

Les phosphates d'uranyle et d'aluminium de Kobokobo. II. La phuralumite $\text{Al}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ et l'upalite $\text{Al}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3$, nouveaux minéraux

par MICHEL DELIENS,

Département de Géologie et de Minéralogie du Musée royal de l'Afrique centrale, B 1980 Tervuren, Belgique.

et PAUL PIRET,

Laboratoire de Chimie physique et de Cristallographie de l'Université, B 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

Résumé. — La phuralumite se présente en prismes jaune citron se débitant en plaquettes suivant un clivage {010} très prononcé. Longueur maximale des prismes : 1/2 mm. La densité mesurée est de 3,5 g/cm³. Biaxe négatif, 2V = 40°; n_g (jaune très pâle) = 1,624, n_m (jaune très pâle) = 1,616 et n_p (jaune vif) = 1,559. La phuralumite est monoclinique, $P2_1/a$, avec $a = 13,87 \text{ \AA}$, $b = 20,79 \text{ \AA}$, $c = 9,38 \text{ \AA}$ et $\beta = 112^\circ$; $Z = 4$; $d_{\text{calc.}}$ = 3,54 g/cm³. Les raies principales du diagramme de poudre sont : 10,4 Å (100) 020, 3,08 Å (80) 202-213-422, 5,17 Å (70) 040 et 3,40 Å (50) 242. La formule déduite de l'analyse chimique à la microsonde électronique (H₂O par différence) est : $\text{Al}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

L'upalite se présente en prismes aciculaires jaune ambre transparents. Longueur maximale des prismes : 1/3 mm. Le clivage {010} est marqué. La densité mesurée est de 3,5 g/cm³. Le minéral est biaxe négatif, 2V = 74°; n_g (jaune canari) = 1,676; n_m (jaune canari) = 1,666 et n_p (incolore) = 1,649. L'upalite est orthorhombique. Groupe spatial $Bbcm$ ou $Bba2$. $a = 34,68 \text{ \AA}$, $b = 16,81 \text{ \AA}$ et $c = 13,72 \text{ \AA}$. $Z = 16$. Densité calculée = 3,58 g/cm³. Les raies principales du diagramme de poudre sont : 8,4 Å (100) 020, 4,18 Å (80) 040, 3,43 Å (80) 004 et 2,903 Å (75) 10.2.2. La formule déduite de l'analyse chimique à la microsonde électronique (H₂O par différence) est : $\text{Al}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3$.

Les deux minéraux appartiennent au groupe structural de la phosphuranylite. Ils ont été découverts dans la pegmatite à béryl et à colombite de Kobokobo, Kivu, Zaïre. Les noms rappellent la composition chimique.

Mots clés : phuralumite, upalite, nouveaux minéraux, uranyl aluminium-phosphate, Kobokobo.

Uranyl and aluminium phosphates from Kobokobo. II. Phuralumite $\text{Al}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ and upalite $\text{Al}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3$, new minerals.

Abstract. — Phuralumite occurs as yellow lemon prismatic crystals. Perfect vertical cleavage {010}. Maximum length 1/2 mm. Density (measured) 3.5 g/cm³. Optically biaxial negative, 2V = 40°; n_g (pale yellow) = 1.624, n_m (pale yellow) = 1.616 and n_p (bright yellow) = 1.559. Phuralumite is monoclinic, $P2_1/a$ with $a = 13.87 \text{ \AA}$, $b = 20.79 \text{ \AA}$, $c = 9.38 \text{ \AA}$ and $\beta = 112^\circ$; $Z = 4$; $d_{\text{calc.}}$ = 3.54 g/cm³. The strongest lines of the X-ray powder pattern are : 10.4 Å (100) 020, 3.08 Å (80) 202-213-422, 5.17 Å (70) 040 and 3.40 Å (50) 242. Formula deduced from electron microprobe analysis (H₂O by difference) : $\text{Al}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Upalite occurs as acicular prisms. Colour : amber yellow, transparent. Maximum length : 1/3 mm. Cleavage {010} distinct. Density (measured) 3.5 g/cm³. The mineral is orthorhombic ; space group $Bbcm$ or $Bba2$ with $a = 34.68 \text{ \AA}$, $b = 16.81 \text{ \AA}$ and $c = 13.72 \text{ \AA}$. $Z = 16$. Calculated density 3.58 g/cm³. The strongest lines of the X-ray powder pattern are : 8.4 Å (100) 020, 4.18 Å (80) 040, 3.43 Å (80) 004 and 2.903 Å (75) 10.2.2. Upalite is biaxial, 2V(—) = 74°; n_g (canary yellow) = 1.676, n_m (canary yellow) = 1.666 and n_p (colourless) = 1.649. Formula from microprobe analysis (H₂O by difference) : $\text{Al}(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3$. Structural group of phosphuranylite, as well as phuralumite.

