

ETUDE DES TRANSFORMATIONS STRUCTURALES ET MINÉRALOGIQUES PROVOQUÉES PAR COMPACTAGE AVEC OU SANS ADDITION DE CHAUX A DES ARGILES LATÉRIQUES BRÉSILIENNES.

STUDY OF STRUCTURAL AND MINERALOGICAL TRANSFORMATIONS CAUSED BY COMPACTION WITH OR WITHOUT LIME ADDITION TO LATERITIC CLAYS FROM BRAZIL.

ROSSI P.L.⁽¹⁾, ILDEFONSE P.⁽¹⁾, DE NOBREGA M.T.⁽²⁾ et CHAUVEL A.⁽³⁾

Résumé

Dans le but d'une utilisation en technique routière, des argiles latéritiques brésiliennes à kaolinite et gibbsite ont été expérimentalement compactées avec ou sans addition de chaux. Les transformations structurales et minéralogiques du matériau avant et après compactage sont étudiées par des méthodes pétrographiques. La stabilisation du matériau s'effectue en deux temps par une réaction à court terme, en moins d'une heure avant le compactage et par une réaction à long terme, grâce à des néoformations minérales variées (8 espèces) qui jouent le rôle de ciment. La prédominance d'aluminates de calcium semble indiquer une réactivité plus grande de la gibbsite. Les conditions de stabilité de ces phases sont discutées d'après les données de la littérature.

Abstract

With the object of using for road construction, lateritic clays from Brazil (kaolinite and gibbsite) have been, experimentally, compacted with or without lime addition. Structural and mineralogical transformation of the material before and after compaction were studied by petrographic methods. The material stabilization is making in two states by short term reaction, less than one hour, before compaction and by long term reaction thanks to various mineral neoformations (8 species) which take a part in cimentation. The predominance of calcium aluminates seems to indicate a greater reactivity of gibbsite. Stability conditions of these phases are discussed according to litterature data.

Introduction

L'utilisation du chaulage dans l'amélioration physico-chimique des sols agricoles argileux est un procédé très ancien et étudié en Agronomie. En technique routière, l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols a pour but l'amélioration des propriétés géotechniques de ces matériaux naturels, en vue de la réalisation de couches de forme et de base.

De nombreuses études en laboratoire ont cherché à rendre compte des mécanismes intervenant dans cette stabilisation. Et celle-ci paraît résulter d'un ensemble de réactions qui se développent plus ou moins rapidement entre les constituants originels du matériau, l'eau et la chaux, et plus particulièrement de la cimentation du matériau par plusieurs phases cristallines formées lors de ces réactions.

Ces travaux expérimentaux ont le plus souvent concerné des matériaux argileux sédimentaires monominéraux (Eades et Grim 1960, Hilt et Davidson 1961, Glenn et Handy 1964, Croft 1964, Diamond et Kinter 1965, le Roux 1969), mais

aussi des matériaux pédologiques de constitution complexe en provenance de régions tempérées (Eades *et al.* 1962) ou de régions tropicales (Townsend *et al.* 1971).

L'étude présentée ici concerne des matériaux argileux latéritiques du Brésil, qui sont actuellement mis en œuvre pour la construction de chaussées. Par une approche pétrographique, on cherche à saisir les transformations minéralogiques et structurales réalisées expérimentalement sur ces argiles par compactage avec ou sans addition de chaux.

Matériel et méthode

Ces argiles latéritiques étudiées constituent les "Terra roxa", terme utilisé au Brésil pour désigner les matériaux pédologiques, formées sur roches éruptives basiques, telles que basalte ou dolérite du bassin du Parana (Melfi, 1968).

Elles proviennent d'horizons B de sols latéritiques rouge foncé (2,5 YR 3/6) souvent épais (10 à 15 mètres), qui occupent dans l'état de Sao-Paulo une surface de près de 35 000 km².

Les fractions grossières de ce matériau sont constituées de *quartz*, *ilménite*, *magnétite* qui sont des minéraux résiduels des roches mères, alors que les fractions < 2µm sont riches en *kaolinite* (≈ 30 %), *gibbsite* (≈ 25 %), *minéraux amorphes*, *oxyhydroxydes de fer* et *hématite* qui sont des minéraux secondaires de l'altération.

(1) Université Paris VII, Laboratoire de Pédologie, 2, place Jussieu 75 521 Paris Cedex 05.

(2) Associacao Brasileira dos produtores de Cal, Rue 7 de Abril, 296 01044 Sao-Paulo Brésil.

(3) O.R.S.T.O.M. Geociencias U.S.P. C.P. 20899 Cidade Universitaria CEP 05508 Sao Paulo Brésil.



Les principales caractéristiques physicochimiques et géotechniques obtenues par Chauvel et De Nobrega (1980) sont rassemblées dans le tableau 1.

