

## **Note sur le comportement de certains minéraux à l'attaque triacide**

**D. NJOPWOUO\* et M. ORLIAC\*\***

*\*\* Assistant à la Faculté des Sciences, Université de Yaoundé, Cameroun*

*\* Professeur à la faculté des Sciences, Université Paul Sabatier, 31077 Toulouse Cedex*

### **RÉSUMÉ**

*Dans cette étude, l'attaque par le réactif triacide (mélange  $HCl-HNO_3-H_2SO_4$ ) généralement utilisée pour l'étude des latérites et des sols, est appliquée à des minéraux purs de structure et de composition chimique bien déterminées.*

*Parmi les minéraux considérés les échantillons d'hydroxyde, d'oxyde, d'argile et de péridot sont complètement détruits, ceux de mica et d'amphibole le sont en proportions notables : par contre, les pyroxènes et les feldspaths résistent assez bien à l'attaque tandis que le quartz est presque insensible au réactif utilisé.*

*L'attaque des minéraux primaires aboutit généralement à une simple solubilisation partielle du minéral, la structure du résidu étant identique à celle du minéral initial.*

### **ABSTRACT**

#### **MEMO ON THE BEHAVIOUR OF SOME MINERALS WHEN ATTACKED BY TRIACID REAGENT**

*In this study, the attack by the triacid reagent ( $HCl-HNO_3-H_2SO_4$ ) generally used for laterites and soils analysis, is applied to some pure minerals of which structure and chemical composition are well known.*

*Among the considered minerals, hydroxide, oxide, clay and peridot samples are completely wrecked, followed by micas and amphibols. Pyroxens and feldspars resist sufficiently to the attack whereas the quartz is almost insensible to the reagent.*

*The attack of primary minerals generally lead to a simple partial solubilisation of the mineral as the residue structure is the same as that of the initial mineral.*

## INTRODUCTION

En minéralogie des argiles et en pédologie, la connaissance des rapports  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  est souvent d'une grande importance, car ils servent à caractériser la plupart des minéraux secondaires ou de néoformation. Parmi les procédés de mise en solution en vue de leur détermination, la fusion alcaline a l'inconvénient de solubiliser le quartz et les silicates primaires, ce qui fausse les valeurs de ces rapports. L'attaque aux trois acides ( $\text{HCl} - \text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4$ ) proposée par HARRISSON, 1933 pour l'analyse des latérites et préconisée par BAYEN, 1936, HARDY et RODRIGUES, 1939 pour le sol total broyé à  $200 \mu$ , a donné des résultats meilleurs, à tel point que le procédé a été étendu depuis à la plupart des échantillons de sols et aux produits d'altération. On admet ainsi que cette attaque ne solubilise que les minéraux secondaires ou de néoformation.

Cependant la méthode triacide laisse un insoluble souvent très abondant, dont la nature et la composition minéralogique, d'après les données bibliographiques à notre disposition, n'ont jamais été déterminées, même si pour certains échantillons de sols, la composition chimique en a été précisée, BOULET, 1974.

C'est l'objet de cette étude, dont la première partie est consacrée à la caractérisation des minéraux considérés, la deuxième partie décrivant le protocole d'attaque et présentant les résultats obtenus; dans la troisième partie est analysé le comportement de chaque minéral traité en relation avec sa composition chimique et sa structure.

## 1. IDENTIFICATION DES MINÉRAUX UTILISÉS

### 1.1. Choix des échantillons et méthodes d'identification

Les minéraux utilisés sont choisis parmi les plus fréquents dans le sol ou ayant une influence sur la pédogenèse et particulièrement dans les sols tropicaux : oxydes, hydroxydes et silicates.

Alors que les oxydes et les hydroxydes ont des compositions chimiques et des structures variant relativement peu, les silicates, au contraire, ont des compositions chimiques, et surtout des structures, très différentes les unes des autres et dont plusieurs de leurs propriétés physico-chimiques dépendent. C'est ainsi que les échantillons de silicates choisis appartiennent aux sous-classes suivantes :

- Nésosilicates à tétraèdres  $\text{SiO}_4$  isolés (péridots)
- Inosilicates à tétraèdres  $\text{SiO}_4$  en chaînes simples ou doubles (pyroxènes et amphiboles)
- Phyllosilicates à tétraèdres disposés en feuillets (micas, argiles)
- Tectosilicates formés de charpentes tridimensionnelles de tétraèdres (quartz, feldspaths).

Les différents échantillons sont broyés à  $200 \mu$  et identifiés par analyse chimique, diffractométrie X et éventuellement par des examens optiques.

