

chroïque peut être en principe déterminé si on connaît l'activité α spécifique de l'inclusion (nombre d' α émis par unité de temps) et, d'autre part, la loi qui relie l'intensité du halo au nombre total d' α . Les colorations dues aux radiations étant sensibles à la température, les halos pléochroïques devraient également fournir des informations intéressantes sur l'histoire thermique des minéraux qui les contiennent.

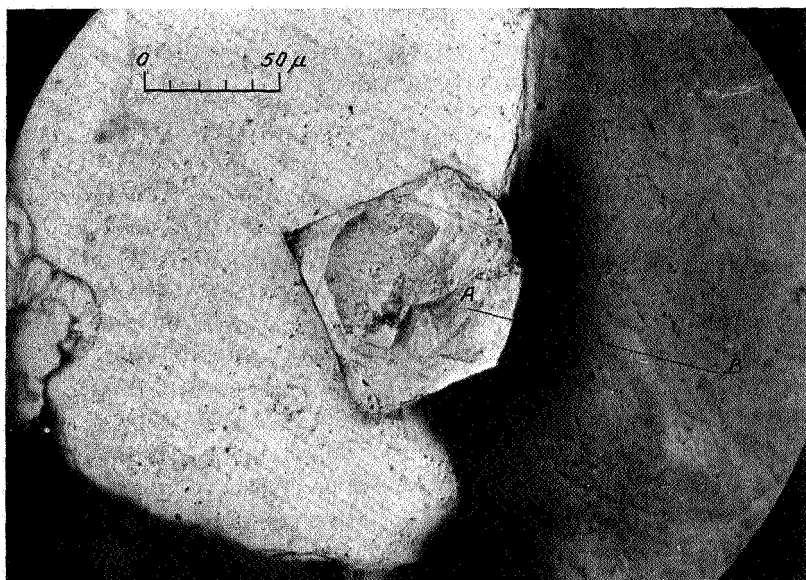


FIG. 1. — Microphoto. Au centre un zircon est placé entre la biotite et le quartz. Un halo intense est visible dans la biotite autour du zircon.

Une étude quantitative des halos pléochroïques est donc d'un grand intérêt pour le géologue, étant donné l'abondance de ces phénomènes dans les roches cristallines éruptives ou métamorphiques. Une telle étude pose deux problèmes expérimentaux difficiles :

Le premier est la mesure de l'intensité ou de l'état de développement du halo; les meilleurs paramètres sont basés sur la densité optique du halo par rapport au minéral normal. La mesure de densité implique l'utilisation de techniques microphotométriques assez délicates.

Le deuxième problème est la mesure de l'activité α spécifique des inclusions microscopiques. Leur activité étant de l'ordre de quelques particules α par jour ou par semaine, ce dernier

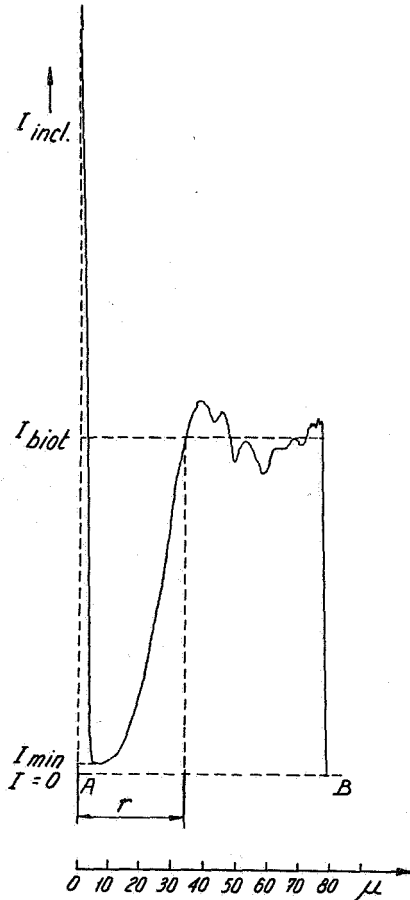


FIG. 2. — Enregistrement microphotométrique le long du profil A-B de la figure 1.

problème est resté longtemps insoluble. C'est la raison pour laquelle les essais de détermination d'âge à partir des halos sont restés infructueux jusqu'à ces dernières années. HENDERSON (1934) a réussi à éviter cette difficulté en se basant, non pas sur l'intensité absolue du halo, mais sur le rapport des

intensités de deux anneaux dus aux familles de l'U-238 et l'U-235. Cette méthode est malheureusement d'une application très restreinte vu la rareté des halos qui se prêtent à une pareille mesure.