Tab. 1 : Caractères physico-chimiques et mécaniques des argiles latéritiques (Chauvel et de Nobrega 1980).

Argile dispersée dans l'eau : 2 %	Argile totale : 40-70 %
Densité réelle : 2,92-3,16	Structure grenue très fine
CEC (T) : 5,8 à 14,2 meq/100 g	$Ph: 5 Ki = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} : 0,26 \text{ à } 1,40$
S(Ca + Na + K + Mg) échangeables : 0,77 à 8,64 meq/100 g	S/T : 8-70 %
Limite de liquidité : 53 %	Limite de plasticité : 30 %
Index de plasticité : 23	
Classification AA SHO - M 145-49 A-7-5 (16)	

Le pourcentage d'argile extractible à l'eau est très faible alors que ce matériau contient de 40 à 70 % de particules inférieures à 2 μm , lorsque l'on emploie des dispersants physiques (ultrasons) ou chimiques (hexamétaphosphate de sodium). Ce comportement est dû à la présence d'oxyhydroxydes métalliques qui cimentent les particules sous la forme de microagrégats de la taille des sables fins.

Dans le cadre de cette étude, nous avons disposé de 3 types d'échantillons préparés par Chauvel et De Nobrega (1980).

TRL1 : matériau naturel.

TRL2 : matériau compacté avec une énergie comparable à celle utilisée pour l'essai Proctor normal.

TRL3 : matériau traité par tamisage à 2 mm, addition de 5 % de chaux hydratée

(CaO = 76 %, MgO = 0,2 %, SiO₂ = 1 %,

Fe₂O₃ + Al₂O₃ = 0,2 %, CO₂ = 0,6 %, H₂O = 22 %),

addition d'eau jusqu'à 29 % d'humidité, tamisage à 4 mm, mise au repos d'une heure, compactage (Proctor normal), mise en attente 3 mois dans une chambre humide.

Le tableau 2 donne quelques caractéristiques des matériaux avant et après compactage.

Tab. 2 : Caractéristiques des matériaux avant et après le compactage (Chauvel et De Nobrega 1980).

Matériau	Eau ajoutée	Densité apparente	CBR %	Energie compactage	Chaux ajoutée
TRL1	—	1	—	—	—
TRL2	29 %	1,59	10	proct. nor.	—
TRL3	29 %	1,47	54	Proct. nor.	5 %

Sur chaque échantillon, nous avons effectué des lames minces en vue d'analyses microscopiques complétées par des analyses chimiques quantitatives *in situ* à la microseconde électronique (Camebax équipée d'un spectromètre dispersif en énergie (EGG-ORTEC).

Sur chaque échantillon ont été également réalisées des observations au microscope électronique à balayage, ainsi que des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X ou par des méthodes thermiques. Les composés amorphes ont été extraits à l'aide d'une solution d'acide oxalique 0,1 M — oxalate d'ammonium 0,175 M (pH = 3,25) avec agitation continue à l'obscurité pendant 5 heures. Les éléments sont alors dosés dans la solution par absorption atomique.

Résultats

I. Matériau TRL1 naturel

A — Aspect microscopique :

Les argiles latéritiques employées se présentent sous la forme de *microagrégats sphériques* de 100 μm de diamètre constitués de l'association d'un plasma argiloferrugineux et de grains minéraux de quartz, ilménite, magnétite (photo 1). Les *vides d'entassement* de ces unités ont une taille d'environ 30 μm . La porosité est très importante, de l'ordre de 65 % due à ces vides interagrégats mais aussi à des vides intragrégats ($\approx 0,1 \mu\text{m}$) qui pourraient jouer un rôle important lors de l'interaction sol-chaux.

En microscopie électronique à balayage, la surface des microagrégats apparaît constituée d'une couche homogène de petites particules plus ou moins sphériques (diamètre : 0,2 à 0,3 μm) d'oxyhydroxydes de fer masquant les minéraux argileux.

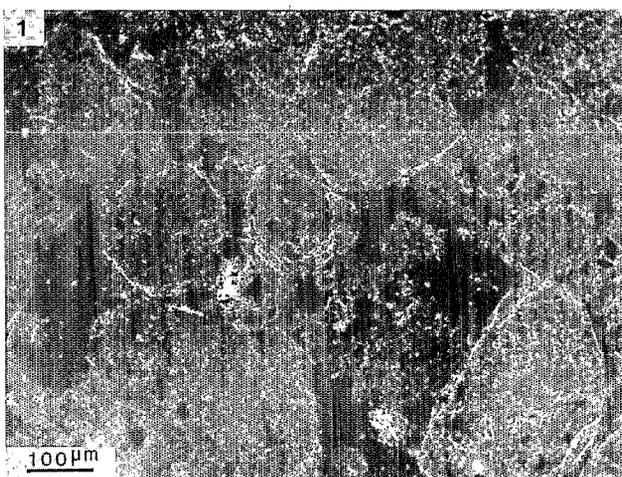


Photo 1 : Matériau TRL1 structure en microagrégats et porosité d'entassement — Nicols croisés.

