

Académie royale
des
Sciences coloniales

—
CLASSE
DES SCIENCES TECHNIQUES

—
Mémoires in-8°. Nouvelle série.
Tome VI, fasc. 1.

Koninklijke Academie
voor
Koloniale Wetenschappen

—
KLASSE
DER TECHNISCHE WETENSCHAPPEN

—
Verhandelingen in-8°. Nieuwe reeks.
Boek VI, aflev. 1.

Propriétés et applications des latérites au Congo belge

PAR

R. VAN GANSE

INGÉNIEUR CHIMISTE ET ÉLECTRICIEN
DIRECTEUR DU LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS
DU GOUVERNEMENT GÉNÉRAL
MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE
ROYALE DES SCIENCES COLONIALES

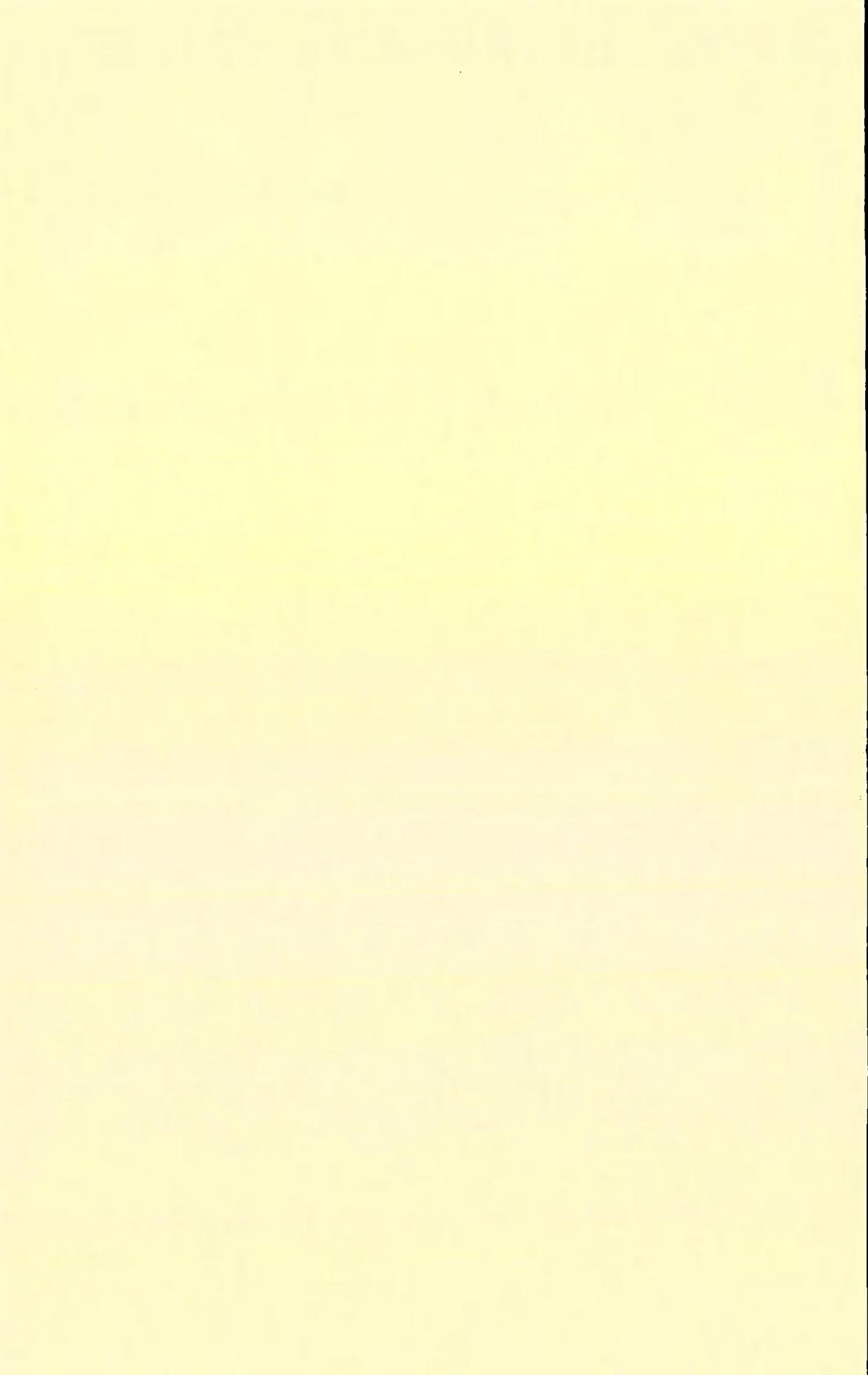


Avenue Marnix, 30
BRUXELLES

Marnixlaan, 30
BRUSSEL

1957

PRIX : F 70
PRIJS :



Propriétés et applications des latérites au Congo belge

PAR

R. VAN GANSE

INGÉNIEUR CHIMISTE ET ÉLECTRICIEN
DIRECTEUR DU LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS
DU GOUVERNEMENT GÉNÉRAL
MEMBRE CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE
ROYALE DES SCIENCES COLONIALES

Mémoire présenté à la séance du 30 novembre 1956.

Propriétés et applications des latérites au Congo belge

RÉSUMÉ

Dans de nombreuses régions du Congo belge on trouve des latérites pisolithiques graveleuses et des latérites rocheuses de plusieurs types dont la composition et les propriétés physiques, mécaniques et géotechniques sont résumées et commentées.

Ces matériaux locaux ont été utilisés empiriquement depuis longtemps, mais certains d'entre eux, sélectionnés par des essais appropriés, sont maintenant mis en œuvre rationnellement dans des ouvrages importants de génie civil au Congo belge.

SAMENVATTING

In talrijke streken van Belgisch-Congo komen pisolitische grindlaterieten en rotslaterieten van verscheidene typen voor ; hun samenstelling en hun fisische, mechanische, en grondmechanische eigenschappen worden samengevat en besproken.

Deze plaatselijke materialen werden sedert lang empirisch gebruikt, maar sommige ervan, door aangepaste testmethoden goed bevonden, worden heden rationeel tewerkgesteld in belangrijke bouwwerken in Belgisch-Congo.

1. — INTRODUCTION

Les latérites que nous décrirons sont des substances dures ferrugineuses, qu'on trouve soit en fragments graveleux, soit en blocs ou en bancs continus, et en général à faible profondeur, dans les sols de plusieurs régions du Congo belge.

On les désigne souvent sous le nom de « limonite », appellation impropre comme nous verrons plus loin.

La dureté de ces matériaux, bien que très inférieure à celle des pierres et des roches, en fait des succédanés précieux des matériaux pierreux.

Les latérites sont en général de couleur vive, allant du jaune orangé au rouge sanglant et au brun violacé ; la cassure fraîche a souvent un aspect bariolé, les divers composants ayant des couleurs différentes. La composition indique toujours une teneur élevée en sesquioxyde ferrique Fe_2O_3 , auquel est due la teinte rouge caractéristique. Certaines latérites contiennent aussi du bioxyde de manganèse en quantité appréciable.

Nous allons résumer dans ce qui suit les observations et les résultats des analyses chimiques et granulométriques et des essais physiques, mécaniques et géotechniques que nous avons effectués au Laboratoire des Travaux publics du Gouvernement général à Léopoldville sur un assez grand nombre de matériaux latéritiques de types divers, provenant de presque toutes les régions du Congo où on les trouve.

. — GENÈSE DES MATÉRIAUX LATÉRITIQUES

Bien que notre étude vise avant tout à dégager les propriétés mécaniques des divers types de matériaux

latéritiques, et les possibilités d'utilisation qui en découlent, il n'est pas inutile de consacrer quelques mots au mode de formation de ces matériaux pseudo-rocheux qui se sont créés aux dépens de sols meubles.

Ils ont été formés, et peuvent continuer à se former, par l'accumulation, dans certaines couches du sol qui réunissent des conditions favorables, d'oxydes et hydroxydes métalliques du groupe du fer et principalement d'oxyde ferrique.

Cette accumulation d'oxyde peut être réalisée de deux façons différentes : accumulation relative et accumulation absolue [1] (*).

L'accumulation relative des oxydes de fer et autres résulte de l'élimination progressive d'autres constituants du sol : oxydes des métaux alcalins (soude et potasse), alcalino-terreux (chaux, magnésie, etc.), et silice provenant de silicates. Ces corps sont solubles dans les eaux alcalines, tandis que l'oxyde ferrique et l'alumine y sont insolubles [2].

La silice cristallisée (quartz) et la kaolinite [3 et 4] peuvent être considérées comme insolubles également.

Dès lors, la percolation par des eaux alcalines ne laissera subsister du sol qu'un squelette où prédomineront les oxydes de fer et d'alumine ainsi que le quartz et la kaolinite initialement présents.

L'accumulation relative de l'oxyde de fer est donc accompagnée d'une diminution de volume du sol.

L'accumulation absolue de l'oxyde de fer résulte de la précipitation dans le sol d'hydroxyde de fer qui y est amené par une eau acide, dans laquelle il est soluble. Lorsque des composants du sol neutralisent cette eau, l'hydroxyde de fer précipite et enrobe d'une couche ferrugineuse les grains du sol, qui se soudent entre eux. Seuls l'oxyde ferrique et l'oxyde de manganèse s'ac-

(*) Les chiffres entre [] renvoient à la bibliographie, p. 43.

cumulent de cette façon ; l'alumine n'y participe pas.

Tous ces phénomènes sont en réalité beaucoup plus complexes que ne l'esquisse l'aperçu simpliste que nous venons d'en donner. Le transport des substances en question peut s'effectuer sous une forme colloïdale aussi bien qu'en solution véritable ; et la solubilité du fer ne dépend pas seulement du pH, mais également de la présence de complexants. D'autre part, le pH de l'eau imprégnant les sols est influencé par la végétation et la flore bactérienne ; et celle-ci provoque des phénomènes d'oxydation et de réduction qui modifient également la solubilité des substances minérales.

L'accumulation absolue n'est pas une latérisation au sens strict du mot, mais plutôt une podzolisation du sol [2]. Mais, dans un même matériau, l'accumulation relative et l'accumulation absolue peuvent se réaliser successivement et il semble même qu'il en est presque toujours ainsi.

De toute façon, nous précisons ici que nous appelons latérites tous les sols indurés ferrugineux, quel que soit le mécanisme de l'accumulation.

Nous excluons ainsi de notre étude deux classes de matériaux : les bauxites et les sols meubles ferrugineux non indurés.

Les bauxites sont probablement inexistantes au Congo belge ; des latérites alumineuses ont été trouvées dans la Province orientale [5], mais elles sont en infime minorité parmi les latérites ferrugineuses.

Quant aux sols meubles ferrugineux non indurés, leurs propriétés sont celles de sols meubles, sans intérêt dans le cadre de cette étude. Je signale toutefois à leur sujet que nous n'avons jamais réussi à vérifier une propriété qui leur est attribuée par plusieurs auteurs, à savoir, qu'ils acquerraient par une exposition prolongée à l'air et aux intempéries une dureté inexistante à l'état naturel.