La position du problème a été complètement changée par la mise au point et la production des émulsions photographiques « nucléaires » (POWELL et al., 1946) qui permettent l'enregistrement des trajectoires individuelles des particules α et la mesure d'activité de l'ordre de quelques α par jour.

Les autoradiographies α d'inclusions à halo pléochroïque ont apporté l'illustration directe du mécanisme de formation des halos (HEE, 1948; PICCIOTTO, 1949; COPPENS, 1950). La première application des émulsions nucléaires à des déterminations d'âge par les halos est, à notre connaissance, celle de HAYASE (1954). Pour exprimer l'état de développement du halo, cet auteur a choisi comme paramètre le « rayon » du halo, mesuré visuellement. Il nous semble inutile de discuter ici cet intéressant travail préliminaire car l'auteur a lui-même clairement exposé les hypothèses de travail et les améliorations à y porter.

Dans le présent travail, nous avons estimé l'intensité de coloration d'un halo par des mesures microphotométriques. Notre premier objectif a été de déterminer la relation existant entre l'intensité d'un halo et le nombre de particules α nécessaires pour le former. On peut aborder ce problème par deux voies qui se complètent mutuellement :

1° En étudiant la coloration provoquée en laboratoire par des irradiations avec des sources très intenses de particules ionisantes;

2° En étudiant l'intensité des halos et l'activité α spécifique des inclusions dans des roches d'âge connu.

Nous avons surtout investigué ce deuxième domaine jusqu'à présent, mais nous donnerons à la fin de cet article quelques résultats obtenus par des expériences d'irradiation artificielle.

II. — CONDITIONS DE MESURES.

Nous nous sommes jusqu'à présent limité aux conditions suivantes :

1° Pour être, autant que possible, assurés que l'âge des halos corresponde à l'âge de la roche dans son ensemble, nous avons étudié des roches granitiques de caractère magmatique, d'âge stratigraphique bien défini et n'ayant pas subi de métamorphisme important depuis leur formation.

2° Nous avons étudié les halos dans les biotites, à l'exclusion de tout autre minéral. On a choisi des échantillons dont les biotites sont exemptes d'altération hydrothermale ou superficielle et sont de coloration homogène.

3° Nous avons sélectionné les halos formés autour d'inclusions de dimensions grandes par rapport au parcours des α , c'est-à-dire ayant des dimensions linéaires supérieures à 50 μ , et occupant toute l'épaisseur de la section mince. Dans ces conditions, l'activité α spécifique de surface est pratiquement indépendante de la forme et de la dimension des inclusions.

4° Les mesures photométriques et d'activité α ont été effectuées sur des sections minces non couvertes de 30 à 35 μ d'épaisseur. Cette épaisseur correspond pratiquement à une couche épaisse pour l'émission α .

5° Les mesures photométriques ont été effectuées avec de la lumière blanche polarisée parallèlement à la direction d'absorption maximum de la biotite. Les observations à l'aide de filtres monochromatiques nous ont montré que le spectre d'absorption du halo est sensiblement le même que celui de la biotite normale. L'emploi de la lumière polarisée permet de travailler avec le maximum de contraste entre le halo et la biotite et de se rendre indépendant de l'orientation de la section par rapport aux éléments de symétrie de la biotite.

III. — CHOIX DES PARAMÈTRES.

a) Activité α . — Le halo étant dû aux particules α sortant de l'inclusion, le paramètre logique exprimant la dose reçue par la biotite est le nombre total d' α émis par cm^2 de l'inclusion pendant le temps de formation du halo (\mathcal{A}_T). La grandeur direc-

tement accessible à la mesure est l'activité de surface spécifique ou nombre d' α émis par cm^2 et par seconde (\mathcal{A}_S).

b) Intensité de noircissement. — Pour estimer l'intensité de la coloration, nous avons choisi un paramètre qui contient, à notre avis, le maximum d'information sur l'état de développement du halo : c'est l'intégrale de la densité optique mesurée le long d'un profil perpendiculaire à la bordure de l'inclusion; l'intégrale est prise sur tout le domaine noirci, c'est-à-dire depuis le bord de l'inclusion jusqu'au point où la densité optique du halo rejoint la densité optique moyenne de la biotite.