Photo 1 : TRL1 material micropedal structure and packing voids. Crossed nicols.

B — Minéralogie de la fraction inférieure à 2 μm :

Le matériau utilisé est constitué de *kaolinite* faiblement cristallisée (27 %), de *gibbsite* (22 %) dont les proportions ont été estimées à partir de l'analyse thermopondérale et de *constituants amorphes* (tableau 3).

On remarque l'absence de CaO extractible ainsi que le faible pourcentage de K₂O. Par contre, les quantités de fer et d'alumine extraites sont importantes.

Tab. 3 : Matériau TRL1 — Éléments extractibles dans la solution acide oxalique-oxalate d'ammonium

CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂
O %	0,014 %	2,41 %	3,27 %	0,29 %

II. Matériau TRL2 compacté

A — Aspects microscopiques :

Le compactage provoque la *perte d'individualité structurale* des microagrégats et une *forte diminution de la porosité*

(photo 2). Des séparations plasmiqes (cutanes de contraintes) et des fissures planaires perpendiculaires à l'axe de compaction sont également reconnaissables. L'énergie appliquée lors de l'essai Proctor détermine une importante modification de la structure du matériau par une forte diminution de la porosité. L'échantillon se présente alors comme une masse presque homogène.

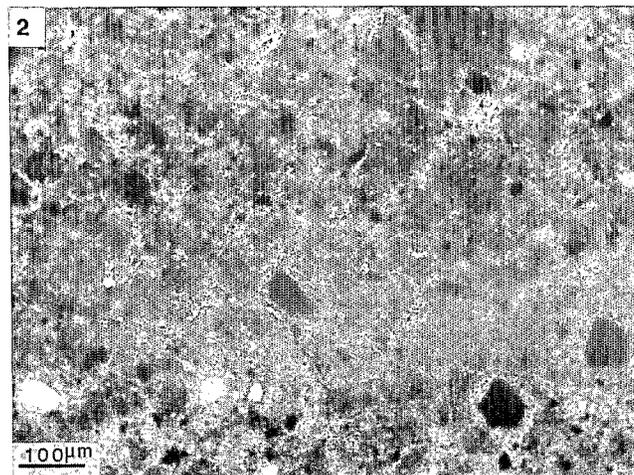


Photo 2 : Matériau TRL2 structure massive. Séparations plasmiqes nombreuses. Noter le squelette de quartz et de minéraux opaques. Nicols croisés.

Photo 2 : TRL2 material massive structure. Numerous plasma separations. Note skeleton grains of quartz and opaque minerals. Crossed nicols.

B – Analyses chimiques à la microsonde des plasmas argilo-ferrugineux des échantillons avant addition de chaux :

Du fait de la très forte microporosité de l'échantillon TRL1 et des taux d'hydratation des constituants argileux, nous avons préféré réaliser des analyses quantitatives du matériau sur l'échantillon compacté. En effet, les totaux des oxydes analysés inférieurs à 55 % dans TRL1 dépassent 70 % dans TRL2, du fait de la diminution de la porosité intramicroagrégats.

Ces plasmas argilo-ferrugineux sont très *alumineux* (tableau 4). Un calcul normatif du pourcentage de kaolinite et de gibbsite a été effectué. Alors que l'ATP donnait 37 % de kaolinite et 22 % de gibbsite, ces calculs indiquent qu'il existerait 1,1 fois plus de gibbsite que de kaolinite. Ceci tendrait à prouver qu'une *partie importante d'aluminium se trouve sous forme de phases amorphes*, qui pourrait réagir très facilement avec la chaux.

Tab. 4 : Analyses à la microsonde des plasmas argilo-ferrugineux du matériau TRL2 (fer total exprimé en FeO).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	MnO	CaO	K ₂ O
18,50	34,05	2,07	22,54	0,19	0,09	0,06
12,94	33,70	3,24	25,20	0,26	0,09	0,03
11,70	28,50	3,53	26,59	0,21	0,05	0,10
13,15	30,47	2,90	29,73	0,30	0,03	0,09

III. Matériau TRL3 compacté après addition de chaux

A – Aspects microscopiques :

L'échantillon TRL3 présente les mêmes caractéristiques structurales que l'échantillon naturel TRL1 (photo 3). Les *microagrégats* et la *porosité interagrégats* sont conservés. Dans cette dernière, on observe de très nombreux *minéraux de néoformation* qui forment une frange continue autour des microagrégats (photo 4) ou bien remplissent totalement des vides d'entassement au centre desquels on peut observer quelquefois, en position ultime, de la calcite.

