ont été mises en évidence aux tailles de 10^{-3} et 10^3 μm . La présence d'unités intermédiaires ne serait pas certaine. Des avis divergents sont donnés quand à la structure des andosols, ses variations avec le séchage et ses effets sur les propriétés physiques des sols (TASKEY et al. 1979).

.../...

I.3.3 - Teneur en eau naturelle W_n et à différents pF

La teneur en eau naturelle W_n ou à différents pF des matériaux allophaniques est beaucoup plus élevée que celle d'autres types de matériaux pour une même teneur en éléments fins (0 - 20 μm). W_n varie de 100 à 300 %. Les teneurs en eau à pF 2,5 (échantillon frais) sont souvent identiques à W_n (COLMET DAAGE et al., 1972) et celles à pF 4,2 varient environ de 60 à 100 %. L'eau utile EU (différence de la teneur en eau à pF 2,5 et de la teneur en eau à pF 4,2) est d'environ 40 à 50 %, c'est à dire du même ordre que celle des autres sols argileux.

Les teneurs en eau aux différents pF de matériaux à allophane varient énormément selon la préparation de l'échantillon (frais, lyophilisé, séché à l'air ou étuvé) et de façon irréversible. COLMET DAAGE et al. (1967) proposent d'utiliser cette propriété pour estimer la teneur en allophane de l'échantillon en mesurant la variation des différences des humidités à pF 4,2 entre l'échantillon frais et l'échantillon préalablement séché à l'air. Des observations identiques sont faites par GAUTHEYROU (1981) à partir des mesures de variation de EU avec le séchage. Cet auteur présente aussi un diagramme trilineaire : $(\text{pF } 2,5 \text{ frais} - \text{pF } 4,2 \text{ frais}) / (\text{pF } 4,2 \text{ frais} - \text{pF } 4,2 \text{ sec}) / \gamma_d$ / permettant de classer les matériaux non allophaniques, ceux à allophane de transition et dessèchement de surface et ceux à allophane à humidité constante.

I.3.4 - Contractions linéaires et volumiques, gonflement

Ces déterminations ne sont pratiquement pas évoquées dans la littérature. GAUTHEYROU (1981) a mesuré ces propriétés pour différents types d'andosols de Guadeloupe et Martinique à différents pF et pour des échantillons frais, séchés à l'air ou à 105°. Il observe des variations de contraction volumique avec le séchage variant de 20 à 70 %. Le gonflement des matériaux à allophanes est faible à nul à la rehumectation lors des processus non irréversibles.

I.3.5 - Densités sèches et intrinsèques (γ_d et γ_s)

La densité sèche (γ_d) des andosols est un critère de classification pédologique ($\gamma_d < 0,84$). Les valeurs habituellement citées varient de 0,3 à 0,8 (COLMET-DAAGE et LAGACHE 1965, COLMET-DAAGE et al. 1977 ; QUANTIN 1972, WARKENTIN et MAEDA, 1980, MAEDA et al. 1977, SWINDALE, 1969, WADA et HARWARD, 1974). SHERMAN et al. (1964) donnent même une valeur de 0,1 pour des sols à allophane (pauvres en silice) d'Hawaï.

La densité sèche pour les sols à halloysite est d'environ 0,8 - 0,9 (COLMET-DAAGE et al., 1972).

La densité sèche des matériaux allophaniques varie fortement avec le séchage (WILLIS, 1946) mais elle reste constante au-delà de pF 4,2 (GAUTHEYROU 1981).

Les densités intrinsèques (γ_s) sont à peu près identiques à celles des autres matériaux 2,5 à 2,8 pour les allophanes et 2,74 à 2,88 pour les halloysites (WESLEY, 1973). Pour les matériaux allophaniques, FJRSYTHE et al. (1969) indiquent des valeurs de 2,7 à 2,9. WADA et WADA (1975) (M) ont mesuré des γ_s de 2,72 à 2,78 mais signalent la nécessité d'utiliser des techniques particulières pour l'élimination de l'air piégé. Il est probable que les valeurs plus faibles souvent citées dans la littérature (2,1 à 2,5) sont liées à ces problèmes. BONFILS et MOINEREAU (1971) mesurent des densités intrinsèques variant de 2,32 à 2,70, les valeurs faibles correspondant aux échantillons les plus riches en matière organique.

I.3.6 - Compactabilité

- Résultats obtenus sur les sols de Java (WESLEY, 1973)

Des résultats caractéristiques sont donnés figure n° 5. On notera (1) les variations de W_{opm} et γ_{opm} avec le séchage (latosols)
(2) l'absence d'un optimum marqué pour les andosols frais
(3) la faible valeur de γ_{opm} .

- Résultats obtenus au Kenya

Le barrage de Sasumua a été construit avec des argiles rouges, à halloysite. Les caractéristiques PROCTOR étaient :

W_{opm} de 55 à 45 % et γ_{opm} de 1,0 à 1,2 t/m³.

Les tassements de la digue calculés à partir de ces valeurs pour un sol ordinaire conduisent à des valeurs de l'ordre de 5 m. En fait les tassements furent insignifiants et la digue se comporte parfaitement. TERZAGHI (1958) suggère que les propriétés anormales de ce sol s'expliqueraient par l'hypothèse que la fraction argileuse se trouve sous forme d'agrégat poreux à surface rugueuse. Par ailleurs, la valeur élevée de W_{opm} devait être corrigée d'environ - 20 % correspondant à de l'eau non libre.

WESLEY (1973, 1977) n'a pas, pour les andosols de Java, jugé satisfaisante l'hypothèse de TERZAGHI. Il considère qu'une explication plus vraisemblable du comportement du matériau est à chercher dans la nature de ses argiles. Il suggère également que les agrégats observés sur les sols compactés du Kenya sont probablement dûs au séchage en cours d'essai.

DIXON et al. (1958) signalent l'utilisation avec succès, de compacteurs vibrants et la possibilité de diminuer de 25 points la teneur en eau naturelle (pour la ramener au voisinage de l'optimum proctor) par simple séchage, à l'air.

B. R. G. M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES
DES ANTILLES FRANÇAISES

COURBES PROCTOR DES SOLS VOLCANIQUES
DE JAVA (WESLEY, 1973)

fig. 5a - Andosols

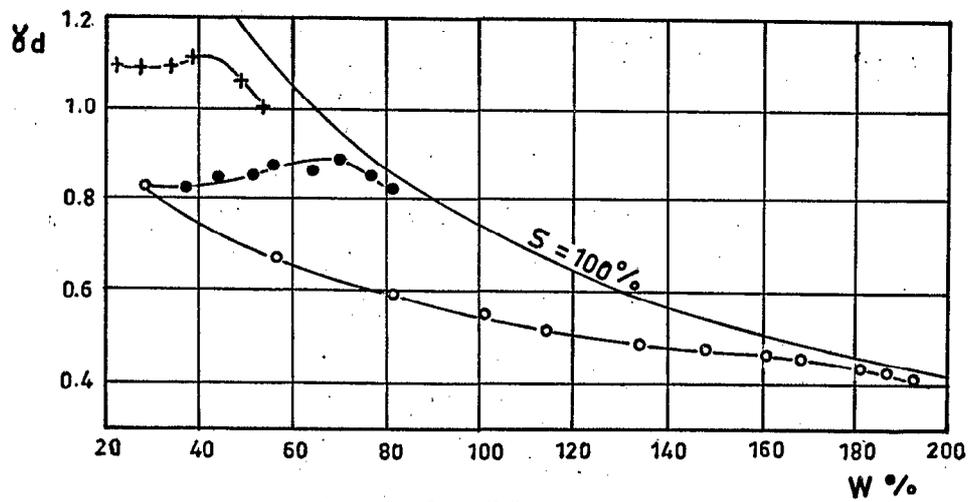
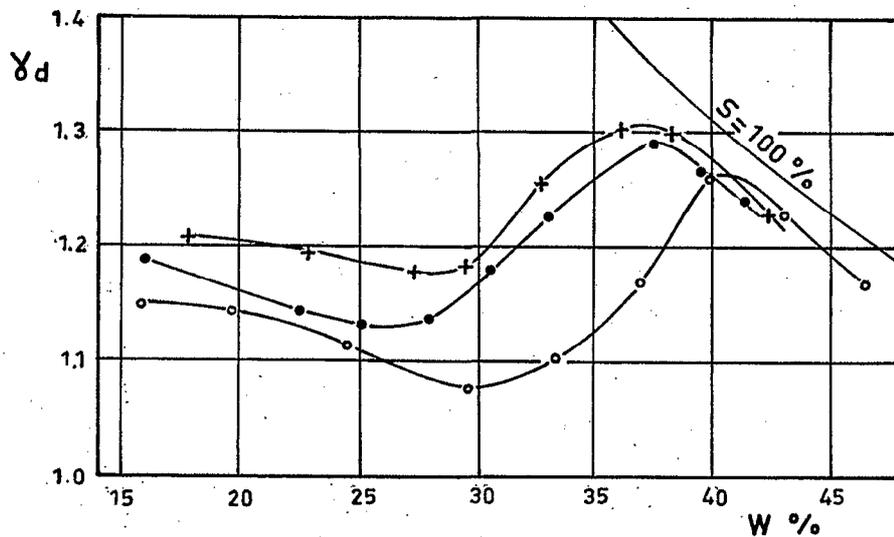


fig. 5b - Latosols (matériaux halloysite)



I.3.7 - Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement est mesurée normalement sur échantillons intacts selon des processus expérimentaux codifiés. Ce processus n'est pas toujours explicité dans la littérature que nous avons pu consulter. Plutôt donc que de donner des valeurs qui n'auraient pas beaucoup de significations, il a été jugé préférable ici de rester dans le domaine du qualitatif. On peut pour cela examiner la stabilité des pentes de talus naturels ou anthropiques taillés dans les sols étudiés.

Premier point, les sols in situ ont souvent une cimentation naturelle qui les rend résistants à l'érosion et leur permet de présenter des talus stables sur de grande hauteur : WARKENTIN mentionne des talus de 30 m subverticaux taillés dans des andosols japonais, DIXON et al. (1970) des talus verticaux de 10 m taillés dans des sols à halloysite du Kenya (Ruira Dam), L.D. WESLEY (1973) note des valeurs de la cohésion non consolidée non drainée voisines de un bar pour les andosols de Java.

Deuxième point, contradictoire avec le premier : sur certains sites de fréquents glissements sont cependant constatés. La contradiction est peut être levée par l'explication donnée par TASKEY et al. (1979) qui note, pour des sols de l'Orégon, que "des matériaux à smectites dominant se situent sous le niveau de la nappe perchée et des matériaux à allophane et halloysite se situent au dessus".

On peut donc supposer que les andosols et les sols à halloysite présentent une bonne résistance au cisaillement. Mais la présence d'une nappe perchée suffit à créer une zone à smectite, "couche savon" le long de laquelle se produira le glissement.

Un type de sol spécial trouvé au Japon est le sol développé sur ponce spécialement dans la région de Kyashu (sol Shirasu). WARKENTIN les décrit comme posant de grave problème de stabilité bien que leurs caractéristiques C' et ϕ' soient excellentes (valeur moyenne $C' \approx 0,3$ bar - $\phi \approx 35^\circ$).

En fait, il semble d'après la description des phénomènes d'instabilité décrit par WARKENTIN (liquéfaction au cours de séismes) que ce ne soient pas les sols altérés et argileux qui sont le siège des instabilités mais bien les sols sableux saturés non altérés situés en dessous, ou bien des lentilles de sables saturés intercalées dans la masse des matériaux argilisés.

.../...

ROSELLO et CHEVIN (1983) donnent le tableau suivant pour les sols bruns de la Réunion. On constate qu'ils mesurent une cohésion nulle ce qui est contradictoire avec la bonne tenue in situ de déblai subverticaux. Ici il semble que ce résultat soit dû au drainage en cours d'essai (W passe de 120 % à 60 % au cours du cisaillement) et ne soit donc pas représentatif des caractéristiques in situ du matériau.

Tableau 3

Caractéristique mesurée	ANDOSOLS (Réunion)
<u>Poids volumique</u>	(kN/m ³)
humide	10 < γ < 16
sec	3 < γ_d < 9
du solide	25 < γ_s < 29
<u>Teneur en eau</u>	100 < W < 250
<u>Limites d'Atterberg</u>	100 < WLo < 300
sur échantillons	80 < Wpo < 240
"frais" (0)	20 < Ipo < 100
après dessiccation	40 < WLS < 110
et réhumidification	Wps : non mesurable IPS : non mesurable
<u>Tassomètre à l'oedomètre</u>	Un seul essai e ₀ ≈ 5 e final ≈ 3,5 (sous 10 bars) Cc = 1,75 Cg = 0,17
<u>Cisaillement</u>	C ≈ 0
<u>rectiligne rapide</u>	30 < ϕ < 35
<u>Matières organiques</u>	2 % < mo < 20 %

I.3.8 - Compressibilité

Une revue des travaux est faite par MAEDA et al. (1977). Les andosols ont des pressions de préconsolidation (1 - 5 kq / cm²) et des coefficients de compressibilité élevés.

La comparaison de matériaux à allophane et halloysite est faite par WESLEY pour les sols de Java :

	<u>Andosol</u> (allophane)	<u>Latosol</u> (halloysite)
Pression de préconsolidation (bar)	5	3,5
Coefficient de compressibilité	3,5	0,75

On note que les matériaux à allophane sont extrêmement compressibles et que ceux à halloysite un peu moins. L'originalité de ces sols réside dans la valeur très élevée de la préconsolidation, bien supérieure au poids de terre au-dessus de l'échantillon. Ceci s'explique sans doute par la structure des sols qui présentent des liaisons fortes entre les particules (WALLACE, 1973). GRADWELL et BIRELL (1954) signalent des coefficients de compressibilité élevés (1,5 à 1,7).