Les densités optiques sont exprimées par rapport à la transmission moyenne dans la biotite.

Soit :

x = distance perpendiculaire au bord de l'inclusion;

$I_h = I_h(x)$ = transmission en un point du halo;

\bar{I}_B = transmission moyenne de la biotite non affectée par le halo;

r = rayon d'action du halo (distance x pour laquelle $I_h = \bar{I}_B$).

$$\bar{D} = - \int_0^r \log_{10} \frac{I_h}{\bar{I}_B} dx.$$

Notons que \bar{D} a les dimensions d'une longueur et nous l'exprimons en μ dans ce qui suit. \bar{D} est proportionnel à l'épaisseur de la plage photométrée et nous l'exprimons pour une épaisseur standard de 25 μ .

Le but de ce travail est de rechercher sur les halos naturels les relations existant entre \bar{D} et la dose totale d' α . Cette relation est mal connue; on peut, d'après les observations qualitatives sur les halos et les résultats d'irradiations artificielles, schématiquement diviser l'évolution du noircissement en trois phases : une première phase où l'intensité du noircissement croît proportionnellement à la dose d' α , une phase de saturation où le noircissement reste constant et une troisième phase d'inversion où le minéral s'éclaircit à nouveau lorsque la dose augmente. On retrouve nettement ces trois phases de l'évolution du noircissement dans les profils photométriques des halos dont nous n'avons publié qu'un exemple ici. Les zones

saturées du halo se marquent par un palier horizontal dans la courbe photométrique; l'entrée dans la phase d'inversion se reconnaît très facilement au fait que le centre du halo devient plus clair que sa périphérie.

Il est clair que pour les mesures d'âge, c'est la première phase d'évolution qui est la plus intéressante.

On ne peut espérer trouver une relation universelle $\bar{D} = f(\mathcal{A}_T)$ valable pour toutes les biotites que si les deux conditions suivantes sont remplies :

1° La fonction f est la même pour toutes les biotites, c'est-à-dire que toutes les biotites ont même sensibilité aux α ;

2° L'effet de coloration obéit à la loi de réciprocité, c'est-à-dire dépend seulement de \mathcal{A}_T , quel que soit le temps nécessaire pour l'émission de cette dose; on peut écrire cette condition comme suit, t étant l'âge du halo :

$$\bar{D} = f(\mathcal{A}_T) = f(\mathcal{A}_s.t).$$

Cette condition implique qu'il n'y a pas d'effacement spontané du halo au cours du temps.

IV. — TECHNIQUE DE MESURES.

a) Mesure de l'activité α . — L'activité α de surface des inclusions a été mesurée sur des plaques Ilford C₂ pour recherches nucléaires de 100 μ d'épaisseur appliquées sur des sections minces, pendant des temps de l'ordre de 40 jours.

Pour la description des conditions de conservation et de développement de ces plaques, ainsi que le procédé de repérage des activités des inclusions, nous renvoyons aux autres publications de ce laboratoire (PICCIOTTO, 1949, 1956; HIEKE MERLIN et al., 1956).

b) Mesure du noircissement du halo. — L'évolution du paramètre D nécessite l'emploi d'un microphotomètre à enregistrement continu permettant de mesurer la transmission sur des plages de l'ordre de 10 μ^2 .

La photo 1 montre l'ensemble de l'appareil qui a été construit dans ce but.

Le microscope employé est un microscope Zeiss polarisant à éclairage incorporé. Sa platine est mue par un moteur synchrone d'horlogerie (1 tour/minute). Grâce à un système de démultiplication par vis micrométrique et par leviers, la vitesse de la platine dans la direction des y est de 10μ par minute.

Le microscope est muni d'un tube binoculaire en V. Sur le tube vertical est montée la cellule sensible (photomultiplicateur 1P28). Le tube oblique sert à l'observation simultanée du champ. L'éclairage est fourni par une lampe à filament de tungstène alimenté par un accumulateur. L'image d'une fente placée dans le plan du diaphragme d'ouverture de la lentille collectrice de la lampe est mise au point dans le plan de la préparation par un objectif à immersion (Koristka, $30\times$) disposé à la place du condensateur habituel. Cette fente limite ainsi dans la préparation une plage de $3 \times 10 \mu$. La préparation est observée à travers un objectif à immersion (Cooke, $45\times$). La lumière passe ensuite à travers le polaroïde analyseur, puis à travers un oculaire $10\times$ dont le verre d'œil a été enlevé. Dans le plan du diaphragme de cet oculaire se trouve une fente qui se superpose à l'image de la première fente et qui minimise la lumière diffusée par les régions extérieures à la plage photométrée. La lumière passe alors à travers un verre dépoli et arrive sur la cathode du photomultiplicateur. Celui-ci est alimenté par une haute tension stabilisée. Le courant du photomultiplicateur après passage dans un amplificateur de courant (adaptateur d'impédance) est transmis au potentiomètre enregistreur Brown.