Nous n'allons pas nous attacher davantage aux processus de formation, et nous nous bornerons à les signaler lorsque l'identification est possible, lors de la description des divers types de latérites dont nous allons parler.

3. — LES PRINCIPAUX TYPES DE LATÉRITES CONGOLAISES

D'après leur structure physique, les latérites congolaises se divisent en deux grandes classes : les latérites graveleuses et les latérites rocheuses.

3.1. — Les latérites graveleuses.

Elles se composent de pisolithes, c'est-à-dire de petits fragments durs isolés, enrobés de (ou dispersés dans) un sol fin.

Du point de vue géotechnique, elles sont analogues à des graviers plus ou moins argileux. Elles peuvent comme ceux-ci être exploitées à la pelle, tamisées, lavées et triées.

Les pisolithes peuvent se diviser en 3 types :

a) *Les nodules primaires.*

Ce sont des concrétions de forme arrondie et de structure concentrique, dont le diamètre est de l'ordre d'un centimètre (*Fig. 1*). La couche extérieure est la plus dure, de couleur généralement foncée, et très lisse, luisante après lavage (*Fig. 2*). L'intérieur est moins dur, de couleur plus claire, et moins compact ; certains nodules sont même partiellement creux.

b) *Les pisolithes composés.*

Leur dimension peut atteindre plusieurs centimètres. La forme, généralement allongée, est très irrégulière, avec des protubérances arrondies et des anfractuosités, parfois même des canaux traversant le pisolithe (*Fig. 3*).

La coupe révèle que ces pisolithes sont composés de nodules primaires, soudés entre eux par un ciment ferrugineux dû à une accumulation absolue d'oxyde ferrique dans les interstices.

Nous présumons que les pisolithes composés sont un stade de la formation d'une cuirasse continue dont nous parlerons plus loin.

Très souvent, une latérite graveleuse contient à la fois des nodules primaires et des pisolithes composés (*Fig. 4*).

c) *Les débris de cuirasse.*

Ces pisolithes ressemblent par leurs dimensions et leur contour irrégulier aux pisolithes composés, mais s'en distinguent par une forme plus angulaire, avec des arêtes assez vives, et la coupe ne laisse pas reconnaître les nodules primaires composants.

Le sol fin enrobant les débris de cuirasse est en général moins argileux que celui des autres latérites graveleuses, et sa quantité par rapport aux pisolithes, moins grande.

3.2. — Les latérites rocheuses.

Ce sont des matériaux cohérents et durs, semblables à des roches tendres, qu'on peut exploiter, comme celles-ci, au marteau ou à l'explosif, et réduire en moellons et en concassés tout-venant ou calibrés.

Les latérites rocheuses se présentent soit en bancs continus, pouvant couvrir plusieurs hectares, soit en blocs isolés. L'épaisseur des bancs continus, appelés aussi cuirasses de latérite, est très variable, mais souvent de l'ordre d'un mètre.

Leur structure est toujours très poreuse, avec des poches, des fentes et des canaux dont la largeur atteint généralement quelques millimètres, parfois un centimètre ; c'est pourquoi on les appelle quelquefois des latérites scoriacées. Ce sont des conglomérats à liant

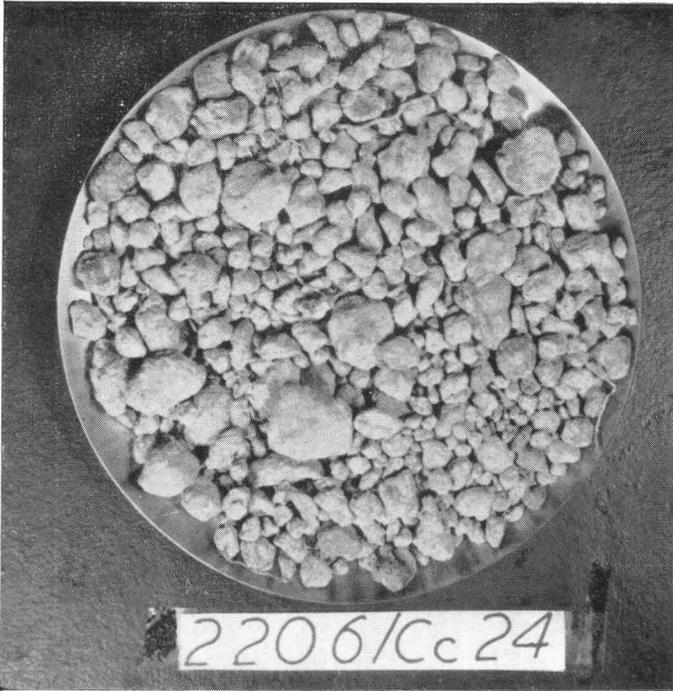


FIG. 1. — Latérite graveleuse (2/3 de grandeur naturelle) (*Photo* : PAGE).

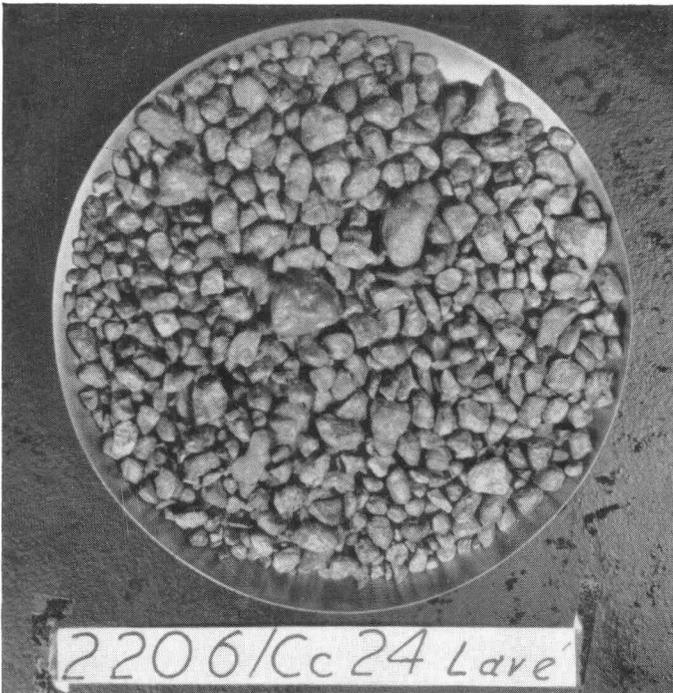


FIG. 2. — Pisolithes de la latérite graveleuse de la Fig. 1. Nodules primaires (2/3 de grandeur naturelle). (*Photo* : PAGE).



FIG. 3. — Pisolithes composés (2/3 de grandeur naturelle) (Photo : PAGE).



FIG. 4. — Latérite graveleuse. Nodules primaires et pisolithes composés mélangés (2/3 de grandeur naturelle). (Photo : PAGE).

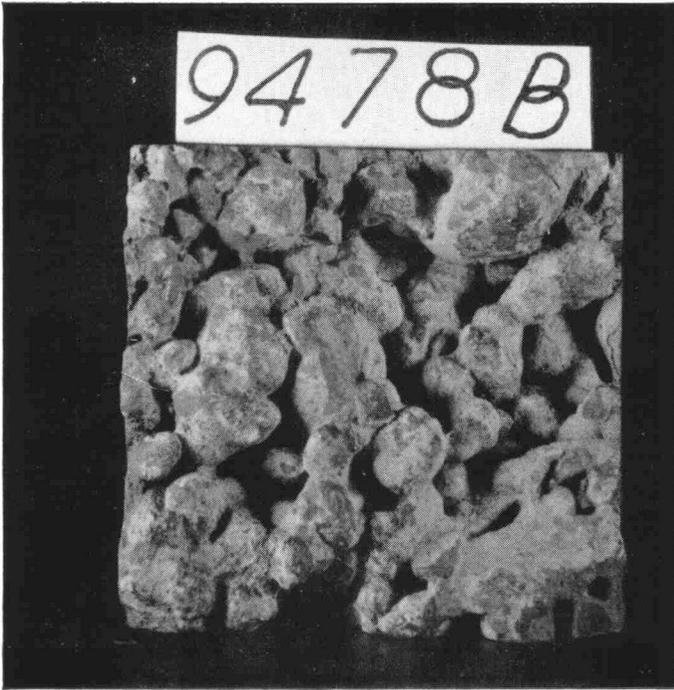


FIG. 5. — Latérite rocheuse à nodules agglomérés. Face intacte (grandeur naturelle). (Photo : PAGE).

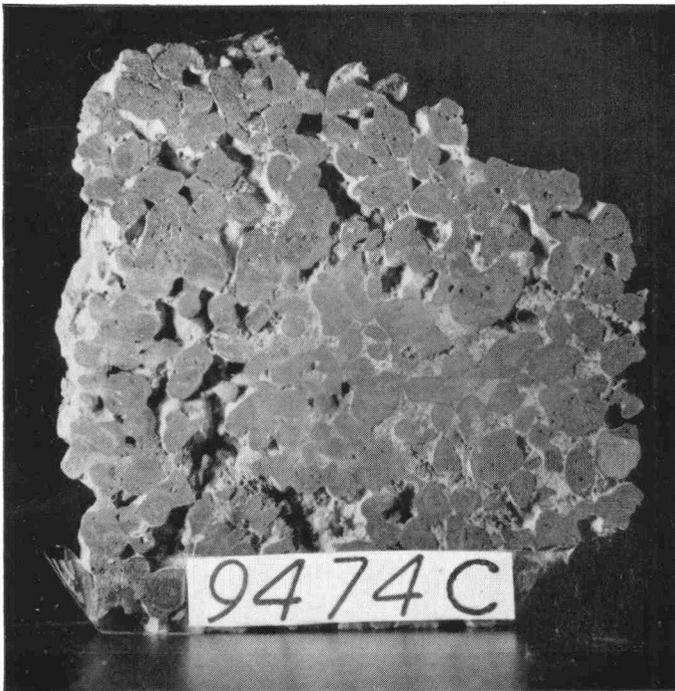


FIG. 6. — Latérite rocheuse à nodules agglomérés. Coupe (grandeur naturelle). (Photo : PAGE).