Le séchage conduit à une diminution des pressions de préconsolidation et des coefficients de compressibilité (LARSON et al., 1979) (W).

I.3.9 - Stabilisation des sols

Une revue bibliographique est faite par MAEDA et al. (1977).

La consolidation des sols à allophanes (en particulier ceux qui sont riches en matière organique) est parfois nécessaire pour les routes et les pistes. YAMANOUCHI (1963) (M) indique que la prise du ciment PORTLAND est inhibée, le calcium étant fixé par la matière organique. Par contre, l'addition de CaCl₂, de ciment à "prise rapide" ou de CaO est efficace. Le mélange émulsion d'asphalte - ciment PORTLAND est meilleur que l'émulsion asphalte seule. NORTHEY et SCHAFER (1974) (M) augmentent la résistance des sols à allophane frais avec addition de 5 % de chaux.

ARIZUMI (1962) (M) met en évidence la formation de gehlenite hydratée (2 CaO, Al₂O₃, SiO₂, nH₂O) par mélange d'allophane et Ca(OH)₂ ou CaSO₄.

.../...

CHAPITRE II - LES PRINCIPAUX TYPES DE SOL ET MATERIAUX MEUBLES

DES ANTILLES FRANCAISES

II.1 - LES PRINCIPAUX TYPES DE SOL (figure 6)

La présentation qui est faite ici est le résumé de nos propres observations, mais surtout des travaux de COLMET-DAAGE, LAGACHE et GAUTHEYROU : légendes et notices des cartes pédologiques de la Martinique et de la Guadeloupe au 1/20.000 et au 1/150.000 (COLMET-DAAGE, 1960 et 1977), publications diverses (COLMET-DAAGE et LAGACHE, 1965 ; COLMET-DAAGE et al., 1972 et 1973).

Les mêmes types de sols se rencontrent en Martinique et Guadeloupe et leur répartition dans le paysage suit la même logique. La légende des cartes pédologiques est strictement identique. Nous avons choisi pour ce travail de porter notre effort essentiellement sur l'étude de la Martinique* étant bien entendu que les résultats sont applicables à la Guadeloupe mais aussi à d'autres îles des Caraïbes (Dominique, Ste Lucie, Trinidad, etc..) ou même d'autres pays latino-américains (Equateur par exemple).

Les principaux types de sols de la Martinique sont tous développés sur matériaux volcaniques. Ils se répartissent selon :

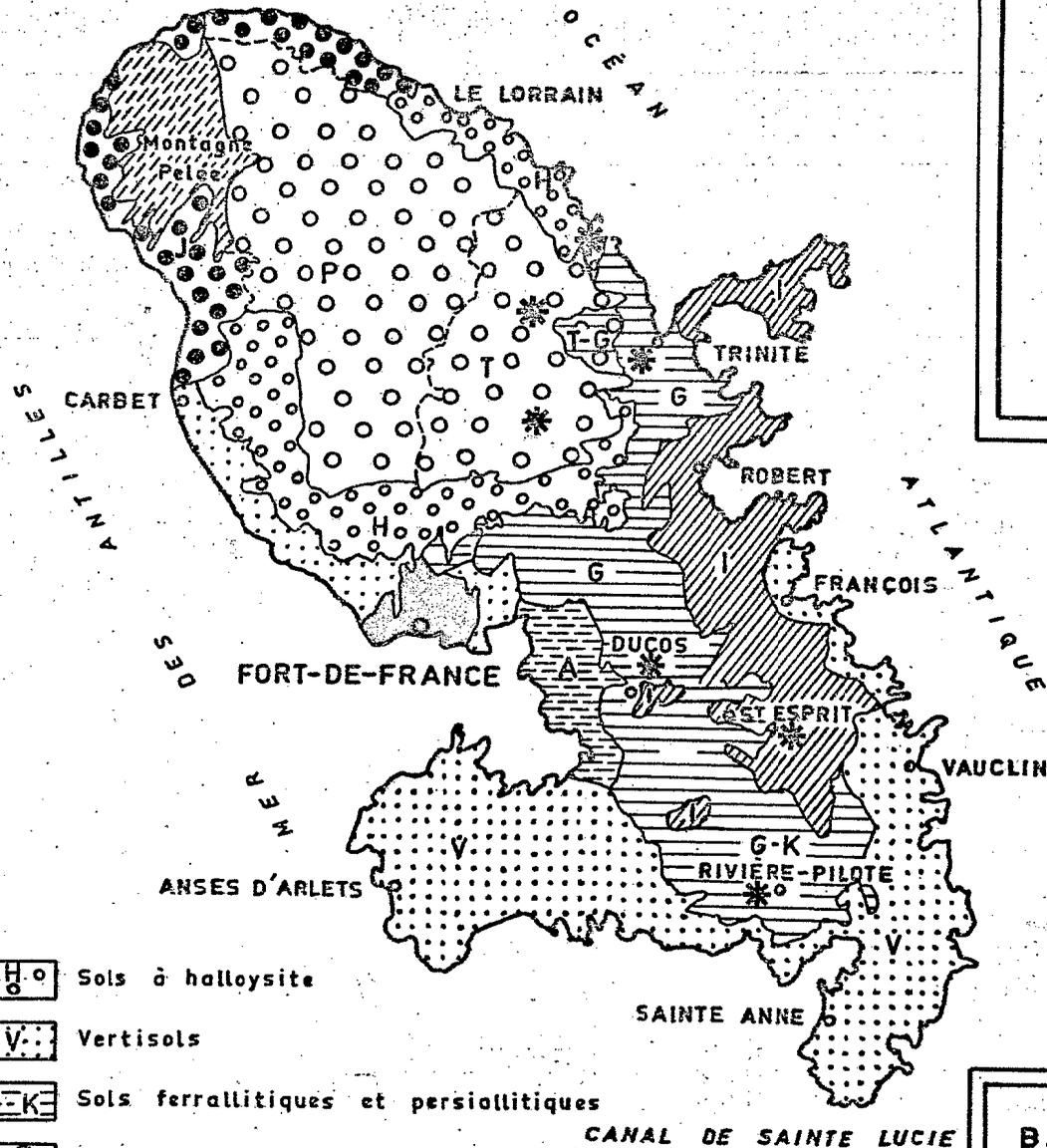
- l'âge des matériaux : volcanisme récent (Nord-Martinique) ou ancien (Sud - Martinique) ;
- la nature du matériau : roches tendres (cendres et ponces, tufs fins) ou dures (laves dacitiques) ;
- la pluviométrie, celle-ci étant fonction de l'altitude et de la situation par rapport aux vents dominants : côte "au vent" pluvieuse, côte "sous le vent" sèche.

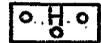
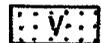
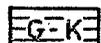
* Quelques échantillons proviennent de la Guadeloupe (B570 F, B570 C, BR, MAT) et de la Dominique (GF 2, GF 3).

CARTE GÉNÉRALE DES SOLS DE LA MARTINIQUE

(Source: Carte pédologique à 1/100 000 Atlas Martinique)

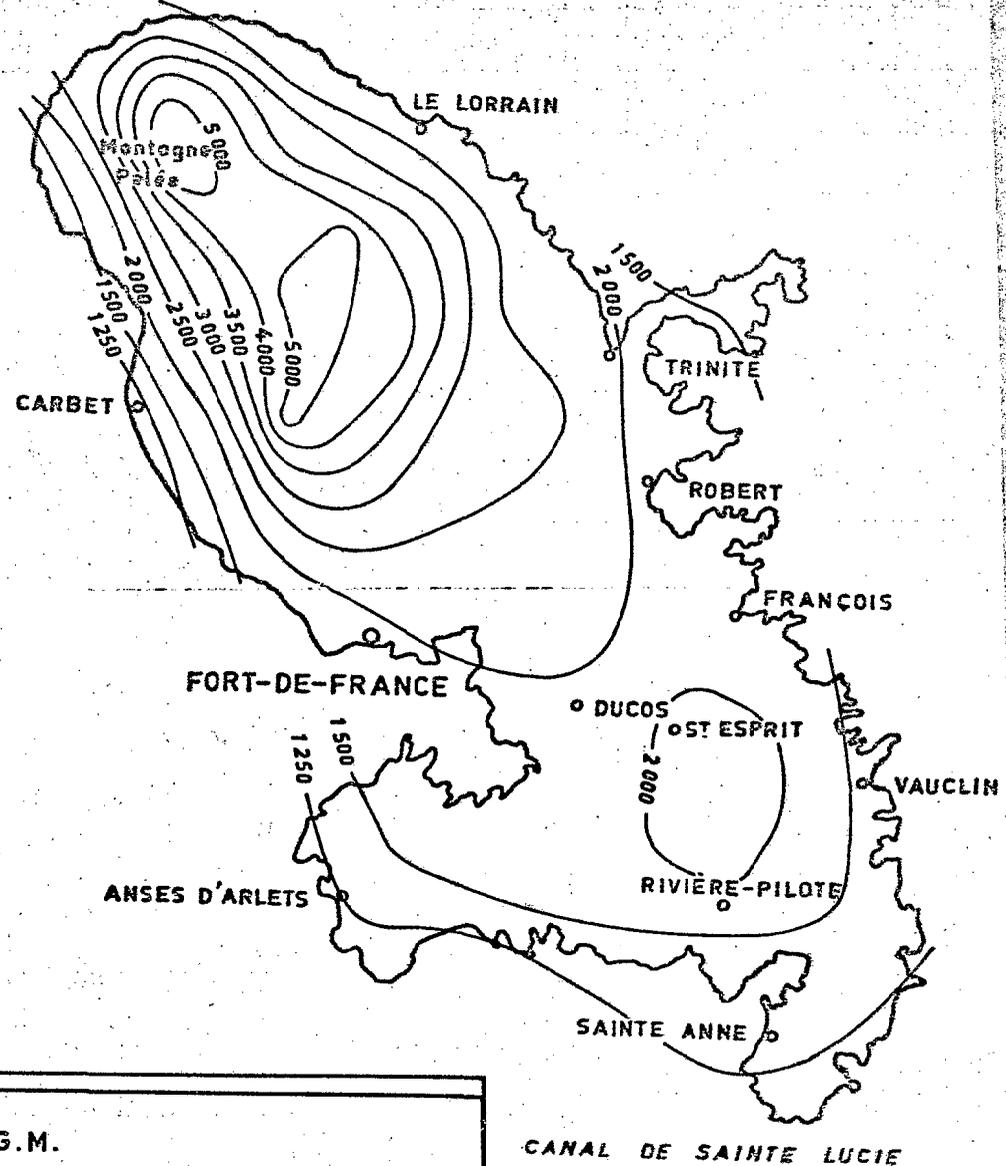
CANAL DE LA DOMINIQUE



-  Sols à halloysite
-  Vertisols
-  Sols ferrallitiques et persiollitiques
-  Sols à allophane
-  Sols rouges montmorillonitiques
-  Alluvions continentales et marines
-  Situation des prélèvements

CARTE DES ISOHYÈTES INTERANNUELLES (période 1921-1970)

CANAL DE LA DOMINIQUE



B.R.G.M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIEAUX VOLCANIQUES DES ANTIILLES FRANÇAISES

CARTE PÉDOLOGIQUE ET DES PLUIES DE LA MARTINIQUE

FIGURE 6

Les principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques de ces différents types de sols sont extrêmement liées à leur minéralogie elle-même dépendante des paramètres évoqués ci-dessus. Les minéraux argileux majeurs sont : l'allophane, l'hallowysite, la montmorillonite et la kaolinite COLMET-DAAGE distingue donc en première approximation :

- les sols à allophane : andosols et sols peu évolués sur ponces et cendres (unités P et T)
- les sols à hallowysite : sols bruns et brun-rouille (unité H)
- les sols à montmorillonite : vertisols et sols rouges à montmorillonite (unités V et I)
- les sols à mélange kaolinite, montmorillonite interstratifiés : sols ferrallitiques (unité G)
- les sols à kaolinite : sols ferrallitiques et ferrisols (unité K)
- les alluvions continentales et marines (pour mémoire) dont la minéralogie est fonction de l'origine des matériaux déposés (unité A).

En dehors des sols peu évolués sur cendres et ponces (texture sablo argileuse) tous ces sols sont argileux ou argilo-limoneux.

Compte-tenu de l'objectif de notre étude (propriétés physiques et mécaniques des matériaux) nous retiendrons pour ces divers types de sols les traits dominants suivants :

x
x x

II.2 - LES SOLS DERIVES DE FORMATIONS AERIENNES RECENTES

II.2.1 - Sols peu évolués sur ponces et cendres (unité P)

Ils sont localisés au massif de la Montagne Pelée. Ils sont développés sur des apports de ponces et cendres récentes (âge inférieur à 4.000 ans). L'horizon humifère (environ 50 cm) est en contact direct avec la ponce peu altérée. Il contient moins de 20 % d'éléments fins (0 - 50 µm) mais sont riches en allophane d'où des teneurs déjà élevées en matière organique et une capacité de rétention de l'eau importante (environ 50 %) pour des sols à texture grossière. La densité apparente de l'horizon humifère est d'environ 0,9 et celui des ponces 0,6.

.../...

Dans les zones situées en dehors de l'influence de ces projections pliniennes récentes et sous une pluviométrie supérieure à 2500 mm, on passe à des sols à allophane plus évolués, les andosols.