La régularité d'avancement de la platine, la linéarité de la réponse du photomètre et la stabilité de l'ensemble ont été soigneusement contrôlées.

V. — GRANITES ÉTUDIÉS.

Les roches granitiques étudiées sont énumérées au tableau I. Elles sont réparties en cinq groupes d'âge : Éocène (orogénèse alpine), Crétacé (batholithe de Californie), Carbonifère (orogénèse hercynienne), Éodévonien (orogénèse calédonienne) et Précambrien (orogénèse kibarienne). Les âges absolus correspondants ont été attribués suivant l'échelle B de HOLMES, certains étant confirmés par des mesures directes par les méthodes au plomb.

TABLEAU I.

Granites étudiés.

Localité	Age stratigraphique	Age absolu Millions d'années
Monte Capanne (Elbe) Adamello (Alpes italiennes)	Éocène supérieur	40 (1)
Yosemite Park (Californie) Sierra Nevada (Californie)	Crétacé	100 (2)
Sainte-Marie-aux-Mines (Vosges) Lac Blanc (Vosges) La Bresse (Vosges) Saint-Amarin (Vosges)	Carbonifère inférieur	250 (1)
Inver (Écosse) Inver-diorite (Écosse) Aberdeen (Écosse) Bonawe Quarry (Écosse, Etive Complex) Allt Mhoille (Écosse, Etive Complex)	Silurien-Éodévonien	310 (1)
Kibara (Katanga, Congo Belge) Kalule (Congo Belge)	Précambrien, Kibarien Précambrien	1.000 (3)

(1) Échelle B de HOLMES (1947).

(2) Age sur zircons par α /Pb (LARSEN et al., 1954).

(3) Détermination complète par méthode au Plomb [LEDENT et al. (1956)].

VI. — RÉSULTATS DES MESURES.

Les mesures ont porté sur un total de 94 halos. Pour chaque halo, on a pris la moyenne de plusieurs profils photométriques. Les résultats sont donnés par la figure 3 qui montre la distribution du paramètre \bar{D} en fonction de la dose totale d' α . Cette dernière est obtenue en multipliant l'activité spécifique mesurée par l'âge attribué à la roche. On a tenu compte de la décrois-

sance radioactive en supposant un rapport $\text{Th}/\text{U} = 3$. Chaque point représente un halo, sauf les points accompagnés d'un chiffre entre parenthèses qui indique le nombre de halos sur lesquels on a fait la moyenne. Les points correspondant à des inclusions sans halo ont été placés sur la droite $\bar{D} = 1,5$.