L'analyse chimique est faite selon le procédé classique après fusion alcaline et la formule structurale du minéral en est déduite en utilisant la méthode de MAUGUIN 1926, 1930.

En diffractométrie X, le rayonnement utilisé est le  $K\alpha$  du cuivre ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ) produit par un générateur PHILIPS. Les figures de diffraction sont exploitées sur un diffractogramme ou sur un film DEBYE-SCHERRER lorsque la quantité de poudre à étudier est inférieure à 100 mg; cette technique, jointe aux résultats d'analyse chimique, permet d'identifier les minéraux accessoires associés au minéral principal.

Enfin l'identification complète peut nécessiter la connaissance de certaines caractéristiques optiques telles que indices de réfraction, angle d'extinction, etc; les déterminations optiques sont faites suivant les techniques décrites par ROUBAULT, 1963 sur un microscope polarisant à transmission NACHET.

## 1.2. Résultats

Les résultats de diagnose obtenus sur les divers échantillons sont rassemblés dans le tableau I d'où il ressort que les échantillons étudiés sont : Hématite, Gibbsite, Phlogopite, Muscovite, Kaolinite, Olivine forstéritique, Diopside augitique, Gédrite, Quartz, Microcline perthitique, Oligoclase et Labrador.

## 2. ATTAQUE DES MINÉRAUX

### 2.1. Attaque et protocole d'analyse triacide

Le réactif triacide est constitué par 25 ml de mélange sulfonitrique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  conc./ $\text{HNO}_3$  conc. = 2/3) et 25 ml d'acide chlorhydrique concentré, pour une prise de 1 g d'échantillon broyé à  $200 \mu$  et séché à  $105^\circ \text{C}$  jusqu'à poids constant.

TABLEAU I  
Résultats de l'identification des minéraux

Classes, sous-classes ou groupes de minéraux	Origine	Formule structurale	Indices de Réfraction	Angle 2 V	Observations	
					Minéral	Impuretés
I - OXYDES	France (Ariège)	$Fe_2O_3$	—	—	Hématite	Quartz (1.5 %)
II - HYDROXYDES	Australie (Kimberley)	$Al(OH)_3$	-	-	Gibbsite	Quartz (6 %) Hématite (10.4 %) Anatase (2 %)
III - SILICATES - <i>Phyllosilicates</i> . Argiles	Madagascar	$(Si_{2.02}O_{4.00})Al_{2.34}(OH)_{4.94}$	—	—	Kaolinite	Quartz (6 %) Hématite (2 %) Rutile (1 %)
. Mica noir	Madagascar	$(K_{2.10}Na_{0.00})(Mg_{3.92}Fe_{0.98}^{II}Fe_{0.47}^{III}Al_{0.36}Ti_{0.12})$ $(Al_{2.37}Si_{5.63})O_{21.13}(OH)_{2.77}$	$Ng = 1.608 \pm 0.002$	$20 \pm 5^\circ$	Phlogopite	—
. Mica blanc (dioctaédrique)	Madagascar	$(K_{2.10}Na_{0.10})(Al_{2.77}Fe_{0.77}^{III}Fe_{0.02}^{II}Mg_{0.11}Ti_{0.04})$ $(Al_{2.11}Si_{5.89})O_{19.43}(OH)_{4.97}$	$Ng = 1.599 \pm 0.002$	$40 \pm 5^\circ$	Muscovite	—
- <i>Inosilicates</i> . Pyroxène	France (Ariège)	$(Si_{1.03}Al_{0.17})O_8(Ca_{0.80}Mg_{0.70}Fe_{0.12}^{III})$ $Al_{0.14}Ti_{0.02}Na_{0.14}$	$Ng = 1.705 \pm 0.002$ $Np = 1.674 \pm 0.002$	$55 \pm 5^\circ$	Diopside augitique	— —
. Amphibole	Italie (Finero)	$Si_{5.97}Al_{2.03}O_{22.57}(OH)_{1.43}(Al_{1.01})$ $Fe_{0.32}^{III}Fe_{0.44}^{II}Mg_{3.09}Ca_{1.70}K_{0.07}Ti_{0.03}Na_{0.72}$	$Ng = 1.658 \pm 0.002$ $Np = 1.641 \pm 0.002$	$75 \pm 5^\circ$	Gédrite	—
- <i>Néosilicates</i> (Haute-Savoie)	France	$(Al_{0.11}Ca_{0.01}Na_{0.01})(Fe_{0.13}Mg_{1.40})Si_{0.99}O_4$	$Ng = 1.685 \pm 0.002$	$90 \pm 2^\circ$	Olivine forstéritique	Enstatite (14 %)
- <i>Tectosilicates</i> . Quartz	France (Tarn)	$SiO_2$	$Ng = 1.553 \pm 0.002$ $Np = 1.544 \pm 0.002$	—	Quartz	—
. Feldspath-K	Madagascar	$(K_{0.75}Na_{0.31})(Si_{2.99}Al_{1.10})O_8$	$Np = 1.520 \pm 0.002$	$60 \pm 5^\circ$	Microcline perthitique	—
. Feldspath-Na	—	$(Na_{0.82}Ca_{0.11}K_{0.02})(Si_{2.99}Al_{1.00})O_8$	$Np = 1.532 \pm 0.002$	$75 \pm 5^\circ$	Oligoclase	—
. Feldspath-Ca-Na	—	$(Ca_{0.51}Na_{0.49}K_{0.02})(Si_{2.42}Al_{1.58})O_8$	$Np = 1.553 \pm 0.002$	$85 \pm 5^\circ$	Labrador	—