II.2.2 - Les andosols (unité T)

Dans les zones à pluviométrie annuelle supérieure à 2500 mm, les ponces ou les tufs sont fortement altérés en allophane ce qui confère au matériau des propriétés de "gel minéral" : très fort pouvoir de rétention de l'eau (100 à 300 % en teneur naturelle) ; densité apparente faible, stabilité structurale très bonne, capacité d'échange variable. La dessiccation entraîne des modifications irréversibles des propriétés physiques et mécaniques : forte contraction du matériau, thixotropie, diminution de la rétention en eau à la réhumectation, début de cristallisation du minéral argileux.

La puissance de ce matériau est très variable, de 2 à 5 m. Il repose brutalement sur des horizons B ou C (riches en halloysite ou montmorillonite) issus de l'altération de tufs anciens.

Reconnaissance sur le terrain : couleur jaune, légèreté, frais, thixotropie, test NaF très positif.

En bordure de ces zones, pour des pluviométries de l'ordre de 1.500 - 2.500 mm on passe aux sols brun-rouille à halloysite.

II.2.3 - Les sols brun-rouille à halloysite (unité H)

La cristallisation des allophanes sous l'influence d'alternance de périodes sèches et humides conduit à la formation d'halloysite et/ou métahalloysite. Le profil du sol est de type A (B) C de couleur brun-jaune à brun-rouille foncé à structure polyédrique fine. Un horizon B rouge peut parfois se différencier. La stabilité structurale est bonne, la densité apparente d'environ 0,9. La rétention en eau est identique à celle des ferrisols (40 à 50 % en moyenne) et fonction de la texture. Ces sols contenant de l'halloysite à 4 molécules d'eau, la dessiccation entraîne des modifications irréversibles de propriétés physiques et mécaniques du matériau.

Le test NaF est faible à nul.

L'épaisseur de ces matériaux varie d'environ 1 à 3 mètres. Ces sols reposent en discontinuité sur d'anciens horizons d'altérations (bariolés) riches en montmorillonite aux propriétés gonflantes. Des phénomènes de glissement à la suite de travaux de Génie Civil sont souvent observés dans ces zones.

.../...

x
x x

II.3 - LES SOLS DERIVES DES FORMATIONS ANCIENNES

II.3.1 - Les vertisols et sols rouges à montmorillonite (unités V et I).

Les vertisols occupent les régions les plus sèches de la Martinique et les sols rouges montmorillonitiques se développent sous des pluviométries d'environ 1.800 mm.

Le problème de ces sols est celui de leurs mauvaises propriétés physiques. Ce sont des matériaux à argiles gonflantes. Leur stabilité structurale est variable (I_s de 0,5 à 2,0), la densité apparente d'environ 1,1. Des larges fentes de retrait (1 à 4 cm) peuvent être observées en saison sèche. Ces matériaux n'ont pas donné lieu à des études particulières dans le cadre de ce travail.

II.3.2 - Les sols ferrallitiques et fersiallitiques (unités G et K)

Ce sont des sols au profil de type A B C développés souvent sur d'anciennes altérations de tufs. La kaolinite y est la plupart du temps dominante mais des quantités notables de montmorillonites sont parfois présentes. Leurs horizons B et C ont des teintes rouges et/ou bariolées. Ils occupent le Centre-Sud de la Martinique mais constituent aussi les horizons de profondeur d'autres unités pédologiques (exemple de l'unité H). La puissance de l'ensemble des horizons A, B, C peut être importante (2 à 10 m). Ils sont en général très argileux et présentent des teneurs en eau d'environ 50 %.

Leurs caractéristiques physiques ne sont guère modifiées par les phénomènes de dessiccation.

CHAPITRE III

ETUDE DES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX MEUBLES

D'ORIGINE VOLCANIQUE DES ANTILLES FRANCAISES

III.1 - ECHANTILLONNAGE ET ESSAIS DE LABORATOIRE

Les études de laboratoire dont les résultats bruts sont présentés dans les annexes 1, 2, 3, ont été réalisées par l'ORSTOM et le BRGM sur des échantillons de diverses provenances :

- les échantillons notés A et G F ont été prélevés au cours d'une campagne d'échantillonnage spécifique
- les autres échantillons ont été prélevés à l'occasion de travaux et études diverses (pédologie ou de génie civil).

Les résultats de laboratoire donnés pour ces échantillons, proviennent soit d'essais spécifiquement réalisés pour cette étude, soit des archives du B.R.G.M. et de l'ORSTOM.

Les annexes à consulter sont les suivantes :

- annexe n° 1 : caractéristiques géotechniques d'un sable ponceux non altéré et d'un sable ponceux peu altéré
- annexe n° 2 : tableau et courbes récapitulant les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques de matériaux regroupés dans les annexes :
- 2.1 : matériaux allophanique
 - 2.2 : matériaux à halloysite
 - 2.3 : matériau à montmorillonite
 - 2.4 : et à kaolinite
- annexe n° 3 : caractéristiques proctor et CBR d'altérite à montmorillonite, et/ou kaolinite.

Les paragraphes suivants donnent les propriétés géotechniques des matériaux regroupés selon un classement d'origine minéralogique justifié par les études pédologiques régionales et celles spécifiques à cette étude et dont les résultats sont reportés annexes 1,2,3.

III.2 - SABLES PONCEUX PEU OU PAS ALTERES - annexe 1.

Il a paru intéressant de donner les résultats obtenus sur des échantillons peu ou pas altérés de cendres ponceuses. On a ainsi les propriétés de la roche mère la plus courante des sols à allophane.

- Ponce non altérée cendreuse

Sable graveleux, blanc-crème

- . W compris entre 10 et 20 %
- . Equivalent sable de 40 à 60 %
- . Passant à 80 μ m 10 à 20 %
- . cisaillement lent consolidé : $\phi = 40^\circ$ C = 0
- . Proctor (voir courbe) $W_{opm} = 18$ à 20 % $\gamma_{opm} = 1,6$ t/m³

- Ponce peu altérée

Limon plastique jaunâtre

- . teneur en eau environ 20 %
- . limite d'Atterberg W_L environ 60
 I_p environ 10 à 20
- . passant à 80 μ m supérieur à 50 %
- . Proctor $W_{opm} = 27$ % $\gamma_{opm} = 1,36$ t/m³
- . cisaillement lent consolidé : $\phi = 35^\circ$ C = 0,4 bar.

Les ponces non altérées sont d'excellents matériaux routiers utilisés en couche de forme. Peu altérées, elles sont également utilisables en remblais de grande hauteur. In situ, elles peuvent présenter une cohésion importante due à certains modes de dépôts (lahars chauds).

En tant que matériaux de construction (béton) les ponces non altérées sont très utilisées, mais chaque carrière doit faire l'objet d'une étude spécifique; en effet la porosité des ponces peut entraîner des problèmes particuliers de composition des bétons.

x
x x

III.3 - MATERIAUX DES HORIZONS B ET C

III.3.1 - Tableau général des résultats sur échantillons frais

Le tableau n° 4 présente une synthèse des résultats acquis (essais de laboratoire, observations sur le terrain). Les valeurs numériques données doivent être considérées comme résultant de :

- (1) l'expérience acquise en Martinique et Guadeloupe
- (2) des essais spécifiquement réalisés sur des échantillons représentatifs. Les valeurs données se rapportent alors à celles données annexes n° 1, 2, 3.

III.3.2 - Etude de l'influence du séchage

III.3.2.1 - Limite de liquidité W_L et indice de plasticité IP

a - Séchage à l'étuve

La figure n° 7 donne sur le diagramme de Casagrande la variation de W_L et IP due au séchage à l'étuve (105°) des matériaux. On note :

- 1 - tous les échantillons testés présentent une diminution des limites d'Atterberg. W_L diminue plus que IP, la variation de limite de liquidité ΔW_L étant en moyenné trois fois plus forte que la variation de IP.

$$\Delta (W_L) \approx 3 \Delta (IP)$$

- 2 - Les matériaux à allophane présentent de fortes variations (A.229, A.230) et de très fortes variations (GF.1 et GF.3) de W_L .
 - Les matériaux à halloysite des variations fortes (A.231, A.232, A.207) et des variations faibles (A.200, A.235) de W_L .
 - Les échantillons A.234 (à kaolinite) et R.1 (ponce peu altérée) présentant de faibles variations de W_L .

b - Séchage à l'air (durée inférieure au mois)

Les variations de W_L , de W_p et IP au cours d'un séchage à l'air des échantillons A.229, A.231 (matériaux à Allophane) A.235 (halloysite) sont données figure n° 8.

On constate que la diminution de W_L est notable pour les échantillons à allophane et négligeable pour celui à halloysites.

.../...

Tableau n° 4

Matériaux	γ_d t/m ³	W %	WL %	IP	pF 3,0	Proctor		Caractéristiques mécaniques moyennes		Faciès
						W _{opm}	γ_{opm}	C en bar	ϕ en °	
Andosols (Allophanes)	0,3 à 0,8	70 à 225	75 à 300	10 à 100	67 à 192	76,2	0,84	$C' \approx 0$ $C_{uu} \approx 1,3$	$\phi \approx 36^\circ$ $\phi_{uu} \approx 25^\circ$	Aspect limoneux, raide à mou, très humide, glissant, jaune à ocre à léger. Caractéristiques dans les régions à pluie >2m/ an et sur ponce. Test N a F très positif
Sols à Halloysite (parfois allophanes en petite quantité)	environ 1,0 à 1,1	10 à 70	40 à 98	15 à 40	30 à 50	40,0	1,4	très variable selon le degré de saturation C_{uu} de 0,5 à 1,2 ϕ_{uu} de 0,0 à 35		Argile très plastique, consis- tance moyenne, humide, brun- jaune à brun-rouille, puissance 1 à 3 m Test N a F faible à nul
Autres altérites (Kaolinite, mont- morillonite, par- fois halloysite en petite quanti- té).	environ 1,0 à 1,2	30 à 50	68 à 119	20 à 40	40 à 60	29 à 33	1,3	essai uu $\left\{ \begin{array}{l} C \approx 0,5 \\ \phi \approx 30 \end{array} \right.$ essai cd $\left\{ \begin{array}{l} C = 0,1 \\ \phi = 28 \end{array} \right.$		Argile plastique, raide, humi- de, rouge à rouge brun à bario- lée en profondeur (transition avec l'horizon C), puissance : plusieurs mètres. En Martinique : sur roche mère lavique. Parfois recouvert (1 à 10 m) par des cendres pé- léennes plus ou moins altérées ou des sols à halloysite domi- nant Test N a F faible à nul