Both minerals occur at Kobokobo, Kivu, Zaïre, as crystalline crusts and veinlets on pegmatitic rocks. The names after the chemical composition.

Key words : phuralumite, upalite, new minerals, aluminium-uranyl-phosphate, Kobokobo.

INTRODUCTION.

La phuralumite et l'upalite ont été découvertes dans le gisement de pegmatite à béryl et à colombite de Kobokobo (Kivu, Zaïre).

Ces minéraux sont associés à une série de phosphates d'uranyle connus (méta-autunite, phosphuranylite) ou constituant des espèces minérales nouvelles. Sept nouveaux phosphates d'uranyle et d'aluminium ont ainsi été décrits dans une note préliminaire (Deliens et Piret, 1977) dans laquelle ils ont été provisoirement désignés sous les noms de minéraux A à G. Ce sont les minéraux A (phuralumite) et B (upalite) qui font

l'objet du présent travail. Un huitième phosphate d'uranyle et d'aluminium qui n'est pas repris dans la note préliminaire citée ci-dessus peut être intimement associé à l'upalite ; il est désigné sous le nom de minéral H à ce stade de l'étude du gisement.

Nous renvoyons le lecteur à Deliens et Piret (1977) et à Safiannikoff et Van Wambeke (1967) pour plus de détails sur la pegmatite de Kobokobo.

CARACTÈRES MACROSCOPIQUES.

La phuralumite se présente en cristaux prismatiques jaune citron disposés à la surface d'échantillons de

pegmatite à muscovite. Le minéral est associé à d'autres minéraux secondaires d'uranium tels que la méta-autunite et la phosphuranylite. L'association de la phuralumite avec les nodules jaune canari du minéral E (Deliens et Piret, 1977) est particulièrement fréquente (fig. 1).

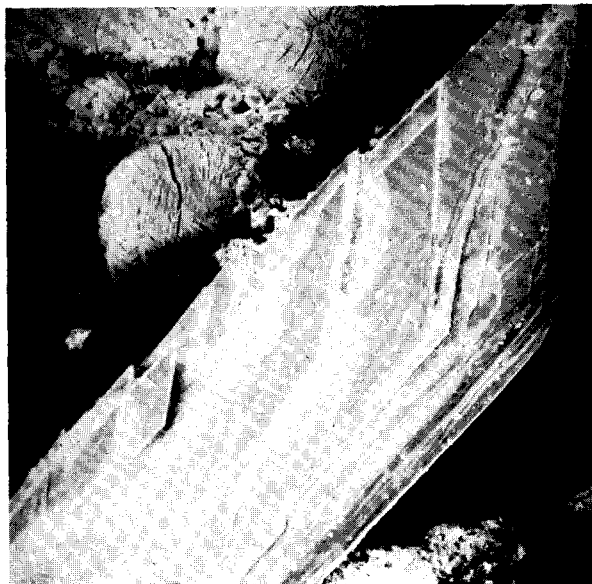


FIG. 1. — Plaquettes de phuralumite disposées sur des nodules du minéral E de Kobokobo. Microscope électronique à balayage $\times 160$.