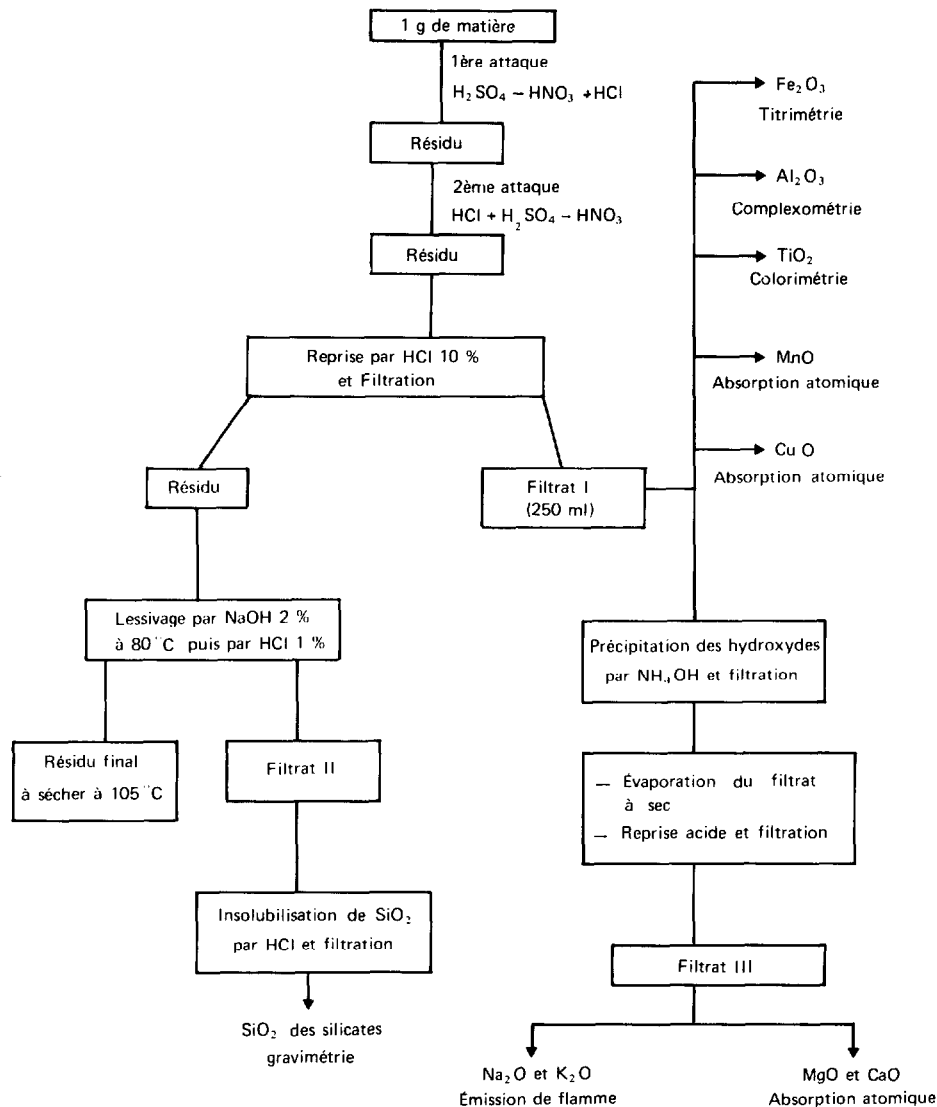


FIG. 1. — Schéma de l'analyse triacide.

L'attaque est effectuée dans un bécber et sur plaque chauffante placée sous une hotte tirant bien. Le protocole d'analyse est présenté sur la figure 1.