B. R. G. M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES DES ANTILLES FRANÇAISES

VARIATION AU SÉCHAGE DES LIMITES D'ATTERBERG DE SOLS VOLCANIQUES DES ANTILLES

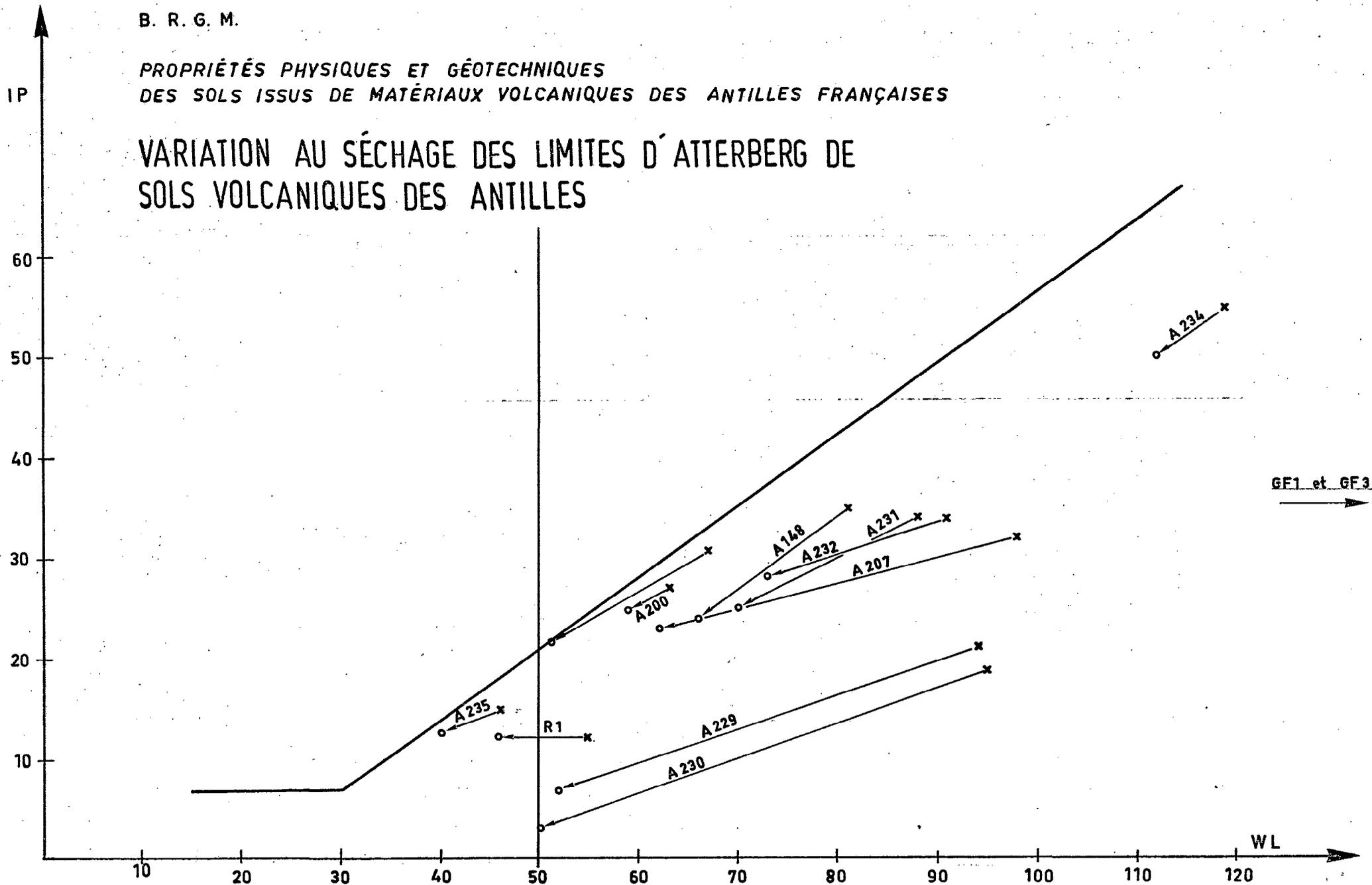


FIGURE 7

VARIATIONS DES LIMITES D'ATTERBERG AVEC SÉCHAGE A L'AIR

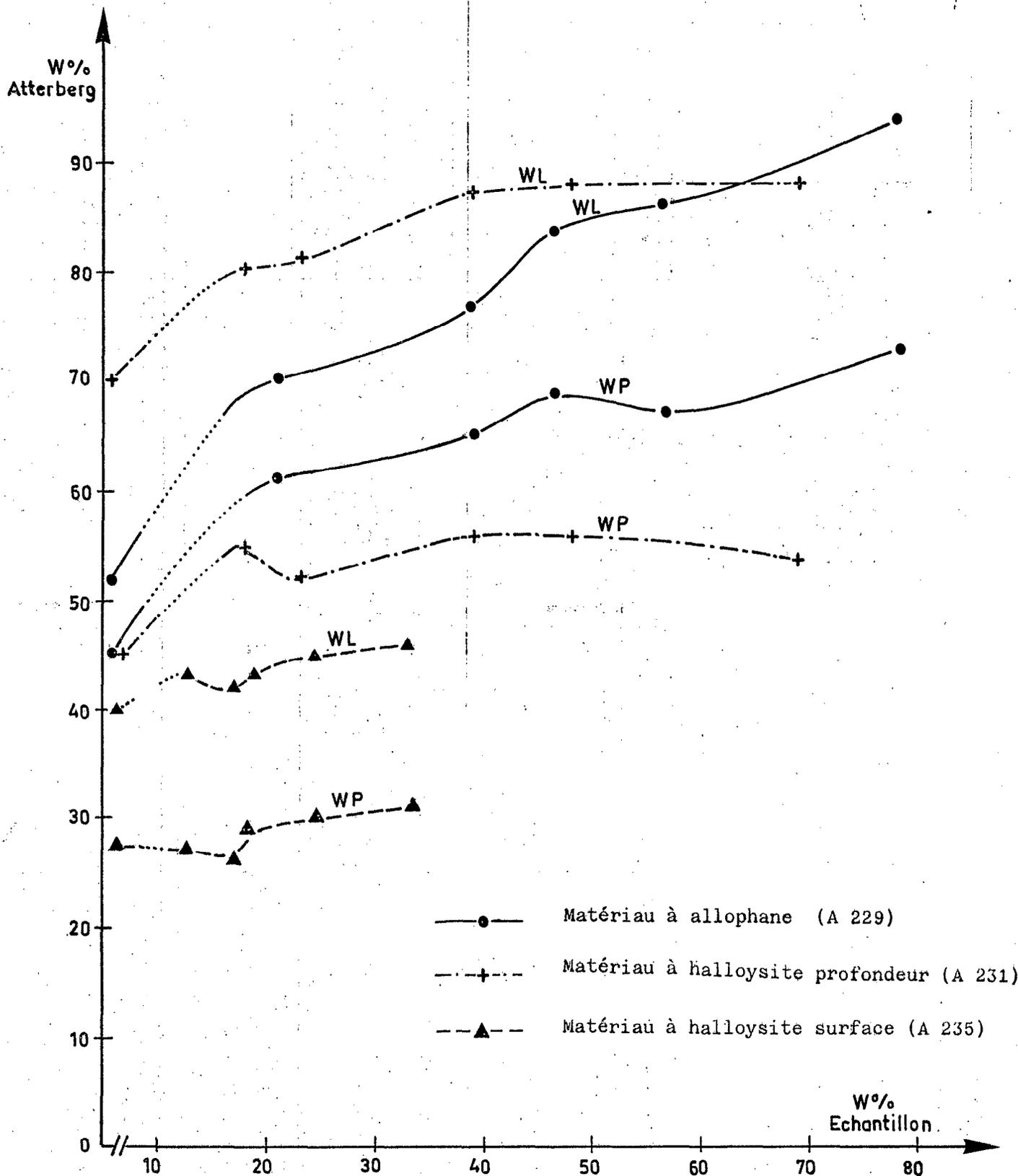


FIGURE 8

c - Séchage prolongé (plusieurs mois) à l'air.

On trouvera ci-dessous des résultats relatifs aux sols à allophane.

Le séchage à l'air prolongé (durée supérieure à 4 mois) conduit à une diminution des valeurs de pF qui deviennent du même ordre que celles des sols argileux à minéraux cristallisés (annexe 2.1, échantillons Y 2296, 2304, 2316, 2354, 2639). On notera toutefois que rapportés à une même teneur en éléments fins les valeurs de pF restent plus élevées pour la série allophanique.

La structuration que prend le sol au séchage lui confère les propriétés d'un matériau sableux et il n'est parfois plus possible d'en mesurer les limites d'Atterberg (éch. Y 2396, 2316, 1354). Dans les autres cas les valeurs de W_L sont identiques à celles des matériaux argileux mais WP est plus élevé ce qui conduit à une faible valeur de IP.

Sur quelques échantillons (B 570F, B 570C, BR, MAT) les contractions volumique et linéaire ont été mesurées à pF 4,2 après séchage à l'air et à l'étuve pour les matériaux frais et secs (à l'air) (GAUTHEYROU, 1981). Les résultats sont portés dans le tableau n° 5.

Tableau 5 - Contractions volumiques et linéaires à pF 4,2 avec ou sans séchage. Résultats en % du volume ou du diamètre de l'anneau initial (expérimentation dans anneaux à pF).

Echantillon	Contraction volumique			Contraction linéaire			Wn %	γ_d	
	pF 4,2 échantillon	séché air	séché étuve	pF 4,2 échantillon	séché air	séché étuve			
MAT	frais	10,8	19,8	31,0	1,9	6,4	10,9	72	0,83
	sec	2,7	6,0	6,2	0	0	0		0,79
B 570 F	frais	6,2	6,2	26,4	1,9	1,9	5,7	109	0,54
	sec	6,0	6,1	10,0	0	1,0	2,9		0,54
B 570 C	frais	13,1	58,4	62,3	5,7	23,8	32,1	173	0,36
	sec	6,0	8,5	22,0	0	1,9	5,7		0,73
BR	frais	17,5	64,8	68,8	5,7	29,4	32,1	184	0,45
	sec	2,7	2,7	6,0	0	0	0		0,84

On observe, pour les échantillons frais, que les contractions volumiques et linéaires après séchage à l'air sont les plus importantes pour ceux à Wn élevées et γ_d faibles (BR et B 570 C) ce qui correspond à un caractère allophanique élevé.

Les variations sont faibles pour les échantillons préalablement séchés à l'air pendant plusieurs mois.

III.3.2.2 - Teneur en eau aux pF.2,5, pF.3,0, pF.4,2

Après séchage au four, on constate (voir annexe n° 2) que la variation des pF suit celle des limites de liquidité. En général, la teneur en eau à pF.3,0 est celle qui varie le plus. La figure n° 9 donne sur un diagramme ($W_L, W(pF.3,0)$) la position des couples ($W_L, W(pF.3,0)$) avant et après séchage. On retrouve des résultats analogues à ceux donnés figure n° 7, ce qui est normal compte tenu des corrélations existantes entre pF et W_L . On note également que la variation de pF.3,0 est en général à peu près égale à la variation de W_L .

$$\Delta [W(pF.3,0)] \approx \Delta [W_L] \quad (\text{au séchage au four})$$

III.3.2.3 - Essai Proctor (figure n° 10)

- Matériaux à allophane (A.229)

- Si l'essai Proctor est fait selon la méthode habituelle après séchage du matériau à l'étuve, on obtient une courbe Proctor classique présentant un maximum de densité sèche.

$$\text{soit pour A.229} \quad \gamma_{opm} = 1,13 \text{ tg/m}^3 \quad W_{opm} = 38 \%$$

Il faut noter que le matériau ainsi testé est différent du matériau in situ puisque le séchage à l'étuve a modifié ses limites d'Atterberg.

- Si l'essai Proctor est fait en laissant les échantillons séchés à l'air, on obtient

$$\text{A.229} \quad \gamma_{opm} = 0,96 \text{ t/m}^3 \quad W_{opm} = 56 \%$$

La sensibilité au séchage est importante. Elle est sans doute due aux phénomènes irréversibles se produisant au séchage. Ceci montre sans ambiguïté que l'essai Proctor n'est pas adapté à l'étude de la compactibilité des matériaux à allophanes. L'essai Proctor avec séchage à l'air n'est, lui aussi, pas satisfaisant compte-tenu des variations de W_L au cours du séchage à l'air (cf. paragraphes précédents).

- Matériaux à halloysite (A.235)

- Essai Proctor après séchage à l'étuve

$$\gamma_{opm} = 1,6 \text{ t/m}^3 \quad W_{opm} = 22 \%$$

.../...

• Essai Proctor avec séchage progressif à l'air

L'essai a été réalisé en faisant sécher progressivement le matériau. On constate alors pour l'échantillon étudié que γ_d ne présente pas de maximum, ce qui signifie que si il y a un maximum de γ_d quand W varie, ce maximum correspond à une teneur en eau supérieure à la teneur en eau in situ.

Commentaire : la grande différence des résultats entre l'essai après séchage à l'étuve et l'essai avec séchage progressif à l'air est remarquable. Cette différence, est probablement due à des modifications irréversibles dues au séchage, modifications qui ne sont pas ici accompagnées d'une variation importante de W_L .

On peut également noter l'existence d'un minimum de γ_d pour l'échantillon séché à l'air.

- Caractéristiques mécaniques après compactage

Des essais de cisaillement consolidés lents ont été exécutés

- (1) sur le matériau compacté à l'optimum proctor après séchage
- (2) sur le même matériau compacté selon le mode opératoire Proctor à la teneur en eau naturelle.

Les résultats sont donnés ci-dessous :

	compacté après séchage	compacté sans séchage préalable
matériau à Allophane (A 231)	$C' = 0,1 \text{ bar}$ $\phi' = 40^\circ$	$C' = 0,24 \text{ bar}$ $\phi' = 25,5^\circ$
matériau à Halloysite	$C' = 0,1 \text{ bar}$ $\phi' = 30^\circ$	$C' = 0,1 \text{ bar}$ $\phi' = 30^\circ$

x
x x

B. R. G. M.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES
DES SOLS ISSUS DE MATÉRIAUX VOLCANIQUES DES ANTILLES FRANÇAISES