Au MEB, la surface des microagrégats est modifiée. Il y a un réarrangement structural des particules amorphes en plus gros amas.

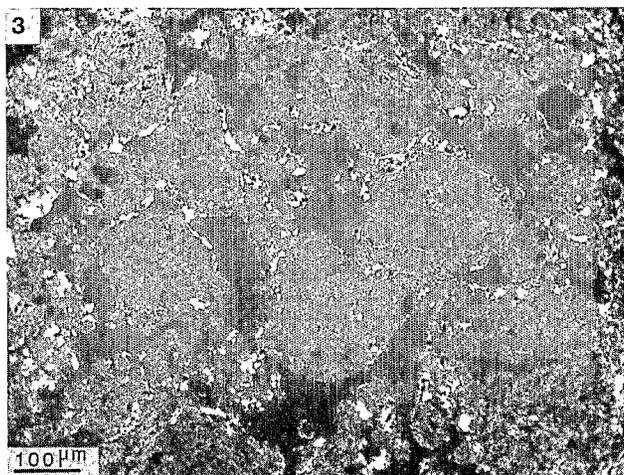


Photo 3 : Matériau TRL3 : la structure en microagrégats est conservée. Dans la porosité, on observe de très nombreux minéraux de néoformation. Nicols croisés.

Photo 3 : TRL3 material: micropedal structure is conserved. In porosity numerous neofomed minerals can be observed. Crossed nicols.

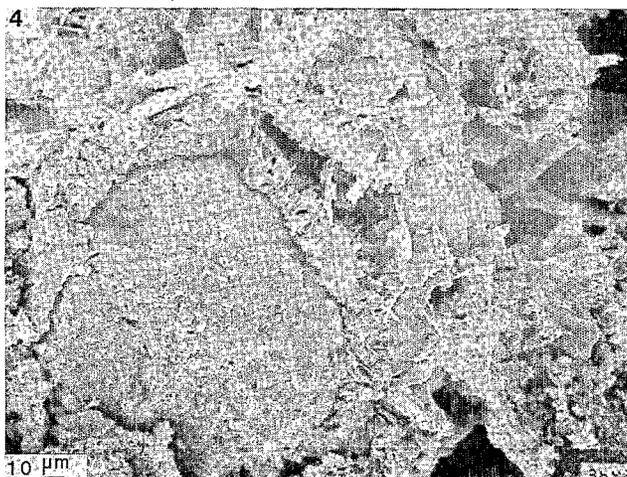


Photo 4 : Matériau TRL3 : les minéraux de néoformation cristallisent dans la porosité interagrégats à partir de la surface des microagrégats. MEB.

Photo 4 : TRL3 material: neofomed minerals crystallize in inter-peds porosity from micropeds surface. MEB.

B – Modifications des constituants argileux :

Les études de diffraction de rayons X ne montrent pas de différences significatives entre TRL3 et TRL1 pour ce qui concerne la kaolinite et la gibbsite. L'analyse thermopondérale met néanmoins en évidence une diminution des pourcentages de kaolinite de 37 à 33 % et de la gibbsite de 22 à 17 %.

La détermination des constituants amorphes par le même réactif que pour TRL1 montre tout d'abord que les minéraux de néoformation ne sont pas attaqués puisque le taux de CaO extrait est nul (tableau 5).

Tab. 5 : Comparaison des pourcentages d'éléments extractibles avant addition de chaux (TRL1) et après (TRL3).

CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂
TRL1 –	0,014	2,41	3,27	0,29
TRL3 –	0,015	2,63	2,85	0,72

Par contre, il y a une augmentation des taux de silice et d'alumine alors que celui du fer diminue. Il y aurait donc une *amorphisation des constituants argileux* : kaolinite et gibbsite, alors qu'une partie du fer libre recristalliserait comme les observations au MEB de la surface des microagrégats tendaient à le suggérer.

L'analyse chimique des plasmas après addition de chaux ne permet pas de mettre en évidence des variations significatives des taux de silice ou d'alumine (tableau 6). Par contre, on peut montrer une incorporation très homogène du calcium dans ces plasmas, soit sous forme de très petits minéraux de néoformation, soit sous forme de chaux n'ayant pas réagi dans la microporosité intra-agrégats. La figure 1 montre les compositions chimiques des plasmas de TRL2 et TRL3. La dispersion des compositions est assez grande et les deux nuages de points sont superposables.