## 2.2. Résultats

Les résultats des analyses exprimés en % sont rassemblés dans le tableau II.

Les proportions des résidus sont très faibles pour les non silicates, la kaolinite et la phlogopite, faibles à moyennes pour la muscovite, la forstérite et la

gédrite; elles deviennent importantes et même très importantes pour le diopside, les feldspaths et le quartz pour lequel le résidu approche la valeur 100 %.

Les résultats de l'analyse triacide sont complétés par l'examen des résidus aux Rayons X et au microscope polarisant. Cet examen révèle que les résidus d'attaque sont constitués de mélange de quartz et des traces de minéral non détruit dans le cas de l'hématite et de la phlogopite, uniquement de quartz dans le cas de la gibbsite et de la kaolinite. Quant aux résidus des autres silicates, ils se composent essentiellement du minéral initial non attaqué, à l'exception du résidu de

TABLEAU II

Résultats d'analyse après attaque triacide des différents minéraux (granulométrie ≤ 02 mm)  
(les résultats sont exprimés en % de matière séchée à 105° C)

Minéral	Gibbsite	Hématite	Quartz	Micro-cline	Oligo-clase	Labrador	Diopside	Gédrite	Forstérite	Musco-vite	Phlo-gopite	Kaolinite
H <sub>3</sub> O*	27.2	—	—	—	—	—	—	1.5	—	5.0	2.8	13.4
Résidu	1.5	3.9	98.5	95.9	93.2	80.4	92.6	35.2	38.8	20.5	4.2	5.5
SiO <sub>2</sub>	5.8	0.5	1.5	1.7	2.5	8.3	3.4	22.1	24.5	34.6	35.9	42.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.1	—	—	2.0	4.8	9.9	2.4	10.0	0.4	26.4	18.1	36.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.1	95.3	—	—	—	—	0.4	6.2	7.4	4.2	11.7	1.9
TiO <sub>2</sub>	2.2	0.1	—	—	—	—	—	0.3	—	0.2	1.4	1.3
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1	—	0.1	—
MgO	—	—	—	—	—	0.3	0.2	16.4	27.8	1.2	14.5	—
CaO	—	—	—	—	—	2.5	0.5	5.9	0.5	0.1	0.2	—
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	0.1	0.3	1.1	0.3	2.0	0.3	0.8	0.4	—
K <sub>2</sub> O	—	—	—	0.3	0.1	0.2	—	0.2	0.1	7.9	10.2	—
Total	99.9	99.8	100.0	100.0	99.8	99.7	99.8	99.8	99.9	99.9	99.5	100.1
R = $\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	—	—	—	1.4	0.9	1.4	—	3.7	—	2.2	3.4	2.0

l'olivine forstéritique où on ne retrouve que de l'ensatite qui constituait la principale impureté de l'échantillon de départ. Les caractéristiques optiques et les diffractogrammes de cet échantillon initial et de son résidu sont présentés dans le tableau III et la figure 2.

Par ailleurs nous avons remarqué qu'au cours de l'attaque, les minéraux à fortes teneurs en alumine et magnésie (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO > 30 %) donnent une masse spongieuse qui freine l'évaporation de l'eau et provoque ainsi un ralentissement de l'opération. On peut attribuer ce phénomène à la formation de sulfates d'alumine et/ou de magnésie hydratés dont la déshydratation n'a lieu qu'à des températures très élevées (KRAUSS et FRIKE, 1927. HACKSPILL et KIFFER, 1930). Dans ce cas, on peut accélérer le déroulement de l'attaque en triturant la masse spongieuse à l'aide d'une baguette de verre, jusqu'à dessiccation complète.

### 3. DISCUSSIONS

#### 3.1. Comportement des non silicates

La gibbsite a été complètement détruite, ne laissant qu'un très faible résidu de quartz; par contre, dans le résidu laissé par l'attaque de l'hématite, on rencontre encore des traces de minéral non attaqué. Cette légère différence dans le comportement des deux espèces minérales peut s'expliquer en considérant leurs structures respectives.