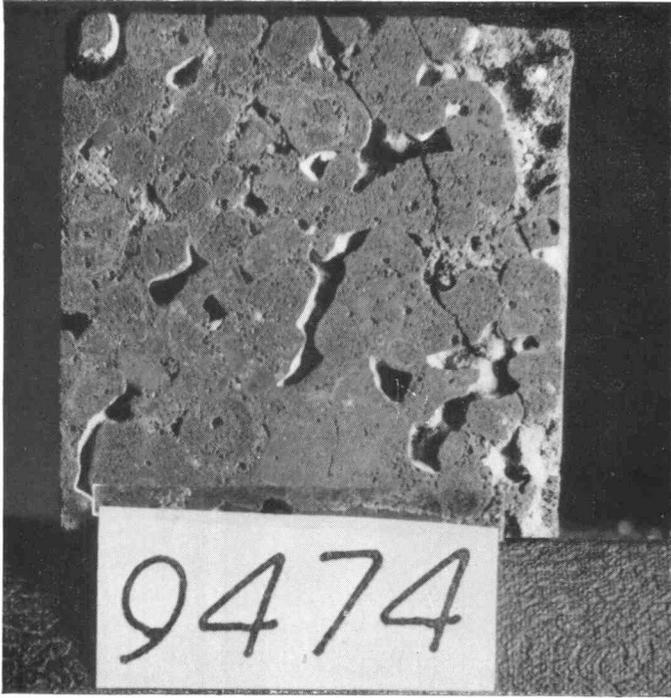


FIG. 7. — Latérite rocheuse scoriacée. Coupe (grandeur naturelle).
(Photo : PAGE).



FIG. 8. — Latérite rocheuse manganésifère. Coupe (grandeur naturelle).
(Photo : PAGE).



FIG. 9. — Latérite rocheuse à structure apparemment pleine. Coupe
(grandeur naturelle). (Photo : PAGE).

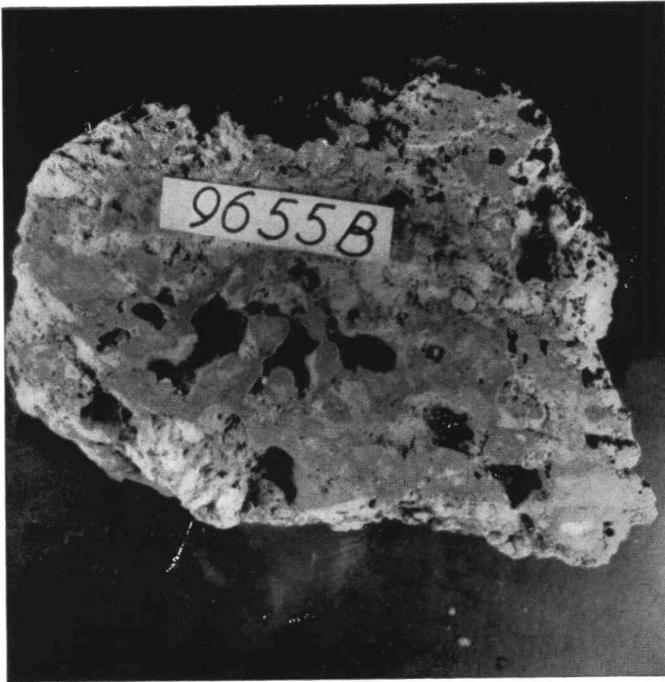


FIG. 10. — Brèche ferrugineuse latéritique. Coupe (1/2 de grandeur naturelle).
(Photo : PAGE).

ferrugineux, dont le squelette est composé de pisolithes (*Fig. 5, 6, 7, 8, 9*), et comprend parfois aussi des fragments de roches, quartz, feldspaths, etc., arrondis ou anguleux. Lorsque ces éléments prédominent, la latérite rocheuse a l'allure d'un poudingue ou d'une brèche ferrugineuse (*Fig. 10*).

Le remplissage des interstices du squelette par le liant ferrugineux est très variable. On rencontre des structures très ouvertes (*Fig. 5*), d'autres apparemment fermées (*Fig. 8, 9*) avec tous les aspects intermédiaires (*Fig. 6, 7*).

Cependant le liant ferrugineux ne remplit jamais tous les interstices et il subsiste en général des canaux qui sont parfois vides, et parfois partiellement remplis de sol fin.

4. — LES GISEMENTS LATÉRITIQUES

4.1. — Aspect.

Un même gisement contient souvent des latérites graveleuses et rocheuses en couches superposées. La formation commence vraisemblablement par des nodules primaires, que de nouvelles accumulations de fer soudent entre eux en pisolithes composés ; ceux-ci sont cimentés à leur tour en blocs plus importants, qui peuvent en se réunissant constituer une cuirasse continue.

On trouve les latérites en général sous un ou deux mètres de sol meuble. On peut s'attendre à trouver, dans un gisement complet, les couches suivantes :

- 1) Un banc supérieur de latérite graveleuse, avec des nodules primaires d'abord, des pisolithes composés ensuite ;
- 2) La cuirasse de latérite rocheuse ;
- 3) Un banc inférieur de latérite graveleuse, avec des

pisolithes composés d'abord, pour finir avec des nodules primaires de plus en plus rares.

En fait, il manque presque toujours l'un ou l'autre de ces horizons, soit parce que la formation n'a pas été complète, soit qu'elle est déjà entamée par l'érosion.

L'érosion des sols de surface peut dénuder le banc supérieur de latérite graveleuse, et celle-ci peut être à son tour emportée par les eaux. On ne la retrouvera pas : les pisolithes sont trop tendres pour résister au choc des cailloux, et jamais nous n'en avons vu parmi des graviers alluvionnaires. La cuirasse dénudée ne résiste pas indéfiniment à l'érosion et à l'attaque de la végétation : elle se fragmente en blocs, puis en petits morceaux qui constituent les latérites graveleuses de débris de cuirasse.

Ainsi, la destruction d'une formation latéritique fossile reproduit les matériaux sous des formes très semblables à celles qui caractérisent un gisement récent ou encore en cours de formation.

Enfin, la destruction d'un gisement fossile peut avoir été interrompue par un apport plus récent de sols de couverture.

On comprend ainsi la variété des profils qu'on rencontre et la difficulté d'assigner à chaque matériau sa place exacte dans le cycle.

Dans certains cas, l'étude détaillée de la composition chimique, non seulement des diverses couches latéritiques, mais aussi des sols recouvrants et subjacents, permet d'élucider l'historique du gisement [1]. Mais ces recherches dépassent le cadre de la présente étude.

4.2. — Répartition géographique.

Nous avons rencontré jusqu'ici au Congo belge et au Ruanda-Urundi des latérites dans quatre régions non limitrophes :

- 1) La zone ouest, de l'Océan Atlantique jusqu'à la

ligne Madimba-Ngidinga, soit à peu près le 15^e méridien est. Cette ligne correspond, grosso modo, à la limite est de l'affleurement du système schisto-calcaire ;

2) La zone nord, dont la limite méridionale, passant au sud de Bikoro, d'Ikela et de Kindu, au nord de Beni, et à l'ouest des Monts Bleus, est à peu près celle de la grande forêt équatoriale ;

3) La zone sud, essentiellement le Haut-Katanga, avec le sud-est de la Province du Kasai ;

4) La partie orientale du Ruanda-Urundi, à l'est de la crête Congo-Nil.

Nous avons reproduit sur la carte de la *Fig. 11* ces limites et les endroits des gisements dont nous avons reçu des échantillons. La plupart de ces points s'alignent selon des tracés qui ne sont autres que ceux des grandes routes : Coquilhatville-Boende, Stanleyville-Irumu, Sakania-Élisabethville-Kolwezi, etc. Il va de soi que dans ces régions on trouvera autant de latérites à l'intérieur des mailles du réseau routier qu'au long des itinéraires.

Dans les régions où les gisements sont nombreux, nous ne les avons pas tous reportés sur la carte pour ne pas nuire à la clarté de celle-ci.

D'autre part, nous avons tracé les limites en nous basant également sur l'examen de nombreux échantillons de matériaux routiers, exempts de latérites, provenant des autres régions.

Sauf nouvelles découvertes, nous estimons que les limites tracées sur notre carte sont exactes à une vingtaine de km près pour les zones ouest et est, et à une centaine de km près pour les zones nord et sud.

Il convient de noter que les quatre zones latérisées que nous distinguons sont très dissemblables en ce qui concerne le climat et le relief.

La zone ouest est un pays de plateaux entrecoupés

de vallées profondes. La saison sèche est très marquée, de mai à septembre. La latérite se trouve toujours dans les têtes de collines et affleure au haut des versants.

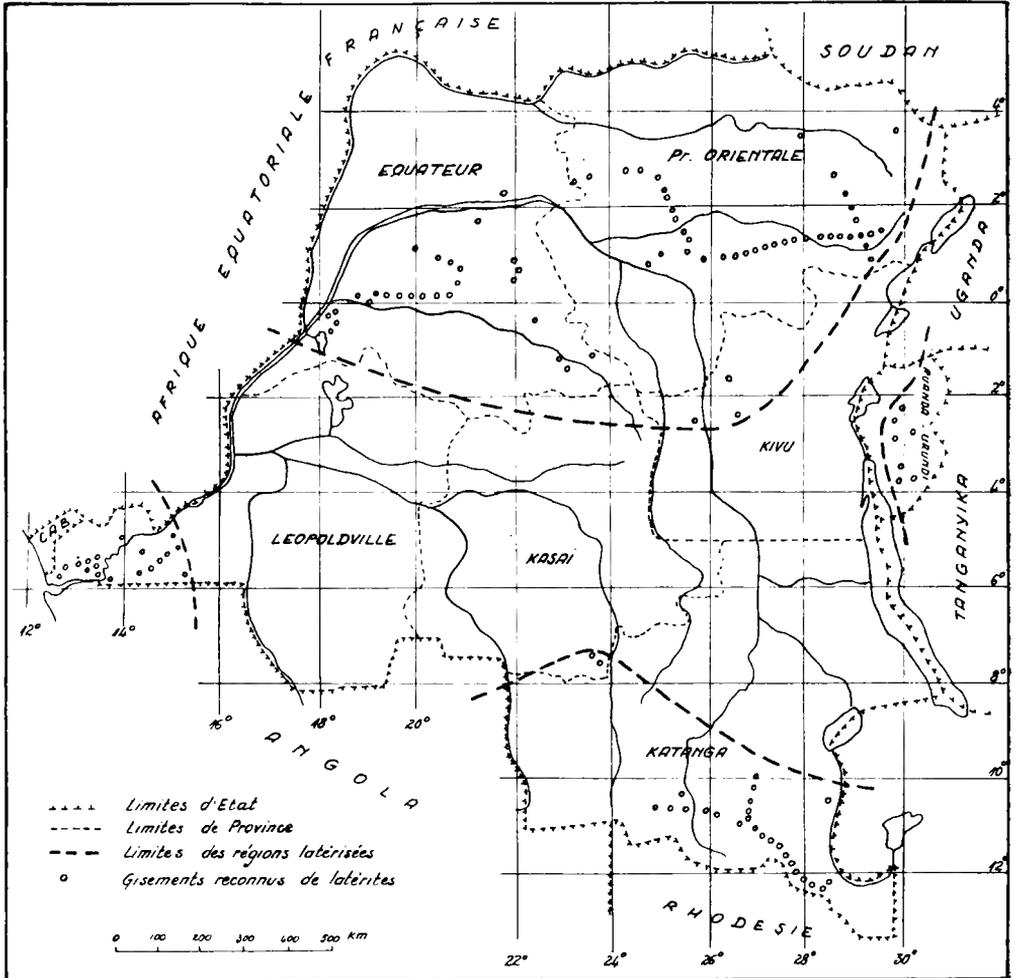


FIG. 11. — Limites des régions latérisées.