VARIATION AU SÉCHAGE DE LA TENEUR EN EAU
A pF 3,0 ET DE WL

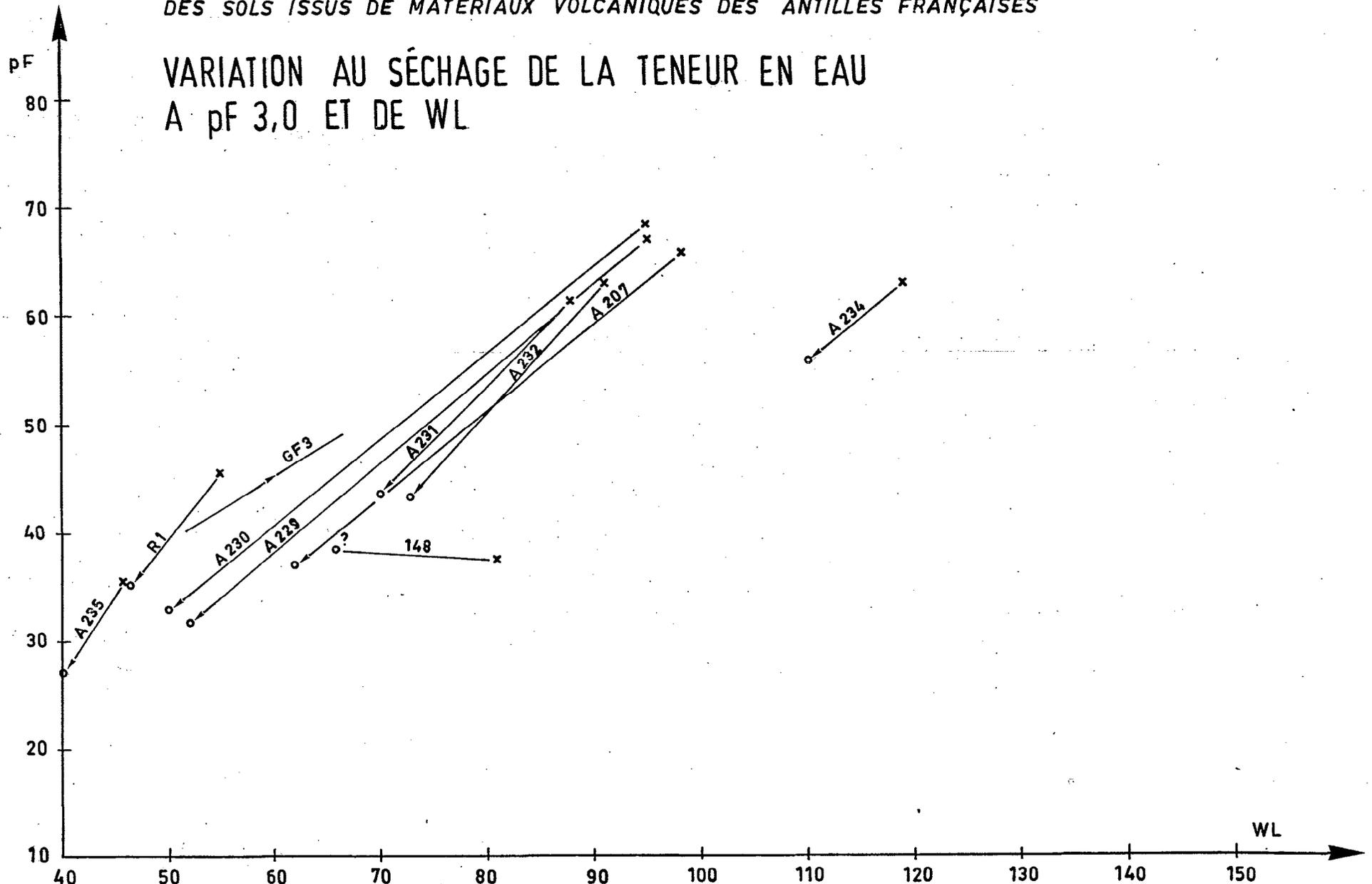
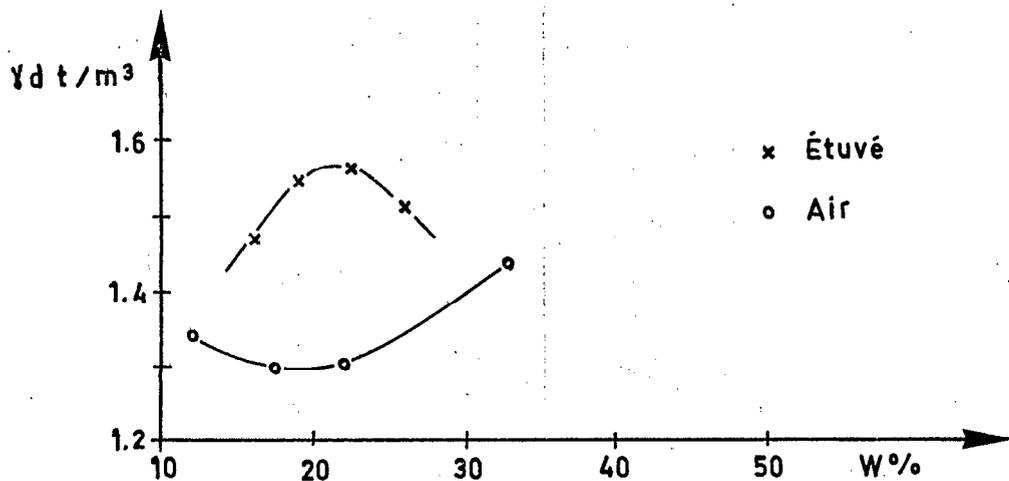
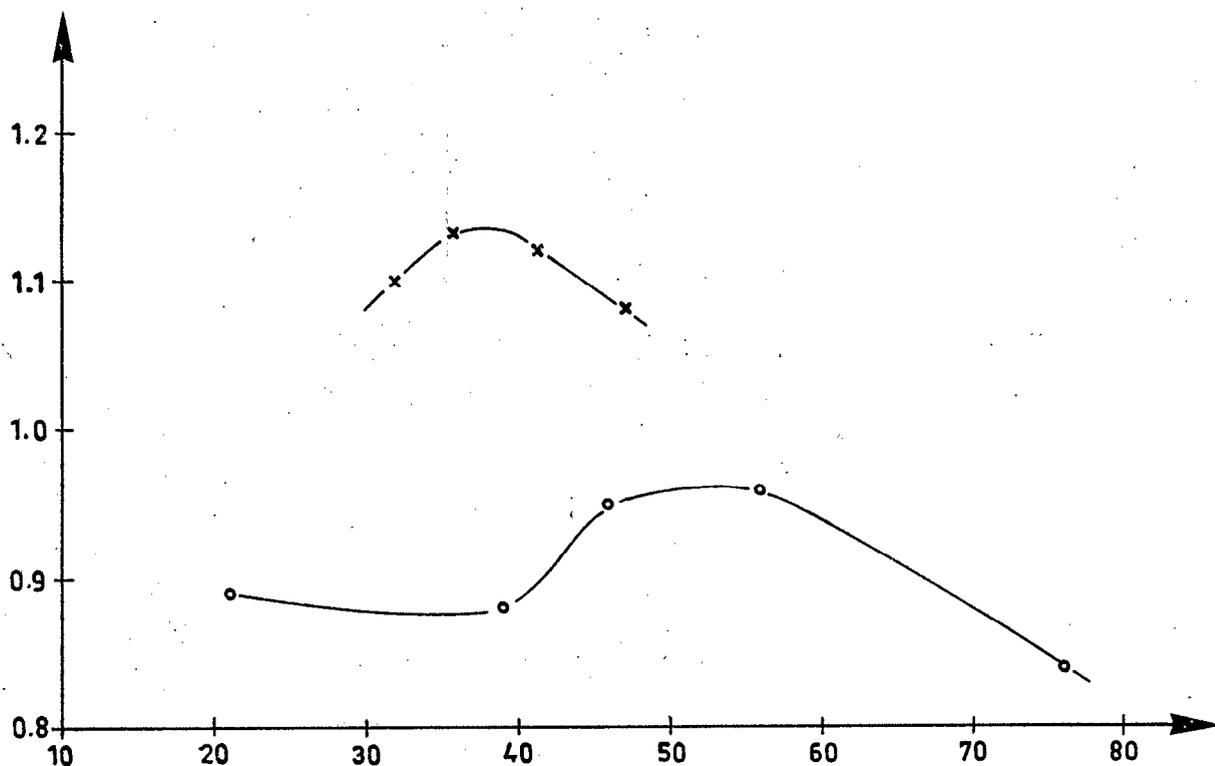


FIGURE 9

COURBES PROCTOR D'ÉCHANTILLONS TYPIQUES DE SOL A ALLOPHANE ET DE SOL A HALLOYSITE



10.a - Matériau à allophane (A 235)



10.b - Matériau à halloysite (A 229)

III.4 - CONCLUSIONS.

L'étude expérimentale menée aux Antilles a été conduite en regroupant les matériaux en fonction de leur minéralogie, elle-même rapportée à la pédogénèse. On a cherché et établi ici des critères relativement simples permettant de classer les matériaux et donc de prévoir dans une certaine mesure leurs propriétés au moyen des essais d'identification et d'observations sur le terrain.

Plusieurs tableaux de résultats donnant des fourchettes de valeur sont ainsi présentés. Un résultat important est que la susceptibilité au séchage des caractéristiques géotechniques semble être un paramètre jamais négligeable a priori. En particulier l'essai Proctor sur matériau séché à l'étuve (comme il se fait d'habitude) n'est pas adapté à l'étude de la compactibilité de ce type de sol.

=====

REFERENCES

- ADACHI (T.), TSUTSUMI (S.) and TAKENARA (H) - 1977. - Studies on the strength characteristics of organo-volcanic ash soils. Trans. JSIDRE 71, 39-43.
- AHMAD (N.) and PRASHAD (S.) - 1970 - Dispersion, mechanical composition and fractionation of West Indian volcanic and low earth soils (andcepts) J. Soil Sci. 21, 63-71.
- ARIZUMI (A.) et SCHAFER (G.J.) - 1974 - N.Z.J. Sci. 17, 131-150.
- ATLAN (Y) et BESSON (J.C.) - 1983 - Evolution des reliefs en liaison avec la sécurité et l'aménagement du territoire en Martinique. Rapport BRGM n° 83.ANT.16
- ATLAN (Y) et FELLER (C.) - 1983 - Applications de la pédologie à la géotechnique routière. Exemple du Sénégal. Doc. BRGM n° 82 56 - BRGM, Orléans, 87 p.
- ATLAN (Y) - 1982 - Etude géotechnique de la RN.1 - section Trinité - Ste Marie (Martinique) - Rapport BRGM n° 83.ANT.053.
- ATLAN (Y) et BIENDEL (J.M.) - 1982 - Etude du glissement du Morne des Esses (Martinique) - Rapport BRGM n° 82 MQE 038.
- BESOAIN (E.M.) - 1969 - Clay mineralogy of volcanic ash soil. Proc. Panel on volcanic ash soils in Latin America. Turrialba, Costa-Rica, Pap. Pap. B1.
- BONFILS (P.) et MOINEREAU (J.) - 1971 - Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques du Sud du Massif Central. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 9 (3), 345-363.
- BRYDON (J.E.) and DAY (J.H.) - 1969 - Use of the FIELDS and PERROT sodium fluoride test to distinguish the B horizons of podzols in the fields. Can. J. Soil Sci. 50, 35-41.
- CAILLERE (S.) et HENIN (S.) - 1963) - Minéralogie des argiles. Masson Ed., Paris, 355 p.
- COLMET-DAAGE (F.) - 1969 - Légende et carte des sols des Antilles au 1/20.000.

- COLMET-DAAGE (F.) - 1977 - Pédologie, Atlas des D.O.M., la Martinique planche 10. CNRS - IGN Ed.
- COLMET-DAAGE (F.) et LAGACHE (P.) - 1965 - Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 3 (2), 91-122.
- COLMET-DAAGE (F.) et coll. - 1967 - Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 1ère partie : Essai de caractérisation des sols des régions tropicales. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 5 (1), 3-38.
- COLMET-DAAGE (F.), GAUTHEYROU (M.), KIMPE (G. de) et FUSIL (G.) - 1972 - Dispersion et étude des fractions fines de sols à allophane des Antilles et d'Amérique Latine ; 1ère partie : Dispersion. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 10 (2), 169-192.
- C.P.C.S. - 1967 - Travaux CPCS 1960-1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et Cartographie des sols. Rapp. mult., Paris, 96 p.
- DIXON (H.H) and ROBERTSON (R.H.S.) - 1971 - Some engineering experiences in tropical soils. Quat. J. Eng. Geol. 3, 137-150.
- DUCHAUFOUR (Ph.) - 1977 - Pédologie 1 - Pédogénèse et Classification pp. 209-224 Masson Ed., Paris, 477 p.
- EGAWA (T.) - 1977 - Properties of soils derived from volcanic ash. In "Soils derived from volcanic ash in Japan" Y. ISHIZUKA et C.A. BLACK Ed., (CIMMYT), Mexico, Chap. 2, pp. 10-63.
- EGAWA (T.), SATO (A.) and NISHIMURA (T.) - 1960 - Release of OH ions from clays minerals treated with various anions, with special reference to the structure and chemistry of allophane. Adv. Clay Sci. 2, 252-262.
- FLACH (K.W.) - 1969 - The use of the 7th approximation for the classification of soils from volcanic ash. Panel on volcanic Ash Soils in Latin América, Turrialba, Costa-Rica, Pap. A7, 1-18.
- FIELDS (M.) and PERROT (K.W.) - 1966 - The nature of allophane in soils. 3 - Rapid field and laboratory test for allophane. N.Z.J. Sci. 9 623-629

.../...

- FORSYTHE (W.M.), GAVANDE (S.A.) and GONZALEZ (M.A.) - 1969 - Physical properties of soils derived from volcanic ash with consideration of some soils of Latin America. Panel on Volcanic Ash Soils in Latin America, Turrialba, Costa-Rica, Pap. B3.
- GAUTHEYROU (J et M.) - 1981 - Contribution à l'étude de la capacité d'échange des sols à allophane. Notes de laboratoire. Rapp. mult. ORSTOM; Centre de Guadeloupe, 274 p. Annexes 123 p.
- GAUTHEYROU (J.), GAUTHEYROU (M.) et COLMET-DAAGE (F.) - 1976 - Chrono-bibliographie des sols à allophane (et suppléments). Rapp. mult. ORSTOM, Centre des Antilles, 158 + 332 p. (+ suppléments).
- GEIST (J.M.) and STRICKLER (G.S.) - 1978 - Physical and chemical properties of some Blue Mountain Soils in northeast Oregon. USDA Forest Service Research Paper, PNW - 236, 19 p.
- GRADWELL (M.W.) and BIRRELL (K.S.) - 1954 - Physical properties of certain volcanic clays. N.Z.J. Sci. Tech., B 36, 108-122.
- KUBOTA (T.) - 1972 - Aggregate formation of allophane soils. Effect of drying on the dispersion of the soils. Soil Sci. Plant Nutr. 18, 79-87.
- KUNO (G.) and MOGAMI (T.) - 1949 - Technol. Eng. Rep., Tokyo Univ. 3, 7-8.
- KUNO (G.) et YABE (M.) - 1962 - Tech. Rep. Civ. Eng. Jpn 6, 15-24.
- KUNO (G.) et YABE (M.) - 1960 - Tech. Rep. Civ. Eng. Jpn 4, 32-41.
- LARSON (W.E.), GUPTA (S.C.) and USECHE (R.A.) - 1979 - Compression of agricultural soils from eight soil orders. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 450-457.
- LEAMY (M.L.), SMITH (G.B.), COLMET-DAAGE (F.) and OTOWA (M.) - 1980 - The morphological characteristics of andisols. In "Soils with variable charge", B.K.G. THENG Ed., Chap. 2, pp. 17-33.
- LYONS ASS. - 1976 - Laterite and lateritic soils and other problem soils of the tropics. ALS/CSD 3286, Lyons Ass. Inc. Baltimore (USA) et Road Res. Int. Rio-de-Janeiro (Brésil), 369 p.
- McNABB (D.H.) - 1979 - Corrélation of soil plasticity with amorphous clay constituents. Soil Sci. Soc. Am. J. 43, 613-616.