En effet, l'hématite est formée par un empilement hexagonal compact d'anions oxygènes laissant des interstices octaédriques dont deux sur trois sont occupés par un atome Fe, alors que la gibbsite est constituée par un empilement hexagonal compact d'anions OH<sup>-</sup> offrant des interstices octaédriques dont un seul sur

TABLEAU III

Caractéristiques optiques du péridot initial et de son résidu

CARACTÉRISTIQUES OPTIQUES	PERIDOT INITIAL	RÉSIDU
Indice Ng	1.685 ± 0.002	1.680 ± 0.005
Couleur (L.P.)	jaune à violet	gris blanc à blanc
Angle 2 V (L.P.)	90 ± 2°	75 ± 5°
Conclusion	86 % forstérite	85-90 % enstatite + traces de silice amorphe

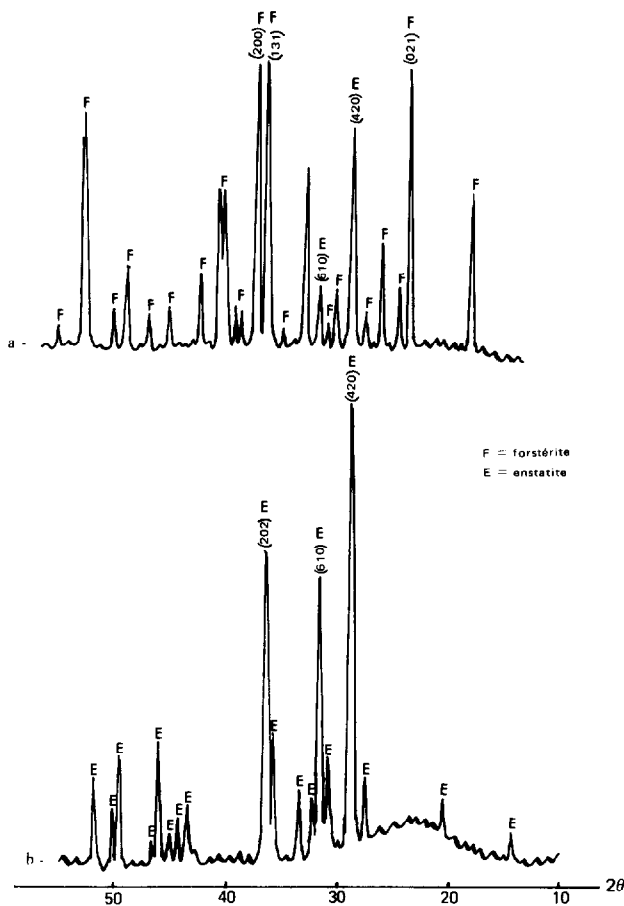


FIG. 2. — Diffractogramme des RX de l'échantillon de péri-dot; a : péri-dot initial (Forstérite); b : résidu d'attaque triacide (Enstatite).

trois se trouve occupé par un atome Al. L'empilement présente ainsi plus de sites non occupés dans la structure de la gibbsite, où par ailleurs la force de liaison métal-oxygène est affaiblie par la présence de l'hydrogène lié à l'oxygène. Ces facteurs contribueraient à rendre la structure de la gibbsite plus fragile que celle de l'hématite. Le phénomène se trouverait plus renforcé en milieu acide où l'intervention des ions  $H^+$  par un processus de protonation du groupement OH de la gibbsite rendrait les liaisons Al-OH encore plus fragiles que les liaisons Fe-O. En définitive, dans un même milieu acide, la gibbsite présenterait une structure plus lâche que celle de l'hématite et se détruirait par conséquent plus rapidement que cette dernière.

### 3.2. Comportement des silicates

Comme pour les non silicates, le comportement des

minéraux silicatés peut s'interpréter en tenant compte de la structure et même de la composition chimique. Pour mieux étudier l'influence de ces deux facteurs, nous considérerons les minéraux utilisés chacun dans sa sous-classe ou son groupe structural respectifs.

#### SOUS-CLASSE DES TECTOSILICATES

L'unité structurale des silicates est le tétraèdre  $SiO_4$ . Dans les tectosilicates, ces tétraèdres sont tous liés par leurs sommets et forment un réseau tridimensionnel dont le groupement caractéristique est  $(Si, Al)O_2 n$ .

Le quartz, de formule  $SiO_2$ , est donc le minéral de composition chimique la plus simple de la sous-classe; sa résistance à l'attaque triacide serait due au fait qu'il n'est constitué que de deux éléments Si et O associés suivant une structure mésodesmique très stable, où le pouvoir polarisant élevé de l'ion  $Si^{4+}$  et le caractère électronégatif prononcé de l'atome d'oxygène confèrent aux liaisons Si-O-Si une très grande solidité. Cette résistance du quartz, aussi bien au réactif triacide qu'aux agents chimiques naturels a déjà été observée par d'autres auteurs (CLAISSE, 1968; CLAISSE, 1972; GOLDISH, 1938). L'examen aux Rayons X du résidu ne décelant aucune modification structurale par rapport au minéral initial, l'attaque n'aura donc abouti qu'à une simple solubilisation partielle très faible.