Dans la zone nord, la plus grande partie de la Province de l'Équateur est basse et marécageuse. Il y pleut toute l'année. La latérite se trouve dans de petites élévations de terrain, qui surplombent de 10 ou 20 m la forêt ma-

récegeuse environnante. Les postes européens ont en général été construits sur ces petits mamelons.

Dans cette région, la nappe phréatique est influencée par les crues annuelles des rivières, qui atteignent plusieurs mètres.

Dans la Province orientale, le relief s'accroît en allant vers l'est. On y trouve des latérites vers la tête des collines et aussi dans les flancs de vallées (cuirasses de basse pente).

La zone sud est un pays de plateaux de savane herbeuse, pauvres en eau. La saison sèche y est très accentuée et longue (6 à 8 mois).

Enfin la région est du Ruanda-Urundi est un pays de collines, au climat relativement frais, avec 4 mois de saison sèche. Seules les têtes de collines sont latérisées.

4.3. — Abondance.

Une estimation de la surface des gisements de latérite n'est pas aisée. Le voyageur qui parcourt en voiture les régions que nous avons citées ne manquera pas de remarquer que les couches de roulement des routes sont presque partout en latérite graveleuse, et par temps sec il sera bronzé en peu de temps par la poussière rouge. Il remarquera aussi des moellons de latérite rocheuse, utilisés dans le soubassement des constructions. Qu'il n'en conclue pas que la latérite se trouve partout. Elle a été apportée sur la route, parfois d'assez loin. De temps en temps, le talus de la route lui montrera qu'il traverse un banc latéritique.

Mais la route suit en général les lignes de crête où les gisements de latérite se trouvent précisément. A titre d'exemple, la route de Stanleyville à Irumu traverse, du Km 40 jusque Mambasa, soit sur environ 500 km, 34 gisements de latérite qui sont régulièrement exploités

pour l'entretien de la route. Sur la route Stanleyville-Buta, du Km 88 au Km 326, les gisements sont au nombre de 18 sur 238 km. En admettant que chaque gisement s'étend sur 200 à 300 mètres, ces gisements représentent à peine 2 % de la longueur du tracé ou de la surface de la région traversée. Tenant compte de ce que la route évite en général les zones basses, certainement plus pauvres en latérite, nous croyons pouvoir dire que la surface des gisements de latérite représente moins de 1 % de la surface totale.

5. — LES LATÉRITES GRAVELEUSES

5.1. — Propriétés géotechniques.

Les principales caractéristiques géotechniques des latérites graveleuses sont : la granulométrie et les limites d'Atterberg de la fraction fine passant au tamis de 0,42 mm.

Les propriétés physiques des pisolithes : porosité, densité apparente et réelle, dureté, seront commentées plus loin.

La courbe granulométrique d'une latérite graveleuse ressemble à celle d'un gravier argileux. La dimension des particules va de quelques centimètres à moins de 1 micron. Un exemple typique est le diagramme de la *Fig. 12*.

Une particularité, déjà relevée ailleurs [6], des courbes granulométriques de latérites graveleuses, et qui est extrêmement typique pour ces matériaux, est l'existence d'un palier quasi-horizontale s'étendant sur plusieurs modules de diamètres, généralement entre 1 mm et 0,25 mm. La signification de ce palier est que des éléments de dimensions comprises entre ces limites sont pratiquement absents. La courbe granulométrique re-

présente donc un mélange de deux matériaux dont les granulométries ne se recouvrent pas, mais se situent au contraire en deçà et au-delà des limites du palier : ce sont d'une part les pisolithes et d'autre part les particules du sol fin enrobant.

Qu'il s'agit réellement de deux substances différentes est prouvé par l'analyse chimique et plus simplement par la différence des densités réelles. Celle des pisolithes réduits en poudre dépasse toujours 3, parfois 3,5, tandis que les éléments fins ont généralement une densité réelle de 2,7, habituelle des sols argileux.

L'existence du palier de la courbe granulométrique nous permet de simplifier grandement la description de la granulométrie d'une latérite graveleuse quelconque. En effet, nous pouvons choisir arbitrairement, entre les limites du palier, une dimension quelconque comme limite entre les deux fractions, sans erreur notable. Nous avons choisi pour cette limite la dimension de 0,42 mm qui est celle du tamis ASTM ⁽¹⁾ 40, pour la simple raison que, par convention internationale, les limites d'Atterberg des sols se mesurent sur la fraction passant ce tamis.

Nous divisons donc une latérite graveleuse quelconque en pisolithes refusées au tamis 40 et en sol fin passant ce tamis. L'abondance relative de ces deux fractions, en poids, est donnée immédiatement par l'ordonnée du palier. Ainsi, dans l'exemple de la *Fig. 12*, nous avons 85 % de pisolithes et 15 % de sol fin.

Nous pouvons calculer et dessiner séparément les courbes granulométriques de chacun des deux matériaux considérés à part.

La courbe granulométrique des pisolithes est celle d'un gravier ou gravillon peu étalé, que nous pouvons résumer par ses calibres nominaux supérieur et inférieur. Nous entendons par là les dimensions qui sont dépassées

⁽¹⁾ *American Society for Testing Materials.*

respectivement par 5 % et 95 % du matériau en poids. Dans l'exemple de la *Fig. 12*, ces calibres nominaux sont 40 mm et 3 mm ; ce que nous pouvons résumer en disant que nous avons affaire à des pisolithes 40/3.

La fraction fine des latérites graveleuses possède une courbe granulométrique de sable fin et très fin limoneux et argileux. Une telle courbe ne se laisse pas définir par un ou deux paramètres. Mais les propriétés géotechniques principales d'un sol fin de ce genre se laissent fort bien résumer par les limites de plasticité et de liquidité, qui désignent les teneurs en eau à partir desquelles le sol atteint une consistance plastique, ensuite liquide, consistances mesurées par des méthodes conventionnelles internationales. Avec un peu moins de précision, le type de sol fin se laisse même décrire par un seul nombre, l'indice de plasticité, qui est la différence numérique entre les deux limites d'Atterberg mesurées (1).

Ainsi, dans l'exemple de la latérite graveleuse dont la granulométrie est représentée à la *Fig. 12*, nous pouvons résumer le type du sol fin qu'elle contient à raison de 15 % par l'indice de plasticité de la fraction fine, qui s'est trouvé être 12.

Nous possédons les analyses granulométriques et les limites d'Atterberg de 84 latérites graveleuses provenant des quatre régions latérisées du Congo. Bien qu'il existe encore sans aucun doute des milliers de gisements inexplorés, nous croyons qu'une vue d'ensemble de ces 84 analyses permet déjà des conclusions assez réalistes sur le matériau dont nous traitons.

Voici, sous forme de tableaux, la répartition des valeurs des paramètres qui résument le type de ces matériaux :

(1) Les sols purement sablonneux, ou ne contenant que très peu d'argile, n'ont pas de limite de plasticité. Dans ce cas on leur assigne conventionnellement un indice de plasticité de zéro.

Calibre supérieur mm		Teneur en pisolithes % en poids		Indice de plasticité de la fraction fine	
5 à 10	11 %	56 à 60	2 %	0 à 5	7 %
11 à 15	35 %	61 à 65	2 %	6 à 10	19 %
16 à 20	25 %	66 à 70	4 %	11 à 15	26 %
21 à 25	8 %	71 à 75	13 %	16 à 20	29 %
26 à 30	8 %	76 à 80	12 %	21 à 25	8 %
31 à 40	8 %	81 à 85	17 %	26 à 30	5 %
41 et plus	5 %	86 à 90	23 %	31 à 35	4 %
		91 à 95	20 %	36 à 40	1 %
		96 à 98	7 %	41 et plus	1 %
100 %		100 %		100 %	
Médiane : 16 mm		85 % en poids		15	
minimum : 5 mm		57 % en poids		0	
maximum : 50 mm		98 % en poids		42	

Il n'existe aucune corrélation entre les valeurs de ces paramètres entre eux (voir *Fig. 13*), ni entre ces paramètres et l'origine géographique.

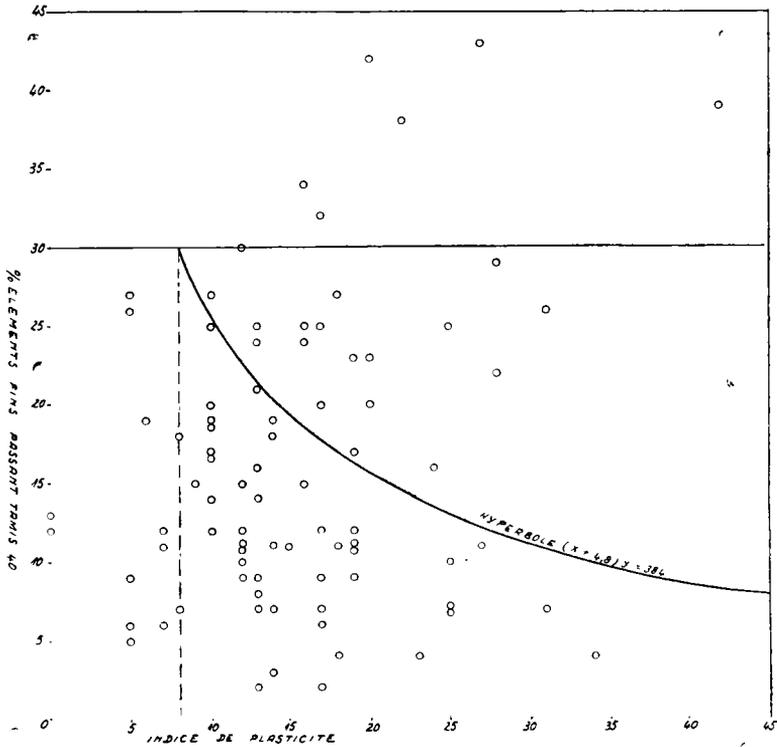


FIG. 13. — Teneur en sol fin et indice de plasticité de 84 latérites graveleuses.

On peut donc trouver à peu de distance l'une de l'autre des latérites graveleuses de types très différents.

5.2. — Classification géotechnique.

Dans la classification *U. S. Public Roads Administration* (1945) dont les critères sont la granulométrie et les limites d'Atterberg, les 84 latérites graveleuses examinées se répartissent ainsi :

Classe A1a et A1b	: 7 %
Classe A2-4 et A2-5	: 20 %
Classe A2-6	: 55 %
Classe A2-7	: 19 %

Cette répartition montre que les latérites graveleuses sont de valeur très inégale comme matériaux de couche de fondation de routes et d'aérodromes. Un petit nombre d'entre elles seulement satisfait aux critères des bétons-sols naturels, à savoir environ 25 % de sol fin passant au tamis 40 et ayant un indice de plasticité de l'ordre de 7. Par contre, la plupart sont susceptibles d'amélioration par incorporation de sable fin pour constituer des mélanges ayant une stabilité satisfaisante. Les propriétés mécaniques des latérites graveleuses, naturelles ou améliorées, dépendront cependant des caractéristiques physiques des pisolithes, dont nous allons parler maintenant.