Les cristaux de phuralumite sont allongés suivant $[001]$ et aplatis suivant $[010]$. Ils sont souvent terminés en pointe par suite de la présence de faces $(\bar{1}01)$ et (001) (fig. 2). Les 4 faces de la forme $\{110\}$ sont



FIG. 2. — Prisme isolé de phuralumite. Microscope électronique à balayage $\times 300$ (photo reprise de Deliens et Piret, 1977).

généralement présentes. Ces résultats proviennent de la mesure des angles interfaciaux au microscope et de la comparaison avec les angles calculés à partir des paramètres de la maille. Il existe un clivage $\{010\}$ parfait qui débite les cristaux en plaquettes minces (fig. 1). La longueur maximale des cristaux pris-



FIG. 3. Ensemble de prismes aciculaires d'upalite. Microscope électronique à balayage $\times 300$.



FIG. 4. — Détail des prismes aciculaires d'upalite montrant le débitage des cristaux en tablettes parallèles (partie supérieure de la photo). Microscope électronique à balayage $\times 800$.

matiques est de $1/2$ mm. La densité mesurée est de $3,5 \text{ g/cm}^3$; la dureté Mohs est proche de 3.

L'upalite se présente sous forme de minuscules aiguilles qui apparaissent comme des prismes aciculaires à section carrée sous un fort grossissement (fig. 3). La diagonale des sections est comprise entre

20 et 50 microns. Les prismes sont généralement terminés par des cassures à surface irrégulière. La face (001) n'a jamais été observée. La couleur est jaune ambre et la transparence parfaite. L'allongement est suivant *c*. Les formes {100} et {010} sont présentes et constituent de bons clivages ; {010} est légèrement meilleur que {100} et peut donner naissance à des tablettes (voir prisme supérieur de la fig. 4). La densité mesurée est de 3,5 g/cm³ (mesure effectuée par rapport à des liquides de densité connue) et la dureté Mohs est voisine de 3. L'upalite a également été identifiée sous forme d'amas de fibres microscopiques (moins de 100 microns de longueur) et sous forme d'inclusions aciculaires dans les tablettes micacées d'un nouveau phosphate d'uranyle et d'aluminium en cours d'étude (minéral H de Kobokobo).

L'upalite est rare mais facile à distinguer des autres phosphates d'uranyle du gisement grâce à sa section carrée.

CARACTÈRES OPTIQUES.

La phuralumite est biaxe négatif ; $2V = 40^\circ \cdot n_g$ (jaune très pâle) = 1,624, n_m (jaune très pâle) = 1,616 et n_p (calculé) = 1,559. Certaines sections offrent un pléochroïsme jaune citron à incolore avec un indice supérieur proche de la valeur de n_m et un indice inférieur compris entre les valeurs de n_m et de n_p (calculé). Orientation optique : X = *b* est perpendiculaire au plan des plaquettes (010) et Y est proche de la direction d'allongement [001] ($Y \wedge c = 0$ à 8°). La phuralumite n'est pas fluorescente aux UV.

L'upalite est biaxe négatif, $2V$ (calculé) vaut 74° . $n_g = 1,676$ (jaune canari), $n_m = 1,666$ (jaune canari) et $n_p = 1,649$ (incolore). L'orientation optique est la suivante : Z = *c*, X = *b* et Y = *a*. Le pléochroïsme est très fort. L'angle d'extinction est évidemment nul. L'upalite n'est pas fluorescente aux UV.

COMPOSITION CHIMIQUE.

L'analyse à la microsonde électronique sur un grain de chaque minéral a été effectuée au Laboratoire de Pétrologie de l'Université de Louvain. Les étalons suivants ont été utilisés : pour l'uranium, la métatorbernite ; pour l'aluminium, le saphir, le disthène et un verre synthétique ; pour le phosphore, l'apatite.

Dans les deux cas, le pourcentage d'eau a été obtenu par différence, étant donné les très faibles quantités de matière disponible.