.../...

- MAEDA (T.) and SOMA (K.) - 1974 - Soil phys. Cond. Plant Growth, 30, 15-22.
- MAEDA (T.) and WARKENTIN (B.P.) - 1975 - Void changes in allophane soils determining water retention and transmission. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39, 398-403.
- MAEDA (T.), SOMA (K.) and SASAKI (S.) - 1976 - Studies on the relationship between physical properties and organic matter content of soil. Trans. JSIDRE 61, 9-17.
- MAEDA (T.), TAKENAKA (H.) and WARKENTIN (B.P.) - 1977 - Physical properties of allophane soils. In "Advances in Agronomy", N.C. BRADY Ed., Vol. 29, pp. 229-263.
- MICHALSKI (E.R.) et TEYSSONNIERES (M.) - 1977 - Etude géotechnique des sols tropicaux. Rapp. mult. n° 77 SGN 099 GTC, BRGM, Orléans, 93 p.
- NORTHEY (R.D.) - 1966 - Correlation of engineering and pedological soil classification in New Zealand. N.Z.J. Sci. 9 (4), 809-832
- NORTHEY (R.D.) et SCHAFER (G.J.) - 1974 - N.Z.J. Sci. 17, 131-150.
- QUANTIN (P.) - 1972 - Travaux CPCS 1963-1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et Cartographie des sols. Rapp. mult., Paris, 96 p.
- ROSELLO (V.) et CHEVIN (P.) - 1983 - Sols bruns des Hauts de la Réunion. Rapp. mult., D.D.E. Réunion, 20 p.
- SHERMAN (G.D.), MATSUSAKA (Y.), IKAWA (H.) and UEHARA (G.) - 1964 - The role of the amorphous fraction in the properties of the tropical soils. Agrochimica 8 (2), 146-163
- SWINDALE (L.D.) - 1969 - The properties of volcanic ash soils. Panel on Volcanic Ash Soils in Latin America, Turrialba, Costa-Rica, Pap. B10.
- TADA (A.) - 1965 - On the compaction curve of the Kanto loam and its permeability. Trans. Agric. Eng. Soc. Jpm 14, 41-45.
- TASKEY (R.D.), HARWARD (M.E.) and YOUNGBERG (C.T.) - 1979 - Relationship of clay mineralogy to landscape stability. In "Proc. 5th North American Forest Soils Conference", C.T. HOUNBERG Ed. Colorado State Univ. Fort. Collins.

.../...

- TERZAGHI (K.) - 1958 - Design and construction performance of the Sasumea Dam. Proc. Inst. Civ. Eng. 9, 369-394.
- THRALL (R.) - 1979 - Engineering behavior of andisols. Unpublished notes. Dept. Civil Eng., Oregon. State Univ., Corvallis, USA.
- TUNCER (E.R.), LOHNES (R.A.) and DEMIREL (T.) - 1977 - Dessication of soils derived from volcanic ash. Nat. Ac. Sci., Washington D.C., Transport. Res. Rec., n° 642, 44-49.
- VAN SCHUYLENBORG (J.) - 1954 - The effect of air-drying of soil samples upon some physical soil properties. Neth. J. Agric. Sci. 2 (1), 50-57.
- WARKENTIN (B.P.) - 1972 - Use of the liquid limit in characterizing clay soils. Can. J. Soil Sci. 52, 457-464.
- WARKENTIN (B.P.) - 1974 - Physical properties related to clay minerals in soils of the Caribbean. Tropic. Agric. 51 (2), 279-286.
- WARKENTIN (B.P.) et MAEDA (T.) - 1974 - Physical properties of allophane soils from West Indies and Japan. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38, 372-377.
- WARKENTIN (B.P.) and MAEDA (T.) - 1980 - Physical and mechanical characteristics of andisols. In "Soils with variable charge". B.K.G. THENG Ed, Chap. 14, pp. 281-301.
- WADA (K.) - 1977 - Allophane and Imogolite. In "Mineral in Soil Environments", J.B. DIXON et S.B. WEED Ed., Soil Sci. Soc. Am., Madison pp. 603-638.
- WADA (K.) - 1980 - Mineralogical characteristics of andisols. In "Soils with variable charge", B.K.G. THENG Ed., Chap. 6, pp. 87-107.
- WADA (K.) and HARWARD (M.E.) - 1974 - Amorphous clay constituents of soils. Adv. Agron. 26, 211-260.
- WADA (S.) et WADA (K.) - 1975 - Ann. Meet. Clay Sci. Soc. Jpn.
- WALLACE (K.B.) - 1973 - Structural behavior of residual soils of the continually wet highlands of Papua New Guinea. Geotechnique 23, 203-218.

.../...

- WESLEY (L.D.) - 1973 - Some basic engineering properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Geotechnique* 23 (4), 471-494.
- WESLEY (L.D.) - 1974 - Tjipanundjang dam in West Java, Indonesia. *J. geotechnic Eng. Div.* 100, GT5, 503-522.
- WILLIS (E.A.) - 1946 - Discussion. *Highway Research Board* 26, 589-593.
- YAMANAKA (K.) - 1964 - Adhesion. In "Volcanic Ash Soils in Japan" K. YAMANAKA et C.A. BLACK Ed., Chap. 4, Physical Properties, pp. 69-75.
- YAMANOUCI (J.) - 1963 - Proc. Asian Reg. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 2 nd, Tokyo, 1, 359-363.
- YOSHINAGA (N.) - 1966 - Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from andosols and weathered pumices. *Soil Sci. Pl. Nutrit.* 12 (2), 47-54.
-

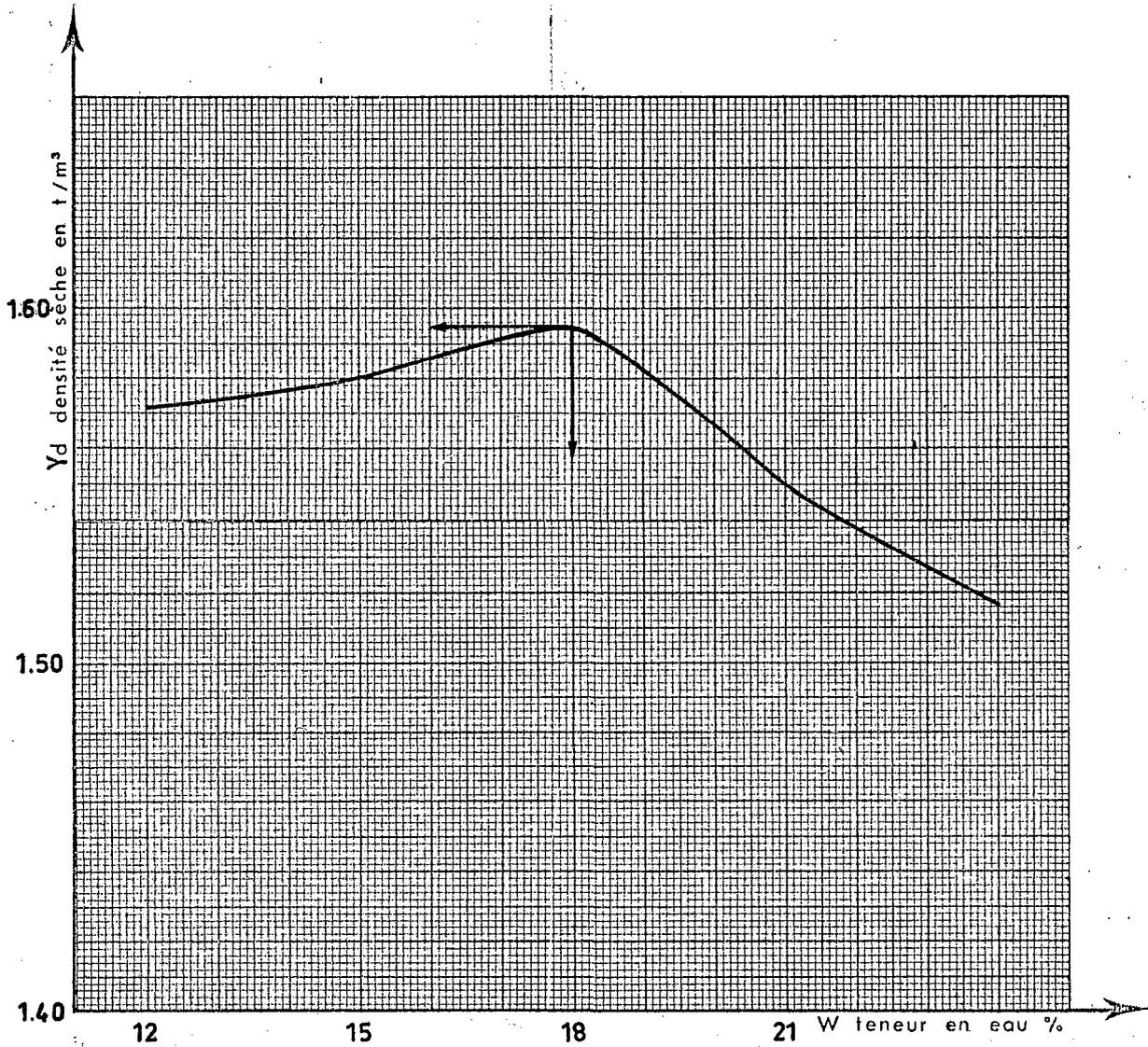
ESSAI PROCTOR

Chantier: CD.41 - Terre armée CROZANVILLE

Date de prélèvement:

Nature du matériau: Sable graveleux ponceux

Refus à 20 mm :



Y_d maximum : 1.595

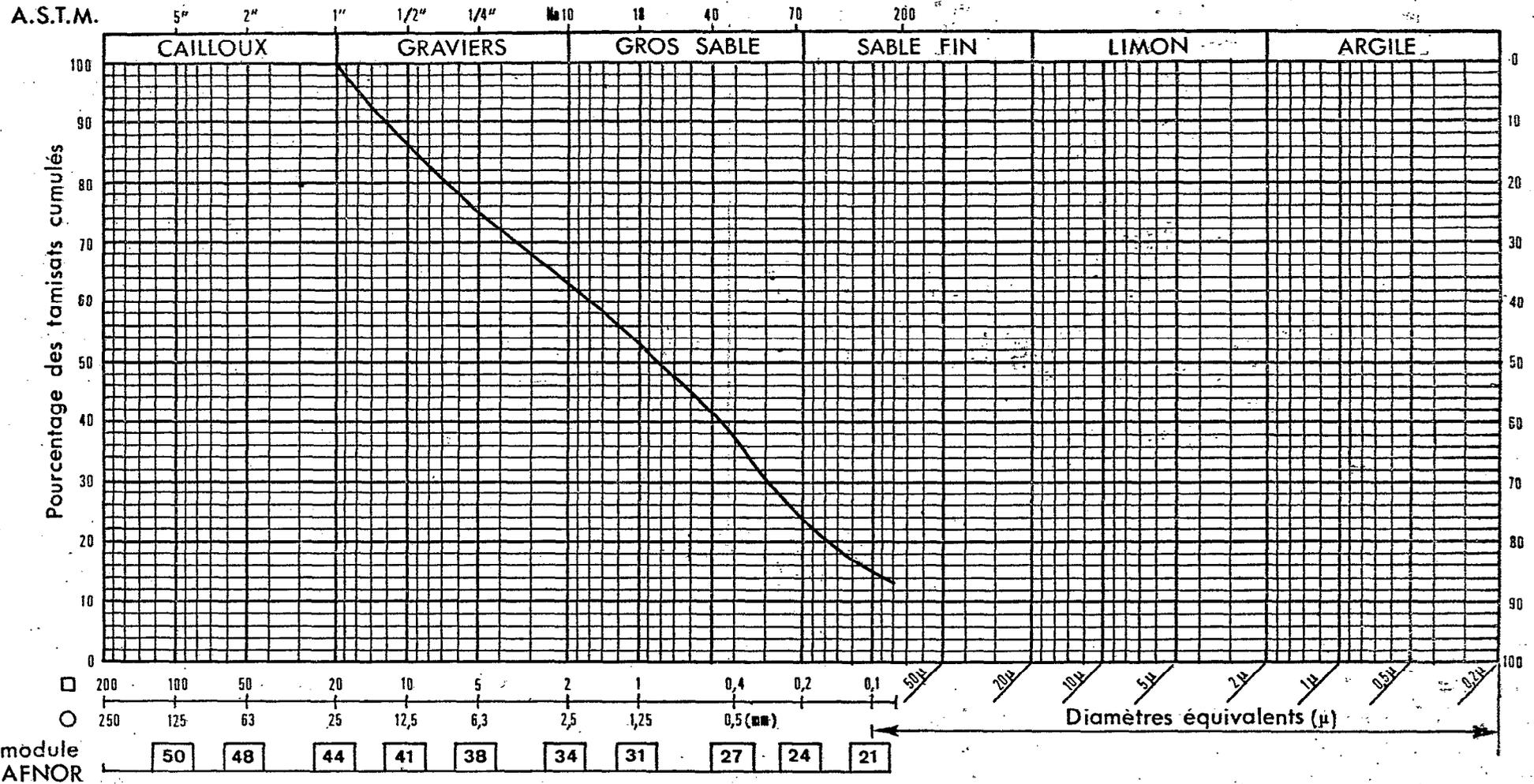
w optimum : 18

B. R. G. M.
 SERVICE GEOLOGIQUE DES ANTILLES

Chantier CD. 41 - TERRE ARMÉE CROZANVILLE
 Sondage
 Echantillon Sable graveleux ponceux (lavé)
 Profondeur