5.3. — Nature et propriétés des pisolithes.

5.3.1. — Composition chimique des pisolithes.

Mode opératoire analytique :

Nous avons appliqué le mode opératoire préconisé par DHOORE [1] :

Fusion au pyrosulfate de potasse, solubilisation alcaline de la silice, dosage gravimétrique du quartz, de la silice combinée, des sesquioxydes totaux, titration du fer, dosage colorimétrique du titane et du manganèse et détermination de la perte de poids à 350° et à 600° C.

Analyses de pisolithes lavés et séchés à 110° C :

<i>Éch. N°</i>	<i>Carrière d'origine</i>			
9473	Coquilhatville, ancien aérodrome			
9482	Coquilhatville, route d'Eala			
4835	Tshimpi (aérodrome de Matadi)			
2206.24	Route Stanleyville-Buta, Km 270			
<i>Éch. N°</i>	9473	9482	1835	2206.24
SiO ₂ crist. (quartz)	16,5	18,6	12,5	5,8
SiO ₂ combiné	11,5	14,3	10,0	12,2
Fe ₂ O ₃	55,5	46,8	60,8	57,1
MnO ₂	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
TiO ₂	1,0	0,8	<0,1	0,6
Al ₂ O ₃	7,8	12,5	8,5	18,0
H ₂ O (— 350°C)	4,1	3,7	4,8	2,3
H ₂ O (350°/600°C)	3,8	4,1	4,0	3,7
	100,2	100,8	100,6	99,7

Composition probable :

Quartz	16	19	13	6
Argile (Kaolinite)	25	30	22	26
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	55	47	61	57
Al ₂ O ₃ libre	—	—	—	7
Eau d'hydrat. de Fe ₂ O ₃	4	4	4	4
	100	100	100	100

Ces analyses ne diffèrent pas essentiellement de celles publiées par WAEGEMANS [7].

5. 3. 2. — Densité des pisolithes.

Les pisolithes sont toujours poreux. Non seulement les pisolithes composés comportent souvent des canaux et des alvéoles d'un diamètre de l'ordre du millimètre, mais leur masse qui apparaît pleine montre au microscope de très nombreux petits canaux dont le diamètre

va du dixième de millimètre à quelques microns ; et c'est aussi le cas de la masse composant les nodules primaires.

De plus, la densité réelle dépend naturellement de la teneur en eau. En principe elle se mesure toujours sur la matière séchée à 110° C, donc après élimination de l'eau dite libre. Théoriquement il ne devrait rester dans la matière, après ce séchage, que de l'eau liée chimiquement aux oxydes et de l'eau de constitution des argiles, cette dernière étant libérée entre 350° et 600° C dans le cas de la kaolinite qui semble être l'argile prédominante.

En fait, il est très difficile de sécher jusqu'à poids constant les pisolithes, soit intacts, soit concassés, soit réduits en poudre. Après plusieurs jours de séjour à l'étuve à 110° C, la densité continue encore à augmenter. Ceci est dû à ce que l'eau non liée chimiquement, mais se trouvant dans des capillaires de très petit diamètre, ne s'élimine que très lentement et incomplètement.

En vue de l'identification des latérites graveleuses et pour les besoins du calcul des constantes géotechniques, nous procédons donc à diverses mesures de densité dont chacune a son sens particulier.

$d_1 =$ densité apparente des pisolithes.

Nous appelons ainsi la densité trouvée par pesée hydrostatique des pisolithes enrobés d'un mince film de cire dont le poids et la densité sont connus.

Cette densité est de l'ordre de 2 pour les pisolithes de 20 à 40 mm et de l'ordre de 2,5 pour les pisolithes plus petits. Le volume par lequel on divise le poids du pisolithe pour obtenir cette densité apparente, comprend les macropores de l'ordre du millimètre.

$d_2 =$ densité apparente des pisolithes concassés jusque 2 à 5 mm.

Ce concassage élimine les macropores, les cassures se produisant le long des canaux et des anfractuosités. Cette densité apparente, mesurée au picnomètre après désaé-

ration sous vide, est généralement de 3 à 3,5. La comparaison de d_2 avec d_1 permet donc de dire que le volume des macropores est en général de l'ordre de 1/3.

$d_3 =$ densité de la poudre de pisolithes passant au tamis ASTM n° 100 (149 microns).

Nous la mesurons au picnomètre, après désaération sous vide. Ce procédé donne, pour un échantillon donné, des résultats reproductibles à 0,002 près, à condition que les conditions de séchage soient les mêmes. Conventionnellement, nous séchons toujours à 110° C pendant 24 heures.

Les densités ainsi obtenues se situent pour la plupart entre 3,3 et 3,7 et elles sont en corrélation avec la teneur en Fe_2O_3 indiquée par l'analyse.

La comparaison de d_3 avec d_2 montre que les micropores représentent en général quelques % du volume.

La détermination de d_3 sur divers échantillons tirés d'un même gisement fait apparaître des fluctuations importantes, de l'ordre de 0,1 à 0,2, qui montrent que la matière composant les pisolithes n'est pas homogène, ce que l'examen des coupes montre d'ailleurs abondamment.

La densité n'est donc pas une constante physique d'une latérite donnée et il convient de retenir seulement sa valeur moyenne pour un gisement donné, et l'ordre de grandeur de la porosité qu'elle permet de calculer.

Avec cette restriction, voici une série de déterminations de densités de pisolithes.

Densité de pisolithes latéritiques sèches 24 h à 110° C

- $d_1 =$ densité apparente des pisolithes entiers ;
 $d_2 =$ densité apparente des pisolithes concassés 2-5 mm ;
 $d_3 =$ densité de la poudre de pisolithes passant tamis 100 ;
 $n_0 =$ porosité totale = $(d_3 - d_1) / d_3$;
 $n_1 =$ micropores = $(d_3 - d_2) / d_3$;
 $n_2 =$ macropores = $(d_2 - d_1) / d_3 = n_0 - n_1$.

Les quantités derrière le signe \pm désignent l'écart-type.

Éch. No	d_1	d_2	d_3	n_0	n_1	n_2
9470	2,38 \pm 0,06	3,46	3,51	32,2 %	1,4 %	20,8 %
9472	2,05 \pm 0,01	3,39	3,47	30,9 %	2,3 %	38,6 %
9473	2,01 \pm 0,11	3,22	3,49	42,4 %	7,7 %	34,7 %
9475	1,79 \pm 0,07	3,46	3,53	49,3 %	2,0 %	47,3 %
9476	2,18 \pm 0,17	3,46	3,53	38,2 %	2,0 %	36,2 %
9477	2,15 \pm 0,07	3,36	3,45	37,7 %	2,6 %	35,1 %
9479	1,83 \pm 0,07	3,35	3,46	47,0 %	3,2 %	43,8 %
9480	2,09 \pm 0,18	3,27	3,44	39,2 %	4,9 %	34,3 %
9482	2,14 \pm 0,16	3,33	3,40	37,0 %	2,0 %	35,0 %
9483	2,73 \pm 0,23	3,45	3,57	23,5 %	3,3 %	20,2 %
2206.24	3,07 \pm 0,08	3,18	3,67	16,4 %	13,4 %	3,0 %
4835	2,68 \pm 0,15	3,22	3,49	23,2 %	7,7 %	15,5 %

Tous ces échantillons se composent principalement de pisolithes composés et de débris de cuirasse, sauf le n° 2205.24 qui représente des nodules primaires.

Influence des conditions de séchage: La densité des poudres de pisolithes augmente en moyenne de 0,04 par 24 h de séchage pendant les 3 premiers jours.

5. 3. 3. — Dureté des pisolithes.

A l'échelle de MOHR, la dureté superficielle des pisolithes est variable, mais toujours comprise entre 3 et 5.

Pour juger de la résistance mécanique des pisolithes, nous les soumettons à un essai de compression statique dans les conditions suivantes :

3 kg de pisolithes passant au tamis ASTM 3/4" (19 mm) et refusés au tamis ASTM n° 4 (4,76 mm), lavés et séchés, sont placés dans un pot de presse de 170 mm de diamètre et 165 mm de profondeur, et chargés, sous une presse hydraulique, par un piston de 169 mm de diamètre. La charge est augmentée progressivement à raison de 10 t par minute jusqu'à 40 tonnes, et maintenue à cette valeur pendant 1 minute. Le contenu du pot de presse est tamisé sur les tamis ASTM 3/8", 4, 8, 16, 30, 50 et 100. On calcule le module de finesse du matériau

écrasé et on le compare à celui du matériau avant l'essai. La diminution relative de ce module est appelé indice d'écrasement du matériau.

Une quarantaine d'échantillons de pisolithes de provenance diverse nous ont donné des indices d'écrasement allant de 0,26 à 0,43, répartis ainsi :

Indice 0,26 à 0,30	15 %	des échantillons
» 0,31 à 0,35	25 %	» »
» 0,36 à 0,40	25 %	» »
» 0,41 à 0,43	35 %	» »

Pour fixer les idées, voici les indices d'écrasement habituels de quelques roches communes au Congo, déterminés par le même essai :

Grès dur	0,18 à 0,22
Calcaires noirs	0,20 à 0,25
Grès tendres	0,22 à 0,37
Granit	0,20 à 0,25
Quartzite	0,20 à 0,25
Basalte	0,12 à 0,15
Gneiss	0,25 à 0,34

Les pisolithes présentent donc un matériau beaucoup moins dur que celui des graviers et cailloux ordinaires.

5. 3. 4. — Résistance à l'abrasion.

Nous la mesurons au moyen de l'essai Los Angeles (ASTM C — 131). On prépare un échantillon de granulométrie soigneusement étalée :

1250 g d'éléments passant au tamis	1 1/2"	et refusés au tamis	1"
1250 g	»	»	3/4"
1250 g	»	»	1/2"
1250 g	»	»	3/8"

Cet échantillon est enfermé dans un cylindre rotatif avec 12 sphères d'acier pesant ensemble 5 kg. On fait effectuer à la machine 500 tours à raison d'environ

30 tr/min. Ensuite l'échantillon est tamisé au tamis ASTM n° 12 (1,68 mm). L'indice d'abrasion est le % en poids de l'échantillon passant au tamis 12.

Pour les pisolithes des latérites graveleuses, le résultat de l'essai Los Angeles se chiffre le plus souvent entre 45 % et 50 % de passant au tamis 12, bien que l'indice d'abrasion atteigne parfois 60 %.

Ici encore, les pisolithes se comportent comme des matériaux friables. Les matériaux routiers classiques ont des indices d'abrasion de 20 à 35 %. Cependant les pisolithes ne sont pas très inférieurs à bon nombre de roches dures auxquelles leur structure feuilletée ou la grosseur de leur grain confère des indices d'abrasion élevés : nous avons relevé des indices d'abrasion supérieurs à 50 % sur des quartzites, des amphibolites, des grès tendres, et même supérieurs à 60 % sur certains gneiss.