Tab. 6 : Analyses à la microsonde des plasmas argilo-ferrugineux du matériau additionné de chaux et compacté (TRL3).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	MnO	CaO	K ₂ O
12,91	30,68	5,30	28,67	0,34	1,44	0,09
13,74	34,02	2,62	22,90	0,11	0,98	0,49
12,42	29,94	5,47	25,38	0,05	2,24	0,01
11,25	29,28	5,17	26,39	0,18	1,87	0,07

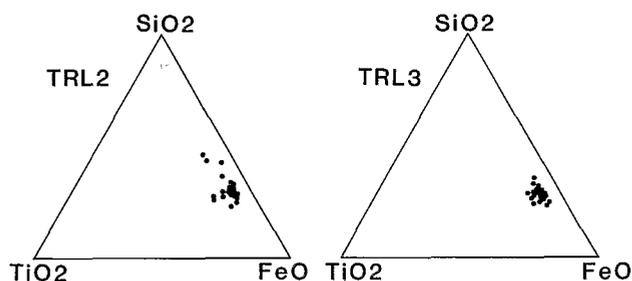


Fig. 1 : Analyses chimiques à la microsonde des plasmas argilo-ferrugineux compactés avant (TRL2) et après addition de chaux (TRL3).

Fig. 1 : Microprobe analyses of compacted argiloferruginous plasmas before (TRL2) and after lime addition (TRL3).

C – Les minéraux de néoformation :

Nous avons fait l'inventaire des minéraux de néoformation dans l'échantillon TRL3 et nous avons ainsi pu mettre en évidence 8 phases néoformées, dont certaines peuvent se trouver en association dans un même vide (Fig. 2). Nous utilisons la nomenclature de Bogue (1955) adoptée dans la chimie des ciments où C = CaO, A = Al₂O₃, S = SiO₂, H = H₂O. Ces phases néoformées sont les suivantes :

- A – Le *carbonoaluminate tétracalcique hydraté* : C₃AH₁₁, CaCO₃
- B – L'*aluminat tricalcique hydraté* : C₃AH₆
- C – Un *silico aluminat calcique hydraté* comparable à C₂ASH_n.
- D et E, deux *silicates calciques hydratés* comparables à CSH (gel) et CSH (I), (phases proches de la tobermorite).
- F – *Phase aluminosilicatée* présentant, en plus du calcium, des taux de *potassium* importants.
- G – *Phase aluminosilicatée* présentant un rapport Si/Al proche de 1 et des taux de calcium variant de 4 à 6 % (par rapport à la somme Si + Al + Ca).
- H – La *calcite* CaCO₃.

- (CaO)₃Al₂O₃(H₂O)₁₁CaCO₃
- ▲ (CaO)₃Al₂O₃(H₂O)₆
- (CaO)₂Al₂O₃SiO₂(H₂O)_n
- CaO SiO₂ H₂O
- haut taux de calcium
- CaO SiO₂ H₂O
- faible taux de calcium
- Aluminosilicate de K, Ca
- Phase inconnue
- Calcite

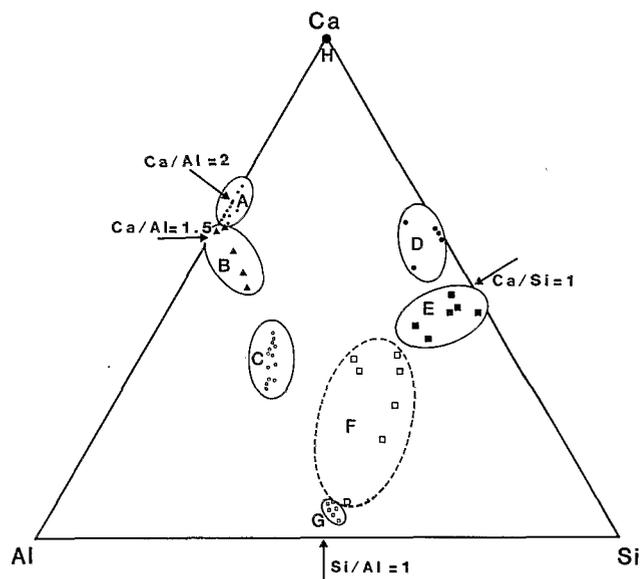


Fig. 2 : Analyses à la microsonde des minéraux de néoformation lors d'une interaction argiles latéritiques-chaux-eau.

Fig. 2 : Microprobe analyses of neoformed minerals during an interaction lateritic clays-lime-water.

Ces déterminations ont été faites principalement à la microsonde électronique et nous présentons ici quelques exemples d'analyses de ces différentes phases (tableau 7).

Nous avons pu, dans deux cas, relier des morphologies de cristaux observées au MEB à des structures cristallines déterminées par diffraction de rayons X, à l'aide d'une chambre Seeman Bohlin, sur le même crystallaria. Ainsi la photo 5 représente les phases les plus abondantes. Ce sont des cristaux lamellaires en tablettes, aux habits bien exprimés, d'environ 10 μm de large et 1 μm d'épaisseur.

Tab. 7: Exemples d'analyses chimiques à la microsonde des minéraux réactionnels néoformés par addition de chaux à des argiles latéritiques brésiliennes.