Date 20 / 12 / 1983

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



LEGENDE		E.S.		Poids spécifique minimum	Poids spécifique des grains	NATURE	LIMITES D'ATTERBERG	
Figuré	Profondeur	Piston	Visuel				LL	LP

B. R. G. M.

Service géologique des Antilles

Etude CD.41 - Terre Armée - Crozanville

Date 20/12/83

RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

REPERE DU SONDAGE					
PROFONDEUR DE PRELEVEMENT (m)					
DESCRIPTION Nature	Sable graveleux ponceux				
Couleur	Blanc-crème				
Consistance	Meuble				
Qualificatif					
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES Teneur en eau naturelle W%	13,53				
Poids spécifique apparent humide Y					
Poids spécifique apparent sec Yd					
Poids spécifique des grains Ys					
Teneur en eau de saturation Ws%					
Granulométrie (% < 0,08mm)					
LIMITES ATTERBERG	Limite de liquidité LL				
	Limite de plasticité LP				
	Indice de plasticité IP				
CLASSIFICATION LPC					
CARACTERISTIQUES MECANQUES Résistance au cisaillement (bars) Cd	0,01				
Frottement interne (degrés) φd	40				
Résistance à la compression (bars) Rc					
Equivalent de sable visuel	59,50				
Equivalent de sable piston	49,50				
W% optimum proctor normal	18				
Yd optimum proctor normal	1.595				
VITESSE DE CONSOLIDATION (cm ² /s) Cv					

ESSAI PROCTOR

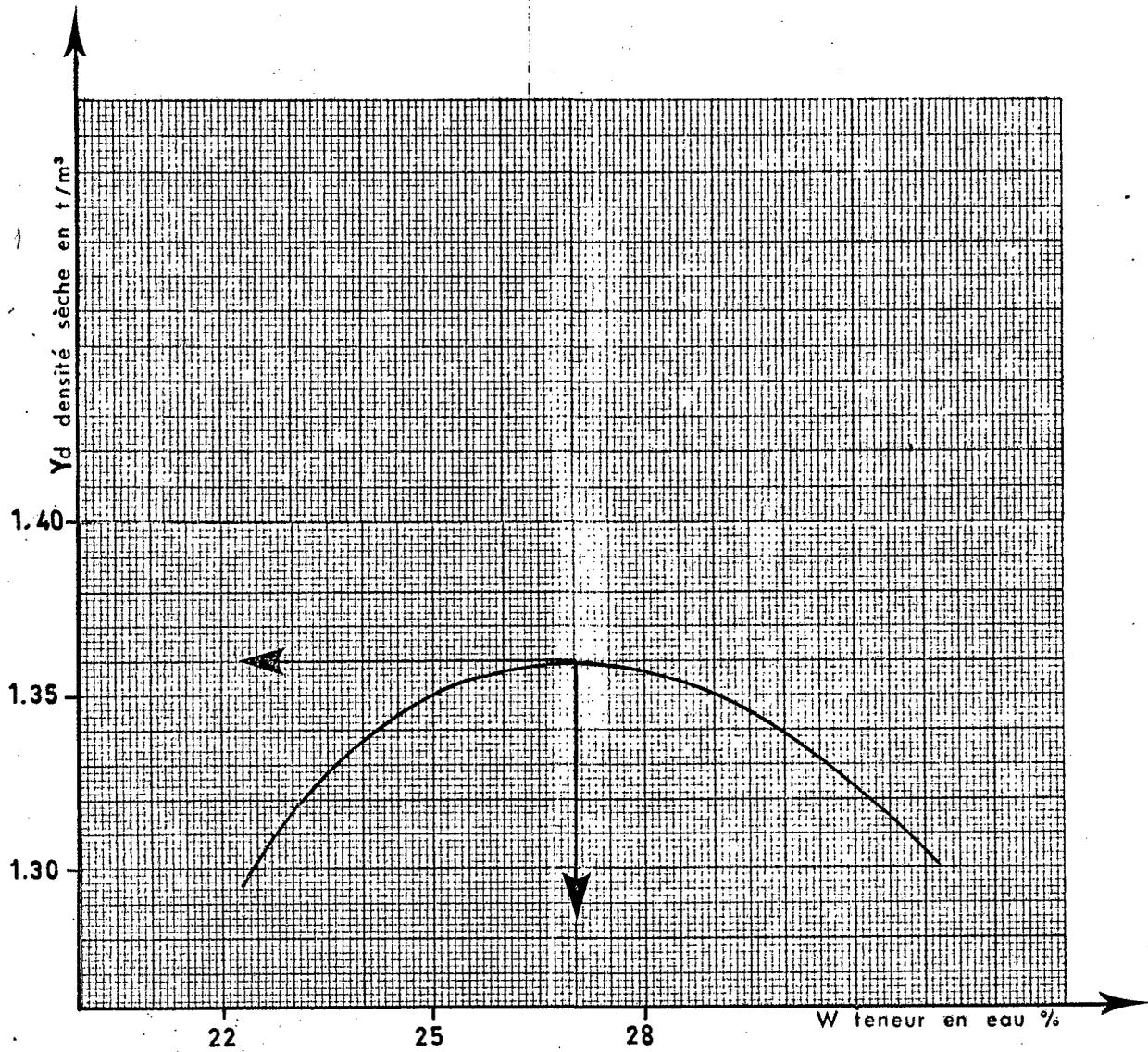
Chantier: C.D.41 - Th. Baude

Lieu de prélèvement:

Date de prélèvement:

Nature du matériau: Ponce altérée (Fort-de-France)

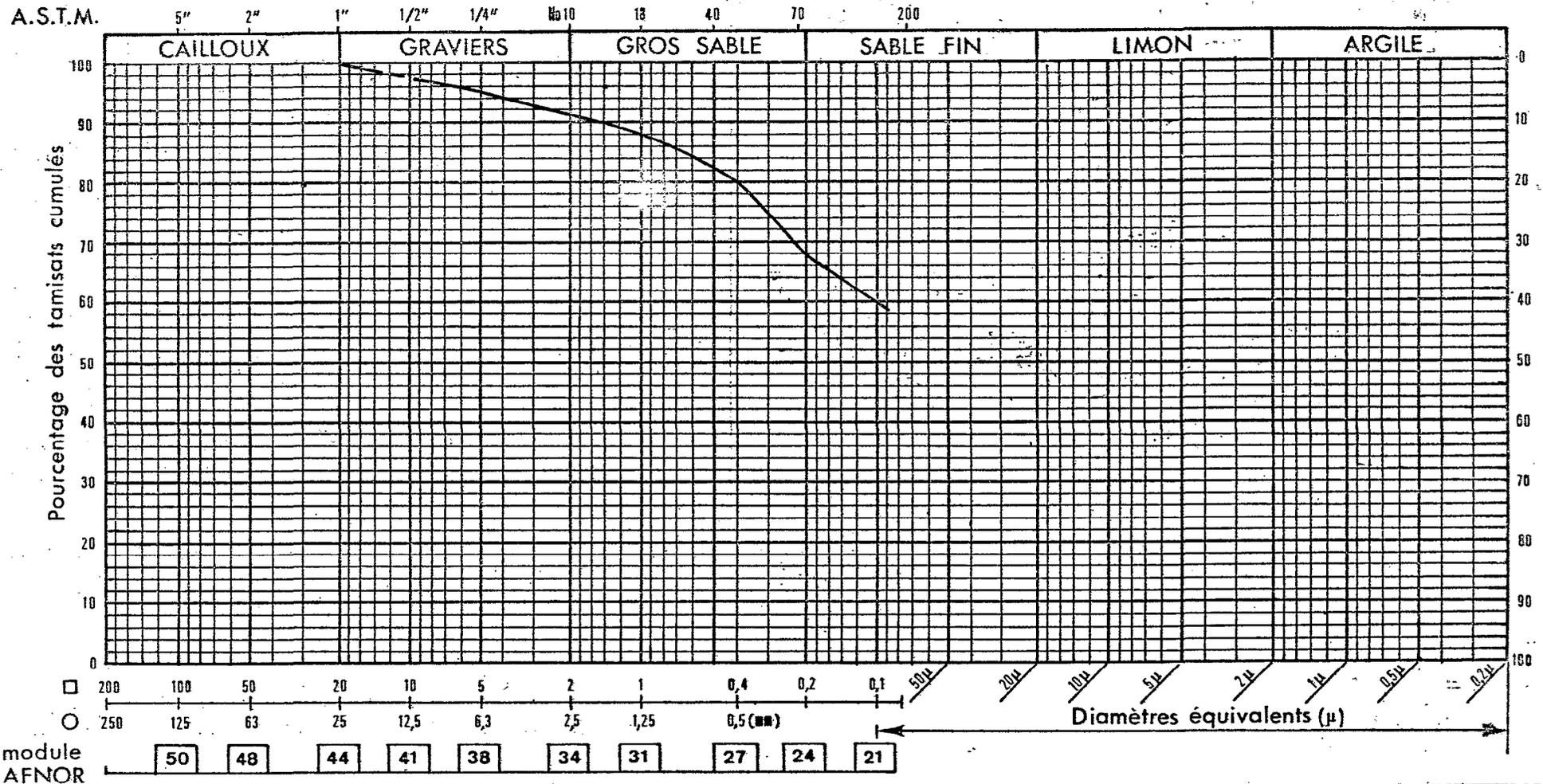
Refus à 20 mm :



Y_d maximum : 1.36

w optimum : 27%

ANALYSE GRANULOMETRIQUE



LEGENDE		E.S.		Poids spécifique minimum	Poids spécifique des grains	NATURE	LIMITES D. ATTERBERG	
Figuré	Profondeur.	Piston	Visuel				LL	LP

B. R. G. M.

Service géologique des Antilles

Etude CD.41 - Théodore Baude

Date 6 - 12 Août 1983

RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

REPÈRE DU SONDAGE		1				
PROFONDEUR DE PRELEVEMENT (m)						
DESCRIPTION		tuf cendreux				
Nature						
Couleur		beige				
Consistance		raide				
Qualificatif						
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES						
Teneur en eau naturelle	W%	20,63				
Poids spécifique apparent humide	Y					
Poids spécifique apparent sec	Yd					
Poids spécifique des grains	Ys					
Teneur en eau de saturation	Ws%					
Granulométrie (% < 0,08mm)		61				
LIMITES ATTERBERG	Limite de liquidité	LL	58			
	Limite de plasticité	LP	39			
	Indice de plasticité	IP	19			
CLASSIFICATION	RTR _r	LPC				
Optimum Proctor Normal	} mélange sur les échantillons 1, 2, 3		27 %			
Yd Max Proctor Normal			1,36			
Resistance à la compression (bars)	Rc					
Cisaillement uu		C = 0,5 bar φ = 37°				
Pression de consolidation (bars)	σ ₀					
Coefficient de compression	Cc					
Perméabilité pour e ₀ (cm/s)	K					
VITESSE DE CONSOLIDATION (cm ² /s)	Cv					

Matériaux à allophane

N° échantillon	Prof. (m)	Granulo 0-20 μ (%)	pF (W%)			Limites Atterberg (W%)			W (W%)	Densité		Proctor	
			2.5	3.0	4.2	WL	WP	IP		Yd	Ys	W% , Yt/m ³	
A 229 _f se	0,8	47,2	73,4	67,0	54,2	94	73	21	75,6			76,2	0,84
			40,6	31,6	28,5	52	45	7				38,0	1,13
GF 2 _f se	1,4		223,9	192,4	170,4	302	-	-	224,0	0,32			
			39,0	37,4	31,5	51	-	-					
GF 3 _f se	0,5		188,0	162,6	134,9	239	-	-	195,0	0,36			
			47,3	39,8	35,9	-	-	-					
B 570 F _f s	3,5		125,0	115,9	85,5	136	98	38	109,0	0,54			
			100	62	57								
B 570 C _f s	3,0		200,0	185,7	140,0	93	83	10	173,0	0,36			
			60	97	37								
BR _f s	2,0		170,0	104,1	140,8	258	151	107	186,0	0,45			
			26	24	20								
MA 5 _f s	0,4		80,0	75,9	64,8	100	77	23	72,0	0,83			
			42	31	20								
A 203 _f se	0,2	26,7	85,6	75,7	72,5								
			44,3	35,5	32,0								
Y 2296 _s	0,0	20,4	35,4	30,8	25,2					0,71			
Y 2304 _s	0,0	31,0	64,1	53,9	42,6	77	68	9		0,78			
Y 2316 _s	0,0	29,5	32,3	26,9	21,9	-	-	-		0,60			
Y 2354 _s	0,0	30,4	34,1	31,0	20,0	-	-	-					
Y 2639 _s	0,0	26,7	49,1	41,0	35,4	62	54	8		0,60			
A 230 _f se			74	68	56	95	76	19	75				
			38,6	32,6	30,2	50	47	3					
M S						105	89	16		0,6			