5.4.— Les latérites graveleuses comme matériaux routiers.

5.4.1. — Comportement au compactage.

A l'essai « Proctor modifié » ⁽¹⁾, les latérites graveleuses atteindront un poids volumétrique sec maximum qui dépendra de deux choses : de la densité apparente des pisolithes d'une part, et de la teneur en pisolithes d'autre part.

Les nombreuses latérites graveleuses naturelles qui contiennent 85 % ou plus de pisolithes ne permettent pas d'obtenir un bon serrage : elles ne contiennent pas assez de sol fin pour remplir les interstices entre les pisolithes. Avec 25 % de sol fin on obtient d'excellents serrages et des poids volumétriques secs du même ordre de grandeur que la densité apparente des pisolithes, c'est-à-dire de l'ordre de 2,0 ou même au delà.

⁽¹⁾ Cet essai géotechnique détermine, en fonction de la teneur en eau, la compacité (poids volumétrique sec) qu'un sol acquiert sous un effort de compaction standard.

Les courbes « Proctor modifié » des latérites graveleuses ont une allure typique : le poids volumétrique sec augmente d'abord avec la teneur en eau, mais le maximum est peu prononcé et la courbe montre un palier pour les teneurs en eau croissantes, au lieu de s'infléchir vers le bas comme c'est le cas avec les sols ordinaires. Cela est dû à ce que la quantité d'eau en excès de celle nécessaire à la compaction se loge dans les vides intérieurs des pisolithes et n'augmente donc pas le volume des interstices (*Fig. 14*).

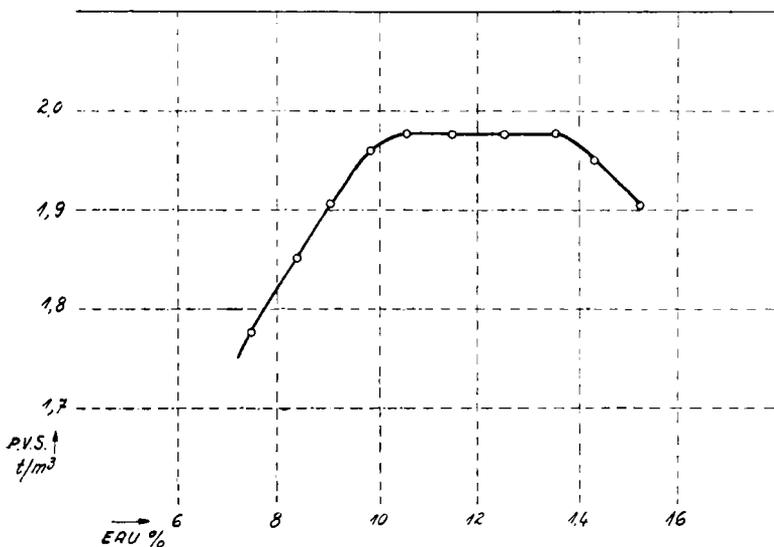


FIG. 14. — Courbe « Proctor modifié » d'une latérite graveleuse.

Il n'y a donc pas de teneur en eau optimum pour le compactage, mais seulement une valeur minimum qui est généralement de l'ordre de 8 %.

La friabilité des pisolithes, qui se brisent sous les coups de dame, oblige à prendre la précaution d'effectuer chaque point de la courbe Proctor sur du matériau vierge. Malgré cela, la granulométrie est inévitablement modifiée par l'essai : après une compaction en moule P. M. en 3 couches, à 55 coups de dame par couche, on peut

constater que le refus au tamis 40 a diminué de 5 % environ.

5. 4. 2. — Portance CBR.

L'indice CBR⁽¹⁾ des latérites graveleuses compactées en moule P. M., mesuré après 4 jours d'imbibition (mode opératoire *U. S. Army Corps of Engineers*) dépend d'une part de la compacité atteinte et notamment de la teneur en pisolithes, et d'autre part de la sensibilité à l'eau, c'est-à-dire de l'indice de plasticité, de la fraction fine.

La grande diversité des valeurs de ces paramètres dans les latérites graveleuses naturelles fait que celles-ci sont, à l'état naturel, des matériaux routiers tantôt excellents, tantôt exécrables, sans que leur aspect ne laisse deviner leur comportement. Les latérites graveleuses contenant environ 75 % de pisolithes, et 25 % d'un sol fin modérément argileux, ayant un indice de plasticité de l'ordre de 7, se comportent comme de véritables bétons-sols et fournissent d'excellentes couches de roulement pour les routes. Leur indice CBR atteint facilement 80 ou davantage. D'autres latérites graveleuses, dont le sol fin est trop argileux, et dont la teneur en pisolithes est trop grande ou trop faible, ne se serrent pas sous la circulation, libèrent à chaque passage de véhicule des pisolithes qu'on retrouve sur les accotements, donnent naissance à des nuages de poussière rouge par temps sec, et deviennent boueuses et glissantes par temps de pluie ; leur indice CBR peut n'atteindre que 2 ou 3 à l'état saturé.

Ceci montre la nécessité des essais géotechniques qui permettent de mesurer les caractéristiques des latérites graveleuses, de prédire leur comportement, et de choisir pour l'emploi celles qui s'y prêtent le mieux.

¹⁾ *California Bearing Ratio* (Indice portant californien).

5. 4. 3. — Amélioration des latérites graveleuses.

Si les latérites graveleuses naturelles ne sont pas toutes, loin de là, de bons matériaux routiers, par contre la plupart d'entre elles sont susceptibles d'amélioration par un moyen très simple, à savoir l'incorporation d'une petite proportion de sable fin.

Nous avons vu que, dans l'ensemble, la teneur moyenne en pisolithes est de l'ordre de 85 %, et que l'indice de plasticité est le plus souvent de l'ordre de 15.

Une incorporation de sable fin ramènera donc d'une part la teneur en pisolithes vers un taux plus favorable à la compacité du mélange, et réduira en même temps l'indice de plasticité à un chiffre plus approprié.

La réussite de l'opération est subordonnée à la connaissance exacte de la quantité de sable à ajouter, et celle-ci peut être estimée d'avance à partir des caractéristiques de la latérite graveleuse et du sable dont on dispose.

A titre d'exemple, voici les caractéristiques d'un sable de rivière et d'un sable de marais typiques de la Province de l'Équateur :

Granulométrie, refus cumulés en %

Tamis ASTM	Ouverture mm	Sable de rivière 5312	Sable de marais 7634
10	2,0	0	0
20	0,84	4	3
40	0,42	25	14
60	0,25	53	27
100	0,149	75	49
200	0,074	93	73
Sédimentom.	0,05	96	88
	0,02	98	95
	0,01	99	98
Limite de liquidité		inexistante	inexistante
Limite de plasticité		inexistante	inexistante
Indice de plasticité		0	0

On voit que ces sables se composent essentiellement de particules de l'ordre du dixième de millimètre qui font précisément défaut dans les latérites graveleuses.

Le sable de marais est plus intéressant comme amaigrissant que le sable de rivière, pour la double raison que les gros éléments sont déjà surabondants dans les latérites graveleuses, et que seule la fraction sableuse passant au tamis 40 contribue à l'amaigrissement. Cependant l'un et l'autre de ces sables sont utilisables.

Le but de l'amaigrissement des latérites par le sable est de réduire l'indice de plasticité de la fraction fine (passant tamis 40) du mélange à une valeur modérée, disons 8 ⁽¹⁾.

Sachant que l'indice de plasticité d'un mélange est en première approximation une propriété additive des composants, on peut calculer a priori le (nombre s) de parties en poids de sable, contenant n % d'éléments passant au tamis 40, qu'il faudra ajouter à 100 parties en poids d'une latérite graveleuse contenant Y % de sol fin passant au tamis 40, l'indice de plasticité de ce sol fin étant X , celui du sable étant zéro, pour que l'indice de plasticité du mélange soit 8. On trouve :

$$\frac{YX}{Y + \frac{sn}{100}} = 8 \text{ d'où } s = \frac{100}{n} \left(\frac{X}{8} - 1 \right) Y$$

tandis que la teneur du mélange en éléments fins sera :

$$f = \frac{Y + \frac{sn}{100}}{100 + s}$$

(1) Un indice de plasticité initial de 8 permettra l'asphaltage ou le goudronnage ultérieur. Si on ne désire pas ménager cette éventualité d'amélioration, on pourra admettre un indice de plasticité initial de 15 sans trop d'inconvénients ; cette valeur n'est pas dépassée par environ 50 % des latérites graveleuses naturelles.

A titre d'exemple, en attribuant à n une valeur de 80 % intermédiaire entre celles trouvées pour le sable de rivière (75 %) et pour le sable de marais (86 %), l'amaigrissement d'une latérite graveleuse contenant $Y = 10$ % de sol fin ayant un indice de plasticité de $X = 25$, se calculerait ainsi :

$$s = 1,25 \left(\frac{25}{8} - 1 \right) 10 = 26,56$$

$$f = \frac{10 + (26,56 \times 0,80)}{100 + 26,56} = 24,8 \%$$

Il faudrait donc ajouter 26,5 kg de sable par 100 kg de latérite graveleuse pour obtenir un mélange contenant 24,8 % d'éléments fins dont l'indice de plasticité serait 8. Un tel mélange aura les propriétés d'un véritable béton-sol ; compacté avec une teneur en eau de l'ordre de 8 %, il atteindra sur le chantier un poids volumétrique sec de l'ordre de 2,10 t/m³ et un indice CBR, après 4 jours d'immersion, de 80 % ou davantage. Il sera parfaitement cohérent par temps sec et ne se ramollira pas indûment par temps de pluie ; alors que la latérite non améliorée aurait fourni une couche de roulement mal serrée et poussiéreuse par temps sec et très boueuse, même glissante, par temps humide.

Mais supposons maintenant que la latérite graveleuse dont nous disposons contienne $Y = 30$ % de sol fin ayant un indice de plasticité de $X = 32$. Dans ce cas, le calcul de l'amaigrissement donne :

$$s = 112,5 \quad \text{et} \quad f = 56,5 \%$$

Bien que l'indice de plasticité du mélange serait encore 8, le résultat ne serait pas satisfaisant, parce que le mélange serait trop pauvre en gros éléments ; sa stabilité et sa portance seraient faibles. De plus, le fait de mettre en œuvre une quantité de sable supérieure à celle de latérite serait bien souvent soit trop onéreux,

soit impraticable, les gisements de sable étant souvent assez limités dans les régions dont nous parlons.

Nous devons donc constater que si certaines latérites graveleuses se prêtent admirablement à l'amélioration au moyen de sable, d'autres ne s'y prêtent pas du tout ; et il est intéressant de distinguer les unes des autres.