Pour la phuralumite, les résultats expérimentaux sont mentionnés au tableau I (colonne *a*) avec en regard (colonne *b*), les pourcentages calculés à partir de la formule $Al(UO_2)_3(PO_4)_2(OH)_6 \cdot 10H_2O$; cette dernière formule a été vérifiée par la détermination complète de la structure (Piret *et al.*, 1978).

Pour l'upalite, la formule dérivant des résultats expérimentaux (tableau I, colonne *c*) est : $Al(UO_2)_3(PO_4)_2(OH)_3 \cdot 0,6H_2O$. (la densité calculée est dans ce cas de 3,61 g/cm³). En tenant compte de la valeur de la densité mesurée, soit 3,5 g/cm³, nous avons choisi la formule $Al(UO_2)_3(PO_4)_2(OH)_3$; les pourcentages calculés à partir de cette formule sont mentionnés dans la colonne *d*. La présence d'eau dans l'upalite

TABLEAU I.

Analyses chimiques de la phuralumite (a et b) et de l'upalite (c et d).

(*a et c* : pourcentages expérimentaux à la microsonde électronique, H₂O calculée par différence ; *b et d* : pourcentages calculés à partir des formules.)

	a	b	c	d
Al ₂ O ₃	7,6	7,6	4,0	4,7
UO ₃	65,9	64,2	80,2	79,6
P ₂ O ₅	10,3	10,6	12,3	13,2
H ₂ O	16,2	17,6	3,5	2,5
Totaux	100,0	100,0	100,0	100,0

n'est cependant pas exclue et ne pourra être chiffrée avec exactitude que par la détermination complète de la structure ou par la découverte de matériel supplémentaire pouvant être consacré à l'étude thermogravimétrique.

La précision des analyses est diminuée par le fait qu'il n'a pas été possible de polir parfaitement des cristaux de très petites dimensions.

DONNÉES RADIOCRISTALLOGRAPHIQUES.

Le spectre de poudre de la phuralumite est mentionné au tableau II. Les indices *hkl* ont été attribués en tenant compte des spectres de monocristaux. Ce spectre ne présente que peu d'analogie avec ceux des minéraux du même groupe structural.

TABLEAU II.

Spectre de poudre de la phuralumite.

Avec dans l'ordre : les distances *d* (Å) mesurées et calculées, les indices *hkl* et les intensités estimées visuellement (radiation CuKα, filtre de Ni, caméra de 114,6 mm). B = bande.

<i>d</i> (Å) _{mes}	<i>d</i> (Å) _{calc}	<i>hkl</i>	<i>I</i> _{vis}
10,4	10,40	020	100
8,0	8,02	011	20
6,63	6,67	021	5
6,08	6,10	120	10
5,40	5,33	121	10
5,17	5,20	040	70
4,32	4,36 4,34	21 $\bar{2}$ 211	10 B
3,95	3,96	150	5
3,75	3,73	231	10 B
3,47	3,47 3,47	40 $\bar{1}$ 060	40
3,40	3,39	24 $\bar{2}$	50
3,28	3,29	42 $\bar{1}$	5 B
3,08	3,10 3,08 3,08	202 21 $\bar{3}$ 42 $\bar{2}$	80
2,95	2,97	222	20
2,85	2,83	232	5
2,66	2,66	242	15
2,27	2,27	190	10
2,17	2,17	004	10
1,90	1,90	73 $\bar{2}$	15

Les spectres de rotation *b* et *c*, de Weissenberg *hko* et *hkl* et de précession *hol* à *h3l* ont donné les résultats suivants pour la phuralumite : système monoclinique avec $a = 13,87$ (2) Å, $b = 20,79$ (6) Å, $c = 9,38$ (3) Å et $\beta = 112$ (3)°. Le volume de la maille vaut 2 508 Å³; $Z = 4$. La densité calculée est de 3,54 g/cm³ (densité mesurée = 3,5 g/cm³).

Pour l'upalite, les spectres de rotation autour de *c* et les spectres de Weissenberg *hko* à *hkb* ont donné les résultats suivants : système orthorhombique;

TABLEAU III.