	A			B			C			D			E			F			G		
	$C_3AH_{11} \cdot CaCO_3$			C_3AH_6			C_2ASH_n			CSH (gel)			CSH (I)			phase non déterm.			phase non déterm.		
SiO ₂	0,12	0,24	0,36	0,27	7,12	1,10	18,38	19,94	20,69	29,29	34,76	35,43	36,46	39,48	33,40	39,86	23,94	28,61	40,50	39,62	29,94
Al ₂ O ₃	16,64	17,00	15,16	15,79	19,98	19,92	28,84	31,53	32,68	3,70	0,06	6,28	2,80	3,10	2,78	15,02	14,87	20,59	32,35	31,29	29,99
K ₂ O	0,19	0,11	0,12	0,16	0,16	0,05	0,37	0,28	0,33	0,55	0,41	0,42	0,33	0,33	0,31	4,36	7,87	15,09	0,30	0,19	0,31
CaO	34,62	39,45	40,10	27,50	28,31	37,24	33,28	30,99	32,91	52,55	49,48	46,31	34,01	33,57	25,69	26,36	20,71	3,41	3,33	4,21	12,91
FeO	2,75	3,55	1,92																		

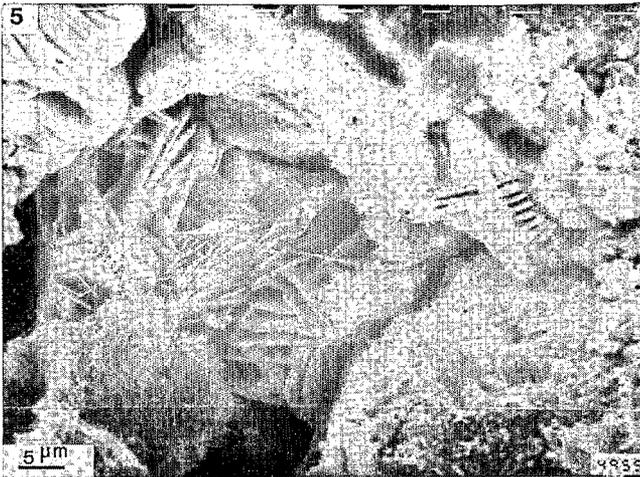


Photo 5: Matériau TRL3: cristaux lamellaires de C_3AH_{11} , $CaCO_3$ aux habitus bien exprimés. MEB.

Photo 5: TRL3 material: lamellar crystals of C_3AH_{11} , $CaCO_3$ in well expressed habitus. MEB.

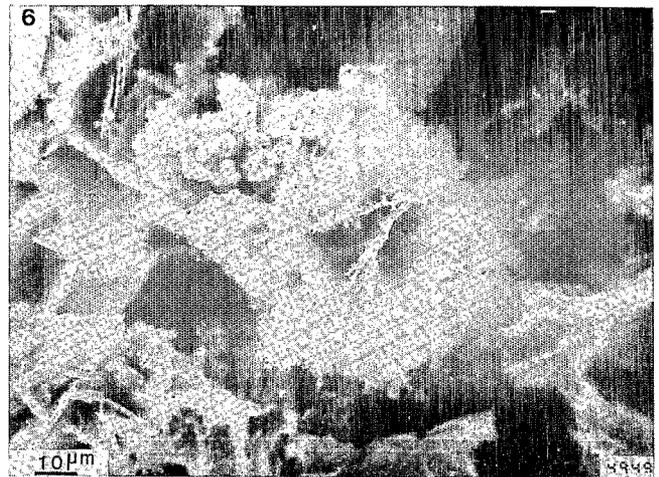


Photo 6: Matériau TRL3: cristaux lamellaires et très flexueux de C_3AH_6 . MEB.

Photo 6: TRL3 material: lamellar and very flexible crystals of C_3AH_6 . MEB.

Les raies intenses à 7,58, 3,80 et 2,85 Å caractérisent $C_3AH_{11} \cdot CaCO_3$ (Glenn et Handy, 1963). De plus, ce minéral est toujours en association avec la calcite. De la même manière, la photo 6 représente des cristaux lamellaires flexueux d'aluminates tricalciques hydratés (C_3AH_6) caractérisés par des raies intenses à 2,03, 2,27, 2,78 Å (Glenn et Handy, 1963).