D'une façon générale, les mélanges pour être stables ne devront pas contenir moins que 30 % de fines. D'où la condition :

$$f = \frac{Y + 0,8 s}{100 + s} \leq 0,30$$

$$\text{d'où } s \leq 60 - 2Y. \quad (1)$$

D'autre part, nous avons :

$$\text{indice de plasticité} = \frac{X Y}{Y + 0,8 s} = 8$$

$$\text{d'où } s = \left(\frac{X}{6,4} - 1,25 \right) Y. \quad (2)$$

Substituant (2) dans (1), nous obtenons :

$$(X + 4,8) Y \leq 384.$$

Dans le diagramme *Fig. 12* [13], nous avons reporté les points figuratifs (X, Y) de 84 latérites graveleuses que nous avons examinées, et nous y avons dessiné l'hyperbole $(X + 4,8) Y = 384$ qui limite le domaine des latérites graveleuses stabilisables par apport de sable.

Nous constatons que les points figuratifs de 24 latérites graveleuses, soit 28 % du nombre total, se situent au-delà de l'hyperbole-limite.

D'autre part, en deçà de l'abscisse $X = 8$ nous comptons 12 latérites = 14 % du total qui n'ont pas besoin d'être amaigries, bien que la plupart d'elles gagneraient en stabilité par un léger apport de sable fin, qui peut être légèrement argileux.

Toutes les autres latérites, qui sont en majorité (58 %), peuvent être améliorées économiquement par un apport raisonnable de sable fin de rivière ou de marais.

Il va de soi que nous ne visons pas ici à prononcer des règles absolues, et qu'une latérite dont le point figuratif se trouve un peu au-delà de l'hyperbole-limite peut encore être très sensiblement améliorée par un apport de sable. En fait, les latérites incorrigibles sont très rares.

De toute façon, si l'on a affaire à une latérite très grasse, il vaut mieux limiter l'amaigrissement à un taux qui respecte la teneur minimum en gros éléments, plutôt que de vouloir atteindre un petit indice de plasticité.

On a remarqué en effet que des latérites graveleuses grasses, non améliorées, épandues telles quelles sur des routes, ont donné après quelque temps des résultats beaucoup meilleurs que ne le laissent espérer leurs caractéristiques initiales. Ceci est dû à l'élimination d'une partie de l'argile par les eaux de ruissellement, et à la formation d'une fraction sableuse non plastique par l'écrasement des pisolithes sous les roues de véhicules.

La possibilité de l'amélioration des latérites graveleuses par incorporation de sable est évidemment liée à l'existence de gisements de sable dans la même région. C'est le cas pour une grande partie de la Province de l'Équateur. Mais dans l'est de la Province orientale, dans le Haut-Katanga, et sur les plateaux du Ruanda-Urundi, les sables francs sont rares. On trouve parfois des matériaux pouvant remplacer le sable. Ainsi nous avons préconisé, avec de bons résultats, l'emploi de poudre de quartz, résidu du traitement industriel d'une quartzite aurifère filonienne d'une mine du groupe de Kilo-Moto, pour l'amaigrissement d'un gravier argileux lors de la construction du nouvel aéroport de Bunia.

6. — LES LATÉRITES ROCHEUSES

6.1. — Structure.

Ces pseudo-roches, nous l'avons déjà dit, sont toujours très poreuses.

Voici un aperçu du volume des vides, obtenu par comparaison du poids volumétrique de cubes de 7 cm d'arête découpés dans la matière, avec la densité réelle de cette matière réduite en poudre, dans les deux cas après 24 heures de séchage à 110° C.

N°	Poids volumétrique des cubes t/m ³	Densité réelle de la poudre	Volume des vides %
9471	1,68 ± 0,08	3,41	50,7 ± 3 %
9474	1,87 ± 0,10	3,46	46,0 ± 2 %
9478	1,77 ± 0,07	3,48	49,1 ± 2 %
9481	1,59 ± 0,15	3,50	54,6 ± 5 %
9655	1,85 ± 0,07	3,15	41,3 ± 2 %

Les quatre premiers échantillons sont des latérites rocheuses de la région de Coquilhatville, composées de pisolithes agglomérés par du ciment ferrugineux. Le dernier échantillon (N° 9655), originaire de Tumbwe (Katanga), contient aussi des pisolithes, mais à côté d'eux, des fragments anguleux de quartz et de feldspath, le tout aggloméré par un ciment ferrugineux : cette matière a donc l'allure d'une brèche.

Les quantités indiquées derrière le signe ± sont les écarts-types (écarts quadratiques moyens). Elles montrent combien la répartition des vides est irrégulière dans un même échantillon, et l'impossibilité de caractériser ces matériaux par des constantes numériques avec un degré de précision comparable à celui qu'on obtient pour les matériaux rocheux véritables.

6.2. — **Composition.**

Voici quelques analyses, obtenues par le même mode opératoire que celui que nous avons mis en œuvre pour les pisolithes :

<i>Éch. N°</i>	<i>Carrière d'origine</i>				
9474	Coquilhatville, ancien aérodrome				
9481	Coquilhatville, route d'Eala				
9655	Tumbwe (Katanga)				
9655-b	idem, mais échantillon riche en pierres et pauvre en pisolithes				
9655-i	idem, poudre jaune de matières interstitielles libérées lors du concassage du n° 9655.				
<i>Éch. N°</i>	9474	9481	9655	9655-b	9655-i
SiO ₂ crist. (quartz)	5,8	6,3	24,4	46,8	59,6
SiO ₂ combiné	15,4	12,0	13,0	10,8	9,5
Fe ₂ O ₃	56,2	61,2	34,0	25,6	14,6
MnO ₂	—	—	8,1	1,2	1,7
TiO ₂	1,2	0,6	1,4	1,2	0,9
Al ₂ O ₃	13,1	11,4	10,1	7,7	8,7
H ₂ O (— 350°C)	4,2	4,9	6,4	4,8	2,7
H ₂ O (350°/600°C)	4,3	3,9	3,1	2,2	2,9
	100,2	100,3	100,5	100,3	100,6

Il est intéressant de comparer maintenant entre elles les analyses de latérites rocheuses et de pisolithes de latérites graveleuses issues de la même carrière. C'est le cas des numéros 9473 et 9474 d'une part, et des numéros 9482 et 9481 d'autre part ⁽¹⁾.

Le premier couple indique une teneur en Fe₂O₃ sensiblement égale dans les deux matériaux, mais les pisolithes contiennent plus de quartz que la latérite rocheuse, tandis que cette dernière contient plus d'argile.

Avec le deuxième couple, nous trouvons également plus de quartz dans les pisolithes que dans la cuirasse, mais cette dernière est beaucoup plus riche en fer.

(1) Analyses des pisolithes 9473 et 9482 : voir page 20.

La comparaison des analyses des numéros 9655 et 9655-b montre que la teneur élevée du numéro 9655 en MnO_2 est contenue dans les pisolithes et non pas dans le ciment ferrugineux de la brèche.

Enfin, l'analyse de la matière interstitielle 9655-i qui remplit partiellement les canaux de la latérite rocheuse 9655, montre que cette matière interstitielle est essentiellement un sable argileux. Signalons que cette matière ne représente que 5 % environ, en poids, de la latérite rocheuse.

Nos deux constatations d'une teneur en quartz plus élevée dans les pisolithes que dans les latérites rocheuses correspondantes ne permettent évidemment pas de suggérer qu'il s'agit là d'un phénomène généralisé.

A part cela, la comparaison de nos analyses de latérites rocheuses composées quasi-exclusivement de pisolithes agglomérés (excluant donc le n° 9655) et de pisolithes de latérites graveleuses, ne montre aucune différence marquante ; il s'agit bien du même genre de matières. Nos résultats sont très comparables à ceux cités par WÆGEMANS [7].

Nous pouvons donc dire que l'analyse chimique d'un fragment d'origine inconnue ne nous apprendra pas si nous avons affaire à un pisolithe de latérite graveleuse ou à un fragment de latérite rocheuse.

La différence essentielle entre les latérites rocheuses et les latérites graveleuses se résume donc par la présence, dans les latérites graveleuses, d'un sol fin en quantité importante et argileux le plus souvent, alors que les latérites rocheuses n'en contiennent pas ou peu. En principe, les fractions fines formées par l'écrasement, soit de pisolithes, soit de latérite rocheuse, sont dépourvues de plasticité. Mais cet énoncé ne signifie pas qu'il ne faille pas le vérifier, car il y a des exceptions.

6.3. — Propriétés mécaniques.

Des essais de compression, jusqu'à la rupture, d'éprouvettes cubiques de 7 cm d'arête découpées dans des moellons de latérites rocheuses, permettent de situer l'ordre de grandeur des taux de charge que de tels moellons, utilisés en maçonnerie par exemple, peuvent supporter.

Comme on pouvait s'y attendre d'après ce que nous savons déjà de la porosité importante et irrégulière de ces matériaux, les résultats sont très variables.

Des séries de cubes de quatre latérites rocheuses de la région de Coquilhatville ont donné entre 30 et 140 kg/cm², avec une moyenne de 66 kg/cm².

Une série de 9 cubes de la latérite rocheuse 9655 de Tumbwe (Katanga) a donné entre 51 et 116 kg/cm², avec une moyenne de 79 kg/cm².

D'autres latérites rocheuses nous ont donné aussi, en général, des taux de rupture du même ordre de grandeur. La plus forte résistance que nous ayons jamais enregistrée a été 280 kg/cm², sur une latérite rocheuse du Katanga.

Comme matériau de construction, la latérite rocheuse en moellon a donc une résistance à la compression comparable à celle de la brique de qualité moyenne.

6.4. — Propriétés des latérites rocheuses concassées.

Les moellons de latérites rocheuses, obtenus par l'exploitation des carrières, se laissent facilement concasser dans des concasseurs à mâchoires. Comme le matériau est relativement tendre, on obtient toujours des concassés tout-venant d'une granulométrie très étalée et contenant beaucoup d'éléments fins.

Un concassé tout-venant de latérite rocheuse ressemble par la couleur et l'aspect à une latérite graveleuse, mais du point de vue géotechnique, c'est un tout autre matériau. La différence essentielle est que les éléments fins du concassé sont généralement dépourvus de plasticité, tandis que les éléments fins des latérites graveleuses sont argileux dans la grande majorité des cas.

L'absence de plasticité des concassés tout-venant de latérite rocheuse a comme corollaire une absence de cohésion capillaire. Ces tout-venants restent donc meubles même lorsqu'ils sont gorgés d'eau. Mais on peut leur conférer une importante cohésion d'enchevêtrement (*haakweerstand*) en les cylindrant.

Ce sont des matériaux de choix pour des couches de fondation de routes et d'aérodromes. Insensibles à l'eau, non gonflants, non plastiques, ils ont à l'état compacté une portance considérable (un indice CBR de l'ordre de 80 ou plus) et en outre ils sont perméables et drainants, de sorte qu'un tapis asphaltique posé sur une telle fondation ne risquera jamais de baigner dans l'eau avec le danger de désenrobage que cela comporte.