Spectre de poudre de l'upalite.

Avec dans l'ordre : les distances *d* (Å) mesurées et calculées, les indices *hkl* et les intensités estimées visuellement (radiation CuKα, filtre de Ni, caméra de 114,6 mm).

<i>d</i> (Å) mes.	<i>d</i> (Å) calc.	<i>hkl</i>	<i>I</i> _{vis.}
8,4	8,4	020	100
6,03	6,03	420	50
5,13	5,08	222	20
4,24	4,27	612	60
4,18	4,20	040	80
3,90	3,91	622	30
3,43	3,43	004	80
3,17	3,18	024	70
3,084	3,095	10.0.2	70
3,033	3,044	10.1.2	15
2,974	2,982	424	10
2,903	2,904	10.2.2	75
2,661	2,657	044	30
2,354	2,353	860	15
2,246	2,248	272	5
2,155	2,150	16.1.0	25
2,105	2,110 2,101	616 080	25
2,063	2,061	626	20
2,021	2,022	16.3.0	15
1,904	1,909	10.0.6	25
1,859	1,862	10.2.6	25
1,817	1,822	16.1.4	25
1,784	1,792	084	25
1,737	1,738 1,734	10.4.6 20.0.0	25

TYPE STRUCTURAL.

groupe spatial *Bbcm* (n° 64) ou *Bba2* (n° 41) ; $a = 34,68$ Å (8), $b = 16,81$ (3) Å et $c = 13,72$ (3) Å ; $Z = 16$. Densité calculée = 3,58 g/cm³. Le volume de la maille vaut 7 998 Å³.

Le spectre de poudre de l'upalite est mentionné au tableau III. Les indices *hkl* ont été attribués en tenant compte des intensités des réflexions sur les spectres de Weissenberg. On remarque que les indices *h* et *l* sont toujours pairs ; en effet, si on ne tient pas compte des réflexions très faibles, les paramètres *a* et *c* peuvent être divisés par 2 et on a : $a = 17,34$ Å, $b = 16,81$ Å et $c = 6,86$ Å, avec comme groupes spatiaux possibles : *Bb2₁m* (n° 36) ; *Bbm2* (n° 40) et *Bbmm* (n° 63). Le volume de la maille vaut 2 000 Å³ et $Z = 4$. Il est probable que seuls les ions Al et OH situés entre les feuillets décrits ci-après ne respectent pas ces paramètres réduits.

Les résultats de l'analyse chimique et les paramètres de la maille unité montrent que la phuralumite et l'upalite appartiennent au groupe structural de la phosphuranylite. En effet, dans le plan des feuillets [(UO₂)₃(PO₄)₂(OH)₂]_n²ⁿ⁻, $a = 13,87$ Å et $2c \sin \beta = 17,39$ Å pour la phuralumite ; $a/2 = 17,34$ Å et $c = 13,72$ Å pour l'upalite ; alors que pour la phosphuranylite $a = 13,75$ Å et $c = 17,38$ Å (Shashkin et Sidorenko, 1974). Par contre, le troisième paramètre est différent, soit 20,79 Å dans la phuralumite, 16,81 Å dans l'upalite et 15,95 Å dans la phosphuranylite. Les groupes spatiaux diffèrent également : *P2₁/a* pour la phuralumite, *Bbc** pour l'upalite et *C222₁* pour la phosphuranylite.

La structure de la phuralumite et de l'upalite est constituée de feuillets [(UO₂)₃(PO₄)₂(OH)₂]_n²ⁿ⁻ perpendiculaires à *b*, reliés entre eux par Al³⁺ et OH⁻ ; la disposition relative des feuillets étant différente dans les deux minéraux.

Les formules de structure sont respectivement :

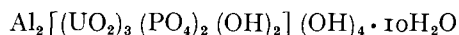


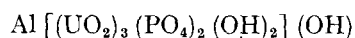
TABLEAU IV.

Données comparatives relatives à la phuralumite, à l'upalite, à la phosphuranylite et à la phurcalite.