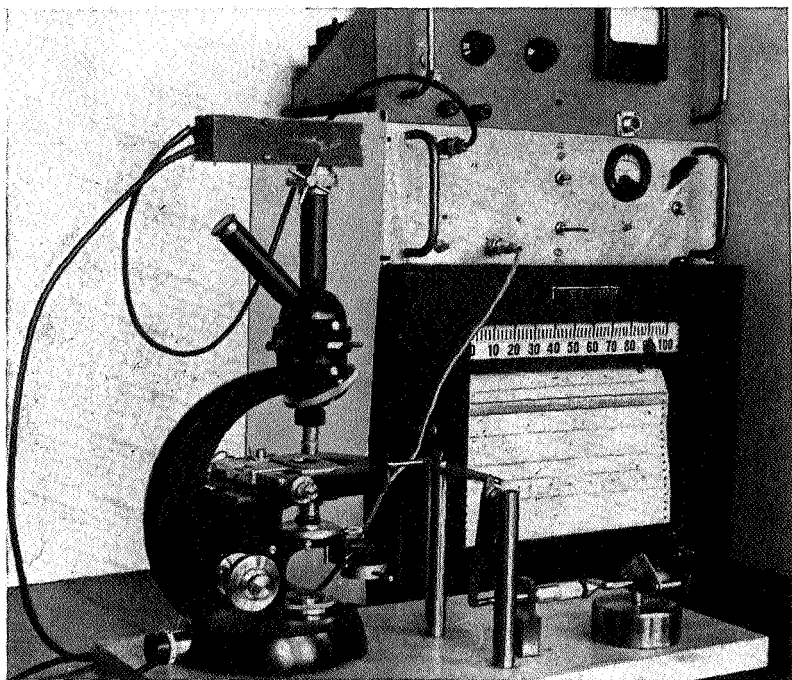


FIG. 3. — Photo du microphotomètre enregistreur décrit au paragraphe IV.

La distribution des points expérimentaux confirme les résultats obtenus dans notre publication déjà citée. Les nouveaux points se distribuent encore autour de la droite qui avait été calculée sur la base des résultats précédents comprenant une trentaine de halos seulement.

La dispersion des points demeure importante comme on peut s'y attendre pour diverses raisons expérimentales que nous ne discuterons pas ici; mais, à part le groupe des points pré-cambriens, cette dispersion ne montre pas de tendance systématique, notamment en fonction de l'âge. Ceci confirme que les deux

hypothèses formulées plus haut (même fonction f pour toutes les biotites et observation de la loi de réciprocité) ne sont pas fortement en défaut.

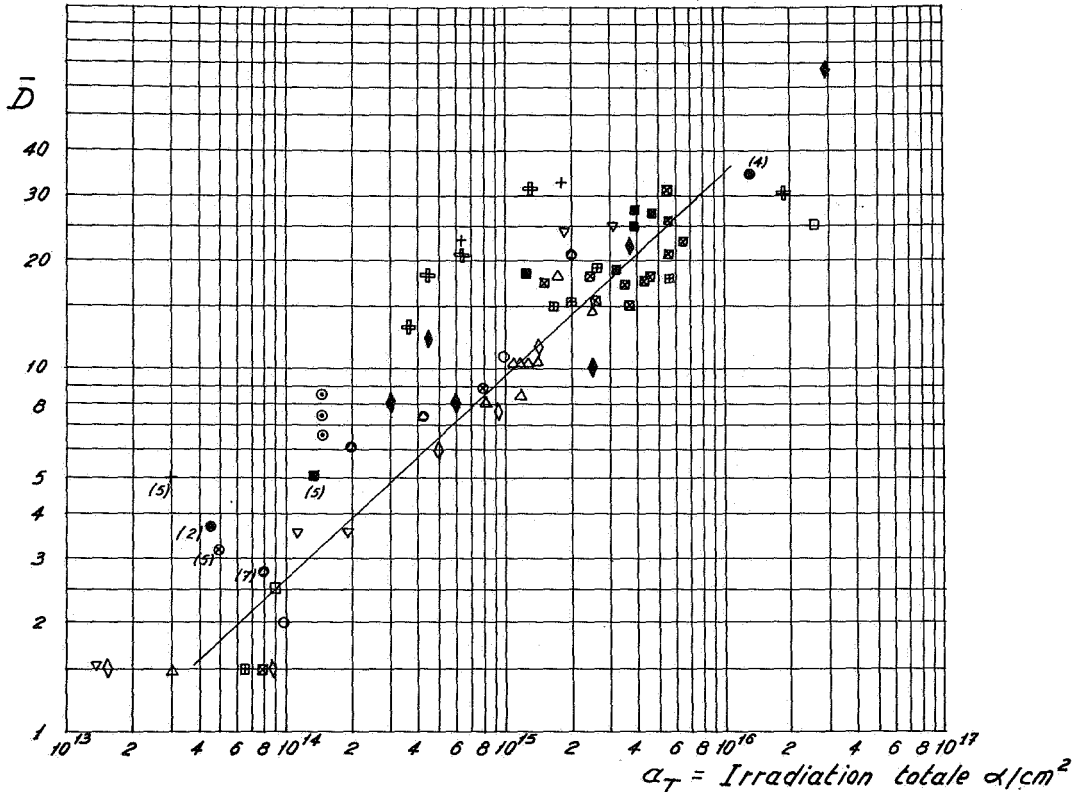


FIG. 4. — Évolution de la densité optique des halos en fonction de la dose totale d' α reçue par la biotite. Chaque point représente un halo.

Pour l'explication des signes, voir la légende de la figure 5.