Lors du concassage, la latérite rocheuse se fracture évidemment suivant des plans de moindre résistance imposés par la présence des canaux et des alvéoles. Il en résulte que ces macropores cessent, en grande partie, d'exister dans les éléments du concassé.

Voici les poids volumétriques, obtenus par pesée hydrostatique d'éléments calibrés 20/5 mm enrobés de paraffine, provenant du concassage de 4 latérites rocheuses déjà citées au début de ce chapitre.

N°	Poids volumétrique des agrégats 20/5	Densité réelle de la poudre	Volume des vides %
9471	1,89 ± 0.12	3,41	45 ± 4
9474	2,13 ± 0.16	3,56	38 ± 4
9478	2,05 ± 0.17	3,48	41 ± 5
9481	1,79 ± 0.08	3,50	49 ± 3

Le volume des vides des agrégats obtenus par concassage est donc inférieur de 6 à 8 % à celui des latérites rocheuses non concassées.

6. 4. 1. — **Essais de compression statique de concassés calibrés.**

Afin de prévoir le comportement des concassés de latérite rocheuse au cylindrage, nous appliquons aux concassés calibrés 3/4" — N° 4 l'essai de compression statique déjà décrit au chapitre relatif à la dureté des pisolithes.

Cependant nous nuançons cet essai en soumettant des échantillons parallèles à des charges maximum échelonnées entre 0 et 40 t. De plus, nous mesurons le poids volumétrique de l'échantillon avant et après la compression.

Voici quelques résultats :

Échantillons Charge max. tonnes	9471		9474		9478		9481	
	Poids volum. t/m ³	Indice d'écrasement						
0	1,16	—	1,18	—	1,18	—	1,05	—
5	1,37	0,11	1,28	0,07	1,33	0,07	1,18	0,07
10	1,51	0,17	1,41	0,15	1,48	0,14	1,29	0,13
20	1,72	0,26	1,61	0,24	1,62	0,24	1,51	0,22
40	1,88	0,35	1,83	0,35	1,85	0,35	1,67	0,36

On voit que, si les poids volumétriques restent liés à la porosité initiale du matériau, l'indice d'écrasement ne dépend pratiquement que de la charge.

Les quatre échantillons mentionnés sont cependant d'origine voisine ⁽¹⁾ et leur indice d'écrasement de 0,35 est un des plus faibles, donc des meilleurs, que nous ayons relevés sur les latérites rocheuses du Congo. L'échantillon 9655 de Tumbwe (Katanga) a un indice

(1) Région de Coquilhatville.

d'écrasement de 0,41. Sur d'autres échantillons de latérites rocheuses, tant de l'Équateur que du Katanga, nous avons dans 50 % des cas environ des indices d'écrasement de 0,35 à 0,40 et pour les autres, 0,40 à 0,35.

Les coefficients d'abrasion Los Angeles sont toujours élevés. Les valeurs extrêmes que nous avons relevées sont 0,49 et 0,72. Il en résulte que l'emploi des concassés de latérite rocheuse n'est pas indiqué pour des couches de roulement.

On a utilisé des concassés de latérite rocheuse, comme succédané de pierres, dans toutes sortes d'applications, même comme squelette de béton armé. Cela n'est évidemment pas à conseiller, étant donné la faible résistance à la compression qui empêchera toujours d'obtenir un béton de bonne qualité. Mais ces concassés rendent de bons services comme agrégats d'agglomérés au ciment, en blocs creux par exemple, auxquels on ne demande pas une résistance supérieure à celle de la brique ordinaire. De tels blocs atteignent facilement une résistance à la compression de 80 kg par cm^2 de surface effective.

6. 4. 2. — Portance des concassés compactés.

Nous avons adopté, pour caractériser la portance des concassés compactés de latérites de cuirasse, un mode opératoire un peu spécial, inspiré à la fois des essais géotechniques standardisés et de ceux des matériaux. Nous comprimons dans un moule CBR, par une compression statique dont nous faisons varier le taux, en trois couches superposées successivement, les concassés calibrés, lavés et séchés, ou bien les tout-venants de concassage. Nous évitons ainsi le concassage brutal des fragments que ne manquerait de produire le compactage à coups de dame et nous croyons que la compression statique reproduit mieux le tassement produit par le passage d'un rouleau compresseur. Les moules sont immergés

pendant 4 jours dans l'eau et l'échantillon subit alors l'essai CBR classique (*U. S. Army*).

Échantillon	Cuirasse de pisolithes soudés de Coquilhatville	Brèche latéritique de Tumbwe	
Poids volumétrique sec initial du concassé	1,04 t/m ³	1,07 t/m ³	
	<i>P.V.S. final C.B.R.</i>		<i>P.V.S. final C.B.R.</i>
Après compression statique de : 22 kg/cm ²	1,29	20	1,46
44 »	1,48	48	1,59
66 »	1,60	80	1,67
88 »	1,67	100	1,73
110 »	1,76	166	1,78

Avec des tout-venants de concassage, contenant les fines, on obtient, dans les mêmes conditions, des P.V.S. plus élevés, mais des indices C.B.R. du même ordre de grandeur.

6. 4. 3. — Perméabilité des concassés compactés.

Des essais de perméabilité dans des perméamètres à compactage direct (modèle moule C.B.R.) nous ont donné, pour des échantillons préparés de la façon décrite ci-dessus, des perméabilités de l'ordre de 10⁻⁴ cm² s⁻¹ (cm eau)⁻¹, et ce aussi bien pour les tout-venants que pour les concassés calibrés.

7. — L'APPELLATION « LIMONITE »

Les latérites graveleuses et rocheuses sont souvent désignées, au Congo belge, sous le nom de « limonite ».

Or, la *limonite* est un minéral bien défini, que BUTTGENBACH [6] décrit ainsi :

« Mélange de lépidocrocite, goéthite et de gels d'hydroxydes de fer. Se trouve sous forme de fibres constituant des masses d'une grande variété d'aspect. Dureté 5 à 5,5. Densité 3,6 à 4. Les fibres ont un éclat soyeux et métalloïde. Les caractères chimiques sont ceux de la goéthite HFeO₂ (soluble dans l'acide chlorhydrique) ».

Cette description ne s'applique aucunement aux latérites graveleuses et rocheuses courantes, que nous venons de décrire.

L'appellation « limonite » de ces matériaux est donc complètement erronée et il est à souhaiter qu'elle fera place à l'appellation de *latérite*, suivie de l'adjectif « graveleuse » ou « rocheuse » dénotant la structure du matériau.

L'emploi abusif du mot « limonite » va parfois encore plus loin, jusqu'à désigner n'importe quel matériau graveleux de couleur rougeâtre. Dans plusieurs endroits où il n'existe pas de latérites, nous avons constaté que de nombreuses personnes appellent « limonite » des graviers roulés alluvionnaires de quartz blanc enrobés de sol fin argileux rouge, qui abondent dans les terrasses des rivières et des lacs.

Les propriétés des latérites graveleuses et rocheuses sont suffisamment caractéristiques pour que ces matériaux ne soient pas confondus avec d'autres et pour qu'ils soient désignés par leur nom propre.

8. — CONCLUSIONS

Les latérites graveleuses et rocheuses, classifiées et sélectionnées par des essais géotechniques et mécaniques, constituent dans bien des cas des matériaux locaux extrêmement intéressants pour les ouvrages de génie civil.

Les latérites rocheuses concassées fournissent notamment d'excellentes couches de fondation. Leur emploi et les spécifications exigées figurent en ce moment aux cahiers des charges de deux chantiers importants en cours d'exécution : la nouvelle route Élisabethville-Jadotville et le nouvel aérodrome de Coquilhatville.

Les latérites graveleuses ont été employées de tout temps en couche de roulement de routes, mais nous nous

orientons vers l'emploi de latérites graveleuses sélectionnées par des essais géotechniques et éventuellement améliorées là où c'est possible.

Dans plusieurs centres, des essais d'asphaltage de couches de roulement en latérite graveleuse viennent d'être faits. Ces essais sont trop récents pour permettre des conclusions, bien que des résultats très prometteurs aient été obtenus.

Léopoldville, le 12 août 1956.

Laboratoire des Travaux publics
du Gouvernement général.

BIBLIOGRAPHIE

1. DHOORE, J., De Accumulatie van vrije sesquioxyden in tropische gronden (*Comm. Inst. Sup. Agr.*, Gand, XIX, 1954).
2. MOHR, E. C. J., et VAN BAREN, F. A., Tropical Soils (W. Van Hoeve, La Haye, 1954).
3. WAEGEMANS, G., Introduction à l'étude de la latérisation et des latérites du Centre africain (*Bull. Agric. du C. b.*, XLII, 1, mars 1951, pp. 13-56).
4. WAEGEMANS, G., Latérites et bauxites (*Bull. agric. du C. b.*, XLII, 3, septembre 1951, pp. 567-574).
5. VANDERSTAPPEN, R., et CORNIL, J., Note sur les « bauxites » du Congo septentrional (*Bull. Ac. Roy. Sc. Col.*, N. S. I, 1955, 4, pp. 690-709).
6. REMILLON, A., Stabilisation of Laterite Soils (Highway Research Board, *Bulletin* 108, 1955, Washington, D. C.).
7. WAEGEMANS, G., Les latérites de Gimbi (I.N.É.A.C., *Série scientifique* n° 60, 1954).
8. BUTTGENBACH, H., Les Minéraux et les Roches (Liège, Vaillant-Carmanne, 8^e éd., 1954).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	3
SAMENVATTING	3
1. — Introduction	4
2. — Genèse des matériaux latéritiques	4
3. — Les principaux types de latérites congolaises	7
3.1. — Les latérites graveleuses	7
3.2. — Les latérites rocheuses	8
4. — Les gisements latéritiques	9
4.1. — Aspect	9
4.2. — Répartition géographique	10
4.3. — Abondance	13
5. — Les latérites graveleuses	14
5.1. — Propriétés géotechniques	14
5.2. — Classification géotechnique	19
5.3. — Nature et propriétés des pisolithes	19
5.3.1. — Composition chimique des pisolithes	19
5.3.2. — Densité des pisolithes	20
5.3.3. — Dureté des pisolithes	23
5.3.4. — Résistance à l'abrasion	24
5.4. — Les latérites graveleuses comme matériaux routiers	25
5.4.1. — Comportement au compactage	25
5.4.2. — Portance CBR.	27
5.4.3. — Amélioration des latérites graveleuses	28
6. — Les latérites rocheuses	33
6.1. — Structure	33
6.2. — Composition	34
6.3. — Propriétés mécaniques	36
6.4. — Propriétés des latérites rocheuses concassées	36

6.4.1. — Essais de compression statique de concassés calibrés	38
6.4.2. — Portance des concassés compactés	39
6.4.3. — Perméabilité des concassés compactés	40
7. — L'appellation « limonite »	40
8. — Conclusions	41
BIBLIOGRAPHIE	43