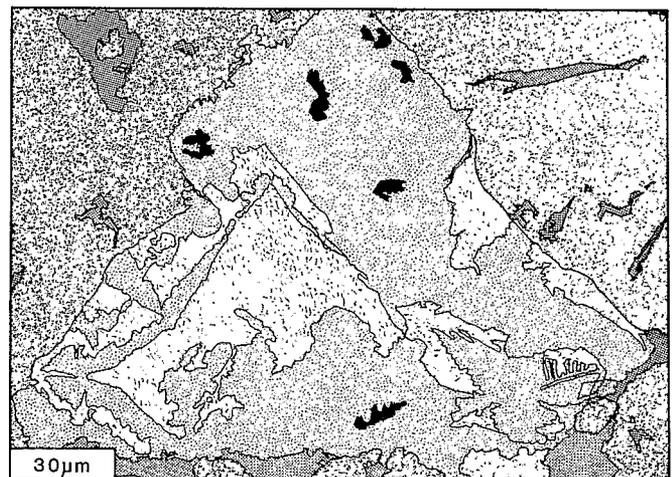
La figure 3 représente un exemple d'association minérale dans un même crystallaria. Dans ce cas, 3 espèces coexistent :

– les gros cristaux gris clair ont une composition proche du composé de STRATLING : C_2ASH_n (figure 2-C).

– les cristaux d'assemblage en mosaïque ont des compositions chimiques variables qui peuvent être regroupées en deux phases. En effet, dans la famille des silicates de calcium hydratés de formule générale CSH, des minéraux à différents taux de calcium existent, CSH (gel) riche en calcium (tableau 7-D) et CSH(I) pauvre en calcium (tableau 7-E).

– les petits cristaux réfringents sont des aluminosilicates de calcium et de potassium (tableau 7-F). En effet, ces cristaux contiennent de 5 à 15 % de potassium, qui serait libéré lors de l'attaque des constituants primaires du sol et piégé dans ces phases néoformation.

Un autre crystallaria nous a permis d'identifier une phase réactionnelle dont les cristaux sont fibreux, orientés perpendiculairement à la surface des microagrégats. Ces minéraux sont aluminosilicatés, pauvres en calcium avec un rapport Si/Al égal à 1 (tableau 7-G).



	cristaux gris clair de C_2ASH_n		plasma
	cristaux en mosaïque de CSH		vides
	cristaux réfringents d'aluminosilicates de calcium et potassium		plasma
	light grey crystals of C_2ASH_n		voids
	crystals in mosaic pattern of CSH		
	refracting crystals of calcic and potassic aluminosilicates		

Fig. 3: Exemple de crystallaria complexe de minéraux de néoformation dans le matériau TRL3.

Fig. 3: Example of complex crystallaria with neoformed minerals in TRL3 material.

Ces deux dernières phases (F et G) ne correspondent à aucune des phases rencontrées dans la littérature consultée et nécessiteraient des compléments d'étude.

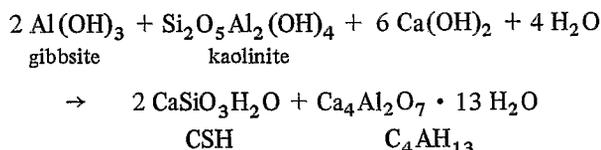
Discussion — Conclusion

L'addition de chaux avant compactage des argiles latéritiques brésiliennes assure donc, dans un premier temps, la *conservation de la structure* naturelle du matériau, en déterminant un ensemble de *transformations minéralogiques à court terme* (en moins d'une heure, avant le compactage). Et les phases néoformées sont alors localisées dans la *microporosité située à l'intérieur des agrégats naturels*.

Diamond (1964) avait déjà montré que la chaux réagissait presque instantanément avec l'hydroxyde d'aluminium très faiblement cristallisé pour donner un aluminat tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}).

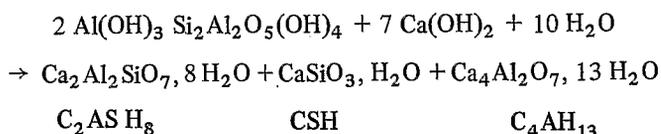
Diamond et Kinter (1965) ont envisagé des réactions immédiates entre la couche Al (OH) des arêtes des particules d'argile et la chaux adsorbée sur leur surface. En particulier, ces réactions interviendraient sur les contacts arêtes faces des particules floculées pour donner de l'aluminat tétracalcique hydraté (C_4AH_{13}) et du silicate de calcium hydraté CSH (gel).

Ces transformations à court terme pourraient donc correspondre à la réaction suivante :

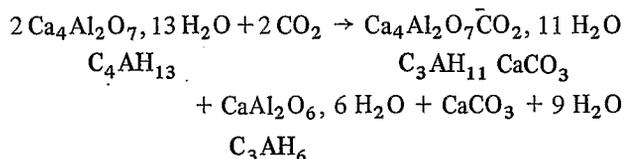


Ainsi ces premières phases néoformées, bien qu'elles soient très faiblement cristallisées et présentes en très faible quantité, peuvent assurer l'agrégation des particules d'argile et en empêcher la dispersion qui est elle-même déjà limitée, dans ce matériau latéritique par la présence des ciments ferrifères.