Les feldspaths ont une structure dans laquelle une partie de Si (jusqu'à 50 %) est remplacée par Al tétra-coordonné, ce qui fait apparaître des valences négatives neutralisables par des ions métalliques alcalins ou alcalino-terreux. Dans leur structure apparaîtront donc des liaisons Si-O-Si, Si-O-Al, M-O-Al ou M-O-Si (M = Na, K, Ca), les trois dernières étant, d'après des considérations de valence électrostatique, plus lâches que les liaisons Si-O-Si.

La composition chimique du microcline et de l'oligoclase étudiés ici dénote un excès d'aluminium par rapport au silicium (cf. 1<sup>re</sup> partie). Il existerait ainsi dans leurs réseaux des zones à fortes proportions de liaisons Al-O-Si. Ces zones seraient donc probablement les plus touchées au cours de l'attaque, le pH du milieu (inférieur à 2,5) étant par ailleurs plus favorable à la dissolution de l'alumine qu'à celle de la silice.

Dans le labrador, le calcium et le sodium sont très vite extraits du réseau feldspathique par le réactif triacide, et d'autant plus vite qu'ils sont plus riches en calcium. Le résultat de cette dissolution rapide des bases est que le réactif atteint facilement le squelette Al-O-Si ou Si-O-Si.

L'abondance des liaisons Si-O-Si dans les feldspaths par rapport aux liaisons Al-O-Si et M-O-Si

ou M-O-Al justifierait la grande résistance de ces minéraux, comparée à celle d'autres silicates. Signalons que le béryl attaqué par le réactif triacide donne la même proportion de résidu que les feldspaths, ce qui donne à penser que c'est à juste titre que certains auteurs classent ce minéral dans les tectosilicates (AUBERT *et al.*, 1978).

Enfin l'ordre de solubilisation des feldspaths observé ici rejoint celui obtenu par LAGACHE, 1965 et BARES, 1970 qui ont étudié respectivement l'altération de ces minéraux en milieu carbonique et la mobilité comparée des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Si}^{4+}$  dans un microcline perthitique. Alors que le premier auteur montre que le labrador se dissout plus vite que l'albite, et celle-ci plus vite que l'adulaire, il résulte des travaux du second que le feldspath sodique se dissout plus rapidement que son homologue potassique. La concordance de ces résultats n'est pas surprenante lorsqu'on sait que, dans ces diverses attaques, l'agent actif principal dans le réactif carbonique, l'eau et le triacide, est l'ion  $\text{H}^+$ . Seules diffèrent la concentration et la température, facteurs susceptibles de modifier les vitesses des réactions.

#### SOUS-CLASSE DES INOSILICATES

Théoriquement de par leur squelette structural constitué essentiellement d'une chaîne de tétraèdres à liaisons Si-O-Si, les pyroxènes devraient être plus résistants que les feldspaths, mais ce résultat n'est obtenu que pour un pyroxène pratiquement sain, sans substitution de Si par Al; une faible substitution ou altération du minéral suffirait à le rendre partiellement vulnérable; c'est le cas de notre échantillon dont la formule structurale dénote la présence d'aluminium et de sodium, ce qui le rapproche de l'augite et justifie son appellation de diopside augitique.

L'obtention d'un résidu essentiellement enstatitique après attaque de la forstérite contenant de l'enstatite comme impureté (tabl. III et fig. 2) est une des preuves de la grande résistance des minéraux pyroxéniques au réactif triacide.

La condensation de deux chaînes de pyroxènes donne une structure en rubans avec mise en commun d'oxygène; on a ainsi le groupe des amphiboles auquel appartient l'échantillon de gédrite étudié. Dans ce groupe, la substitution de Si par Al est plus fréquente et la gédrite est une amphibole particulièrement riche en aluminium. Les liaisons Al-O-Si plus nombreuses et la présence de beaucoup de Mg et Fe rendent la structure plus fragile que celle des pyroxènes et même celle des plagioclases. Le rapport R, égal à 3.7 dans le filtrat, est sensiblement le même

que dans le minéral initial, calculé à partir de la composition chimique, ce qui traduit une dissolution stoechiométrique de  $\text{SiO}_2$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et confirme ainsi la conservation de la structure dans le résidu.

#### SOUS-CLASSE DES PHYLLOSILICATES

Appartiennent à cette sous-classe le groupe des micas et celui des minéraux argileux.