ANNEXE 2-1 f = frais

se = séché à l'étuve (105°)

s = séché plus d'un mois à l'air S.G. ANT. 2971

Matériaux à halloysite

N° échantillon	Prof. (m)	Granulo 0-20µ (%)	pF (W%)			Limites Atterberg (W%)			W (W%)	Densité		Proctor		Cisaillement rapide	
			2.5	3.0	4.2	WL	WP	IP		γ _d	γ _s	W% , γ _t /m³		C _{uu} bar	φ _{uu}
												W%	γ _t /m³		
SC 8 _s	1,2	75,1	52,9	48,1	42,6										
	2,0	75,1	60,0	54,5	49,5	79	49	30	54,3	1,02			1,2	0	
	4,3	44,6	53,7	47,6	41,3	84	45	39	51,8	1,05	33	1,33	0,5	35	
A 207 f se	0,4	54,9	67,0	65,9	59,9	98	66	32	67,6						
			43,1	37,2	35,0	62	39	23							
A 231 f se	1,8		65,2	61,3	55,7	88	54	34	68,9						
			47,2	43,5	39,1	70	45	25							
A 235 f se	0,5	78,0	36,4	35,6	31,8	46	31	15	11,1	1,30					
			29,8	26,9	23,1	40	27	13							
Y 2307 _s	0,4	79,0	49,1	42,9	35,7	70	56	14							
Y 2341 _s	0,4	77,8	51,3	43,1	35,5	67	52	15		1,00					
Y 2343 _s	0,4	70,2	48,4	43,6	34,8	68	49	19		1,03					
Y 2356 _s	0,0	32,8	49,5	43,6	32,8	54	48	6							
Y 2413 _s	0,4		47,5	42,2	38,2	74	56	18							
Y 2677 _s	0,4	54,2	35,7	30,6	27,0	48	38	10		1,03					
A 232 f s	1,8		66	63	56	91	57	34	7,0						
			47	43	39	73	45	28							

Ferrisols

N° échantillon	Prof. (m)	Granulo 0-20µ (%)	pF (W%)			Limites Atterberg (W%)			W (W%)	Densité		Proctor W%, γ_t/m^3	Cisaillement rapide uu	
			2.5	3.0	4.2	WL	WP	IP		γ_d	γ_s		Cuu bar	ϕ_{uu}
Y 2312 _s	0,0	61,9	35,2	33,0	29,1	58	41	17						
Y 2353 _s	0,4	72,5	51,2	46,0	40,6	68	43	25		1,21				
A 200 f se	0,4	65,9	37,7	33,6	29,5									
			33,8	31,7	27,8									
Y 2409 _s	0,4	77,5	46,1	40,9	35,7	70	43	27		1,16				

Altérite rouge - Argiles dominantes : kaolinite et montmorillonite

N° échantillon	Prof. (m)	Granulo 0 - 20 μ (%)	pF (W%)			Limites Atterberg (W%)			W (W%)	Densité		Proctor W%, γ_t/m^3	Cisaillement rapide uu	
			2.5	3.0	4.2	WL	WP	IP		γ_d	γ_d		Cuu bar	ϕ_{uu}
SC 1	4,5	41,8	50,9	43,4	35,3	66	45	21	50,4	0,96	-	voir type figure n°		
SC 4	5,2	33,1	34,3	27,1	21,0	56	38	12	33,8	1,21	2,40		0,6	30,0
SC 5	6,7	34,9	48,0	42,2	34,6	65	54	11	42,0	1,14	2,34		0,7	27,5
SC 7	4,8	27,8	45,0	39,6	34,3	76	42	34	44,7	0,98			0,6	32,5
	8,0	12,8	40,8	36,3	32,2	58	46	12	35	1,08	2,34			
SC 8	3,8	25,8	43,4	39,8	33,8	61	40	21						
SC 9	4,1	81,0	59,8	51,9	45,0	93	57	36	55,8	1,01	2,43		0,5	30
	8,1	35,3	54,7	46,8	40,6	71	56	21		1,12	2,32		0,7	35
A 234 f. se	2,1		68,3	62,8	53,0	119	64	55	62,7					
			65,2	55,9	49,2	112	62	50						

ESSAI C.B.R

Chantier : R.N. 1 - TRINITÉ SAINTE-MARIE (Martinique)

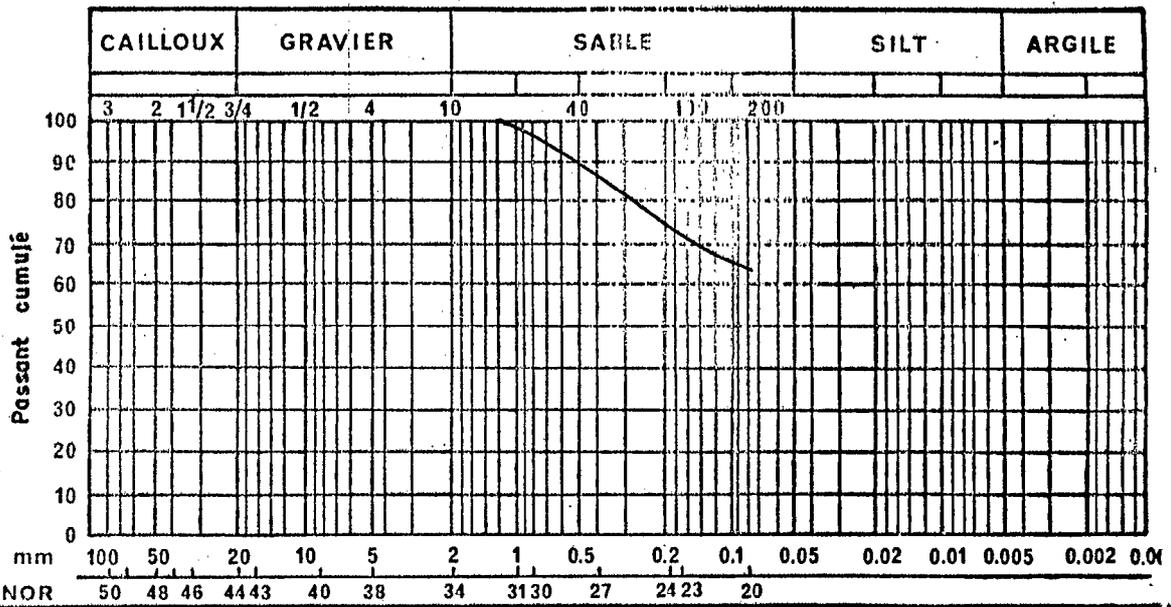
Dossier : ÉTUDE DÉBLAIS REMBLAIS

IDENTIFICATION

		Profondeur	WL	WP	IP	ES	Classification
Sol type	1	T 12	58	37	21		

GRANULOMETRIE

Passant à 80 μ
66%



ESSAI PROCTOR NORMAL

DENSITE SECHE MAXIMALE } T / m³ 1,30

TENEUR EN EAU OPTIMALE } % 29%

DENSITE SECHE

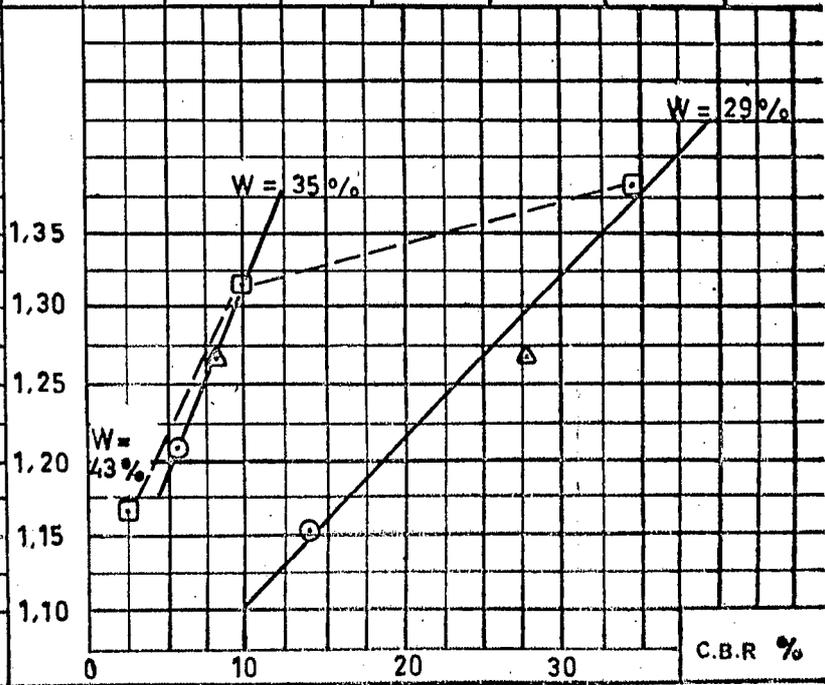
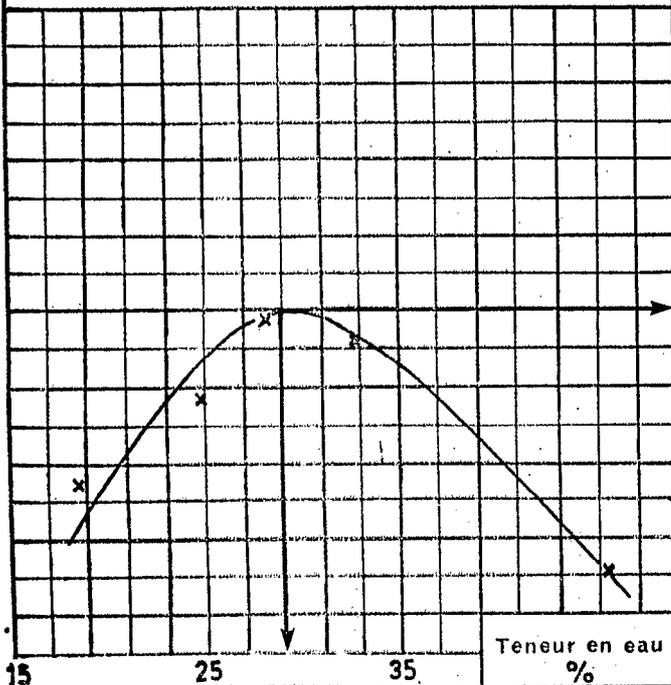
ESSAI C.B.R
immédiate

Nb. coups

□ 55
△ 25
○ 10

W %

29%
35%
43%



ESSAI C.B.R

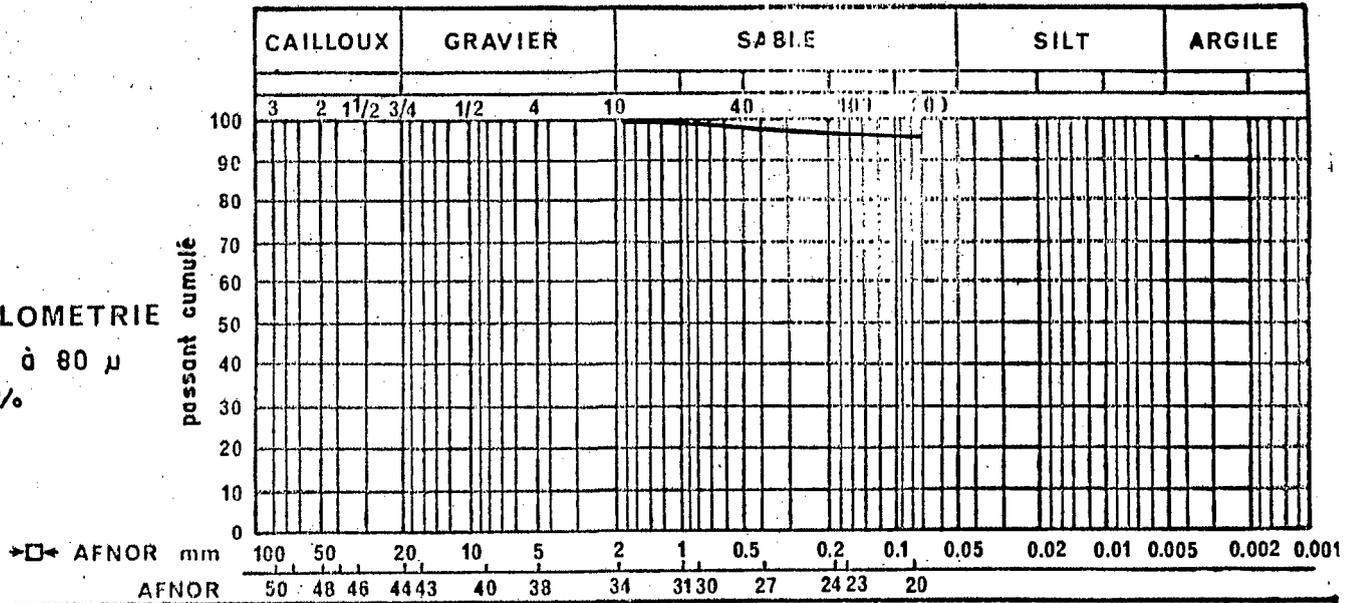
Chantier : R.N.1 - TRINITÉ SAINTE-MARIE (Martinique)

Dossier : ÉTUDE DÉBLAIS REMBLAIS

IDENTIFICATION

		Profondeur	WL	WP	IP	ES	Classification
Sol type	2	T6	91	50	41		

GRANULOMETRIE
Passant à 80 µ
96 %



ESSAI PROCTOR NORMAL

DENSITE SECHE MAXIMALE } T / m³ 1,325
TENEUR EN EAU OPTIMALE } % 33 %

DENSITE SECHE

ESSAI C.B.R
immédiate

Nb. coups	W %	
	□ 55	35,1%
△ 25	40%	
○ 10	47,3%	