Dans un second temps, la stabilisation du matériau se réalise par des *transformations minéralogiques à plus long terme*, qui déterminent la cristallisation de nouveaux minéraux localisés cette fois *dans la porosité interagrégats*. Ces néoformations utiliseraient l'aluminium et la silice libérées par l'attaque alcaline des constituants phyllosilicatés du matériau, selon la réaction suivante :



Par la microanalyse en place des phases réactionnelles, on a pu établir cette prédominance des aluminates de calcium hydratés, et plus précisément la présence de deux d'entre eux : $C_3AH_{11}CaCO_3$ et C_3AH_6 qui, selon Millet et Homméry (1974) et Dron (1975) résulteraient d'une évolution des minéraux formés dans le système CaO, Al_2O_3 , H_2O suivant la réaction :



Il a été également montré que les néoformations mises en évidence s'accompagnaient bien de modifications ou de diminutions corrélatives de certains constituants des argiles latéritiques. On a ainsi constaté des transformations qui concernent soit les oxyhydroxydes de Fer qui recristallisent, soit la gibbsite et la kaolinite qui diminuent et qui s'amorphisent. Et la prédominance des aluminates de calcium dans les phases réactionnelles correspondraient à l'attaque préférentielle de la gibbsite.

Enfin la présence de calcium réparti de façon homogène au sein du matériau additionné de chaux confirme que les microvides localisés à l'intérieur des agrégats puissent être généralement occupés par des phases réactionnelles de très petite taille, sinon par de la chaux n'ayant pas réagi.

Ces études expérimentales, qui ont donc permis la détermination en place d'une paragenèse constituée d'au moins huit phases néoformées, conduisent également à envisager théoriquement quelles peuvent être les *stabilités relatives* de ces différentes phases. On sait ainsi que C_3AH_6 est stable dans les conditions normales (25°C, 1 atm.) de température et de pression (Diamond et Kinter 1966, Majumdar et Roy, 1956). Par contre $C_3AH_{11}CaCO_3$ est instable en présence de CO_2 atmosphérique et se décompose suivant la réaction (Carlson et Berman 1960) :



Il serait donc intéressant, pour mieux contrôler la mise en œuvre, l'efficacité et la longévité de ce traitement à la chaux, d'étudier expérimentalement la cinétique des réactions qui, dans ce système sol-chaux-eau, contrôle l'ordre d'apparition et la stabilité des phases néoformées.

Bibliographie

- BOGUE R.H. (1955): Chemistry of Portland cement. *Reinhold Pub. Corp., New-York*, 790 p.
- CHAUVEL A., DE NOBREGA M.T. (1980): Comportamento dos solos argilosos desenvolvidos sobre basaltos do Brasil Meridional apos tratamento com cal. iv Reuniao Aberta da Industria da Cal. *ABPC, Bull.*, 20, 12, pp. 124-172.
- CROFT J.B. (1964): The process involved in the lime stabilisation of clay soils. *Proc. second conf. Austr. Road Res. Board*, vol. 2, part 2, 1169-1203.
- DIAMOND S., KINTER E.B. (1965): Mechanisms of soil-lime stabilisation. An interpretive review. *High. Res. Board Rec.*, 92, 83-102.
- DRON R. (1975): Etude expérimentale et théorique du système CaO, Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O . *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 77, 89-93.
- EADES J.L., GRIM R.E. (1960): The reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soils stabilisation. *High. Res. Board Bull.*, 262, 51-63.
- EADES J.L., NICHOLS F.P., JR, GRIM R.E. (1962): Formation of new minerals with lime stabilisation as proved by field experiments in Virginia. *High. Res. Board Bull.*, 335, 31-39.
- GLENN G.R. HANDY R.L. (1963): Lime-clay mineral reaction products. *High. Res. Board Rec*, 29, 70-83.
- GLENN G.R., HANDY R.L. (1964): X-Ray studies of lime-bentonite reaction products. *66th Ann. Meeting, Amer. Cer. Soc., Chicago*.
- HILT G.H., DAVIDSON D.T. (1961): Isolation and investigation of a lime-montmorillonite crystalline reaction product. *High. Res. Board. Bull.*, 304, 51-64.

- LE ROUX A. (1969): Traitements des sols argileux par la chaux. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 40, 59-96.
- MAJUMDAR A.J., ROY R. (1956): The system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$. *Jour. Amer. Cer. Soc.*, 39, 12, 434-442.
- MELFI A. (1968): Contribution à l'étude des "Terras Roxas Legitimas" du Brésil. *Bull. Ass. Fran. Etude du Sol*, 6, 31-39.

- MELFI A. (1978): Natureza e origem dos constituintes secundarios dos solos desenvolvidos as rochas basicas da Bacia do Parana. *Ceramica*, 24, 105, 347-354.
- TOWNSEND F.C., MANKE P.G., PARCHER J.V. (1971): The influence of sesquioxides on lateritic soil properties. *High. Res. Rec.*, 374, 80-92.