Dans le groupe des micas, la phlogopite est presque entièrement détruite alors que la muscovite ne l'est que partiellement. Les valeurs du rapport R tirées des compositions chimiques des minéraux initiaux, 3.8 pour la phlogopite et 2.4 pour la muscovite, sont voisines des valeurs R dans les filtrats d'attaque, ce qui traduit encore une dissolution stoechiométrique de l'alumine et de la silice et confirme encore le maintien de la structure au cours de l'attaque. La richesse en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et MgO de la phlogopite serait un des facteurs déterminants de sa vulnérabilité; en effet, la formation des sulfates hydratés d'aluminium et magnésium entraîne la destruction rapide des couches octaédriques où deux silicium sur huit sont remplacés par l'aluminium. La sulfatation s'amorcerait surtout en présence d'une quantité suffisante de MgO dont les sulfates hydratés se forment plus facilement en milieu sulfurique (HACKSPILL et KIFFER, 1930); par ailleurs, les hydroxydes sont perpendiculaires au plan (001) dans la phlogopite, obliques dans la muscovite, ainsi les ions  $\text{K}^+$ , disposés entre ces plans et fortement liés dans la muscovite grâce à l'éloignement du proton  $\text{H}^+$  (BASSET, 1960); la disjonction des feuillets micacés est donc facilitée dans le cas de la phlogopite. Ces deux facteurs, présence de MgO et position des OH, expliqueraient la plus grande facilité de destruction de la phlogopite par rapport à la muscovite en milieu triacide.

Quant à la kaolinite, la destruction rapide de sa couche octaédrique, essentiellement aluminique donnerait accès à la couche tétraédrique silicique. Le rapport R égal à 2 dans le filtrat est le même que dans la formule théorique du minéral, ce qui confirme la solubilisation complète de ce dernier à l'attaque triacide; ce même rapport, qui était égal à 2.2 dans le minéral initial traduisait la présence de quartz que l'on retrouve dans le résidu d'attaque.

#### SOUS-CLASSE DES NÉOSILICATES

Dans les néosilicates, les tétraèdres  $\text{SiO}_4$  sont isolés les uns des autres par des cations hexacoordonnés tels que  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$ . Il n'y a pas de substitution de Si par Al, mais il existe des liaisons M-O-Si très fragiles (M = Mg ou Fe). C'est ce qui explique que le périidot

TABLEAU IV  
Vulnérabilité à l'attaque triacide et altérabilité naturelle des minéraux primaires

Vulnérabilité ou altérabilité décroissantes	SÉQUENCE TRIACIDE			SÉQUENCE DE GOLDISH		
	série feldspathique	minéraux ferromagnésiens	structure cristallo-chimique	minéraux ferromagnésiens	série feldspathique	
↓		OLIVINE	NÉOSILICATES Tétraèdres isolés	NÉOSILICATES Tétraèdres isolés	OLIVINE	PLAGIO. Ca
		PHLOGOPITE (BIOTITE)	PHYLLOSILICATES Tétraèdres et octaèdres en feuillets	INOSILICATES Chaînes simples	PYROXENES	
		MUSCOVITE		Chaînes doubles	AMPHIBOLES	
		AMPHIBOLES	INOSILICATES Chaînes doubles	PHYLLOSILICATES Tétraèdres et octaèdres en feuillets	BIOTITE	PLAGIO. Na
		PYROXENES	Chaînes simples		FELDSP. K	
		FELDSP. K	TECTOSILICATES Tétraèdres en réseau	TECTOSILICATES Tétraèdres en réseau	MUSCOVITE	
	QUARTZ			QUARTZ		
	PLAGIO. Ca					
	PLAGIO. Na					

(olivine) enstatitique considéré soit entièrement détruit, ne laissant dans le résidu que de l'enstatite, impurité du minéral initial.

## CONCLUSION

Il ressort de cette étude que tous les minéraux purs sont plus ou moins vulnérables au réactif triacide dont l'action aboutit, en général, à une simple solubilisation totale ou partielle du minéral.

Les minéraux secondaires ou de néoformation, tels que les hydroxydes et les argiles, sont entièrement solubilisés, ne laissant qu'un faible résidu quartzeux, n'entrant pas dans la composition structurale du minéral.

Les minéraux primaires sont tous partiellement solubilisés et le degré de solubilisation semble étroitement lié à la structure et à la composition chimique du minéral.

C'est ainsi que les minéraux les plus résistants des silicates sont les tectosilicates. Dans la sous-classe, la vulnérabilité augmente avec le degré de substitution de Si par Al et varie avec la nature des cations neutralisateurs. Le quartz est le plus résistant, suivi du feldspath K, puis du plagioclase Na et enfin du plagioclase Ca. Viennent ensuite les inosilicates constitués de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  en chaînes où l'attaque dépend également de l'importance des substitutions de Si par Al, de la nature et de l'abondance des cations neutralisateurs; les minéraux plus substitués et riches en Mg tels que la gédrite semblent les plus vulnérables. Dans les phyllosilicates, les minéraux plus riches en Mg, comme la phlogopite, sont les plus solubilisés.