Sont indiqués successivement : la formule, le groupe spatial, les paramètres dans le plan des feuillets [(UO₂)₃(PO₄)₂(OH)₂]_n²ⁿ⁻, le troisième paramètre, le volume de la maille, les densités mesurée et calculée et les références.

	Upalite	Phuralumite	Phosphuranylite	Phurcalite
Formule	Al(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₃	Al ₂ (UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆ ·4H ₂ O	Ca(UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₂ ·6H ₂ O	Ca ₂ (UO ₂) ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₄ ·4H ₂ O
Groupe spatial	Bbcm ou Bba2	P2 ₁ /a	C222 ₁	Pbca
Paramètres (Å)	13,72 (c) 17,34 (a/2) 16,81 (b)	13,87 (a) 17,39 (2c sin β) 20,79 (b)	13,75 (a) 17,38 (c) 15,95 (b)	13,59 (c) 17,43 (a) 16,06 (b)
Volume (Å ³)	7.998	2.508	3.812	3.804
<i>d</i> (g/cm ³)	mesurée : 3,5 calculée : 3,58	3,5 3,54	4,10 4,14	> 4,03 4,26
Référence	ce travail	..	Shashkin et Sidorenko, 1974	Deliens et Piret, 1978

pour la phuralumite et



pour l'upalite.

Le tableau IV permet de comparer la phuralumite, l'upalite, la phurcalite (Deliens et Piret, 1978 et Piret et Declercq, 1978) et la phosphuranylite (Shaskin et Sidorenko, 1974).

NOMENCLATURE ET CONSERVATION.

Les noms upalite et phuralumite rappellent la composition chimique de ces minéraux : uranium, phosphore et aluminium.

La description des deux nouveaux minéraux a été approuvée par la Commission des nouveaux minéraux de l'I. M. A. en juillet 1978, par 18 voix contre 0. Le nom upalite a été approuvé par 17 voix contre 0 et

une abstention ; le nom phuralumite a été approuvé par 18 voix contre 0.

Les échantillons types sont conservés dans la collection minéralogique du Musée royal de l'Afrique centrale à Tervuren. Ils sont enregistrés sous les numéros suivants : phuralumite 6.201 (holotype) et 6.195, 6.197 et 9.852 (cotypes) ; upalite 5.951 et 13.457 (holotypes) et 11.888 (cotype).

REMERCIEMENTS.

Nous remercions M. G. Comblain (MRAC) qui a contribué aux travaux d'identification et M. J. Wautier (Laboratoire de Pétrographie de l'U.C.L.) qui a réalisé les analyses à la microsonde électronique.

*Reçu sous sa forme définitive
le 2 novembre 1978.*

Accepté le 31 janvier 1979.

RÉFÉRENCES

- DELIENS, M. et PIRET, P. (1977). — Les phosphates d'uranyle et d'aluminium de Kobokobo. I. Données préliminaires. *Bull. Soc. belge Géol.*, 86, 183-194.
- DELIENS, M. et PIRET, P. (1978). — La phurcalite $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, nouveau minéral. *Bull. Minéral.*, 101, 356-358.
- PIRET, P. et DECLERCQ, J.-P. (1978). — Phurcalite, short structural paper. *Acta Cryst.*, B 34, 1677-1679.
- PIRET, P., PIRET-MEUNIER, J. et DECLERCQ, J.-P. (1979). — Structure of phuralumite, *Acta Cryst.*, B 35, sous presse.
- SAFIANNIKOFF, A. et VAN WAMBEKE, L. (1967). — La pegmatite radioactive à béryl de Kobokobo et les autres venues pegmatitiques et filoniennes de la région de Kamituga, Kivu, Rép. du Congo. *Mineralium Deposita*, 2, 119-130.
- SHASKIN, D. P. et SIDORENKO, G. A. (1974). — Crystal structure of phosphuranylite $\text{Ca}[(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 220, 1161-1164.
- STRUNZ, H. (1970). — Mineralogische Tabellen, A. V. G. éditeur, Leipzig, p. 355.