Enfin les néosilicates (olivine), du fait de l'isolement des tétraèdres structuraux par des cations  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{2+}$  et de la fragilité des liaisons M-O-Si, n'offrent aucune résistance au réactif triacide.

Une séquence de vulnérabilité relative des minéraux primaires à l'attaque triacide, esquissée à partir des résultats précédents, comparée à celle établie par



GOLDISH, 1938 sur l'altérabilité naturelle des minéraux primaires dénote une inversion entre inosilicates et phyllosilicates (tabl. IV). On peut attribuer cette inversion au fait que, dans la nature, les feuillettes des micas sont souvent imperméables à l'eau; l'altération serait ainsi ralentie; par contre, à l'attaque triacide, tous les minéraux étant broyés à 200  $\mu$ , seules interviennent alors la structure cristalochimique et la composition chimique.

Cette étude montrant que la plupart des minéraux primaires subissent une solubilisation partielle à l'attaque triacide, il faudrait par conséquent interpréter le rapport R des filtrats d'attaque des sols par ce réactif avec beaucoup de prudence. En effet la valeur 2 de R ne signifierait pas toujours que le seul minéral du sol considéré soit de la kaolinite, puisque la solu-

bilisation des micas donne aussi des valeurs de R voisines de 2.

Cependant lorsqu'on pense avoir affaire à un minéral argileux pur ou à un sol très altéré dans lequel les minéraux résiduels sont constitués essentiellement de quartz et de feldspaths, la détermination du rapport R peut constituer un procédé de diagnose précieux.

#### REMERCIEMENTS

Nous remercions M. B. DABIN, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM qui a été à l'origine du sujet de cette étude et qui a bien voulu lire le texte et le proposer à la publication.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 11 mars 1980.*

#### BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), GUILLEMIN (C.), PIERROT (R.), 1978. — Précis de Minéralogie, Masson Paris, 335 p.
- BARES (L.), 1970. — Influence du broyage sur la vitesse de dissolution du quartz, de la calcite et d'un microcline perthitique, Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Toulouse, 89 p., *multigr.*
- BASSET (W.A.), 1960. — Role of hydroxyl orientation in mica alteration, *Bul. Geol. Soc. Am.*, 71, 4; 449-456.
- BAYENS (J.), 1936. — Les sols de l'Afrique Centrale, Bruxelles, 181 p.
- BOULET (R.), 1974. — Toposéquences des sols tropicaux en Haute-Volta. Equilibres dynamiques et bioclimat. Thèse Sc. Strasbourg, 330 p., *multigr.*
- BOURGEAT (F.), 1970. — Contribution à l'étude des sols sur socle ancien à Madagascar. Types de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. Thèse Sc. Strasbourg, 310 p., *multigr. Mém. ORSTOM*, n° 57, Paris, 1972, 336 p.
- CLAISSE (G.), 1968. — Etude expérimentale de l'analyse aux trois acides. Comportement du quartz à l'attaque triacide. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2 : 129-149.
- CLAISSE (G.), 1972. — Etude de la solubilisation du quartz en voie d'altération. *Cah. ORSTOM, Pédol.*, vol. X, n° 2 : 97-112.
- GOLDISH (S.S.), 1938. — A study in rock weathering. *J. Géol.*, 46 : 17-58.
- HACKSPILL, KIFFER, 1930. — *An. Chim.*, 10, 14 : 267.
- HARDY (F.) et RODRIGUES (G.), 1939. — Place du terme latérite dans la classification des sols. *Soil. Sc.*, 48 : 378.
- HARRISSON (J.B.), 1933. — The katamorphism of igneous rock under humid tropical conditions. Imperial Bureau of Soil Sc. Harpenden, England, 79 p.
- KRAUSS et FRIKE, 1927. — *Z. anorg. chem.* : 166-170.
- LAGACHE (M.), 1965. — Contribution à l'étude de l'altération des feldspaths, *Bul. Soc. Fr. Min. et Crist.*, 2 : 223-253.
- MAUGUIN (Ch.), 1926. — *Bul. Soc. Fr. Min.*, 51 : 285-332.
- MAUGUIN (Ch.), 1930. — *Bul. Soc. Fr. Min.*, 53 : 279-490.
- ROUBAULT (M.), 1963. — Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant. Lamare-Poinat, 365 p.