La figure 4 représente \bar{D} en fonction de α_T . On a tracé le même réseau de lignes isochrones que dans l'article précédent. Tous les halos de même âge devraient tomber sur une même ligne isochrone. Le nouveau groupe de granites californiens de 100 millions d'années se place correctement entre les granites alpins et les granites hercyniens. Les granites d'Écosse montrent un âge systématiquement trop haut par rapport à 310 millions d'années, bien que l'écart puisse encore être attribué aux

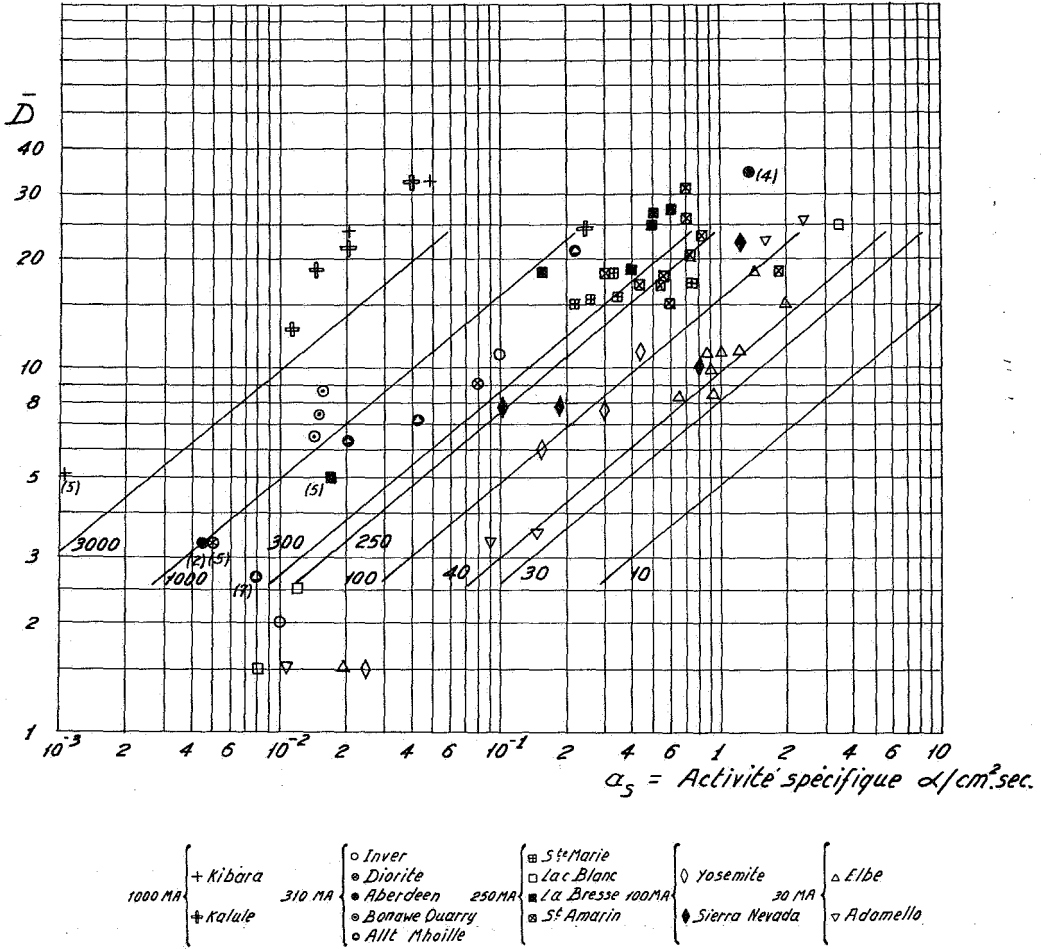


FIG. 5. — Densité des halos en fonction de l'activité spécifique de l'inclusion. On a tracé le réseau des droites isochrones dont les âges correspondants sont indiqués en millions d'années.

erreurs expérimentales. Les deux roches pré-cambriennes, par contre, donnent des âges supérieurs à 3.000 millions d'années, qui sont nettement aberrants mais qui s'expliquent, comme on le verra plus loin, par une sensibilité anormale des biotites.

VII. — IRRADIATIONS ARTIFICIELLES.

L'étude du noircissement provoqué par irradiations artificielles permet de vérifier si la sensibilité aux α des diverses biotites est réellement semblable. Nous donnons ici les résultats

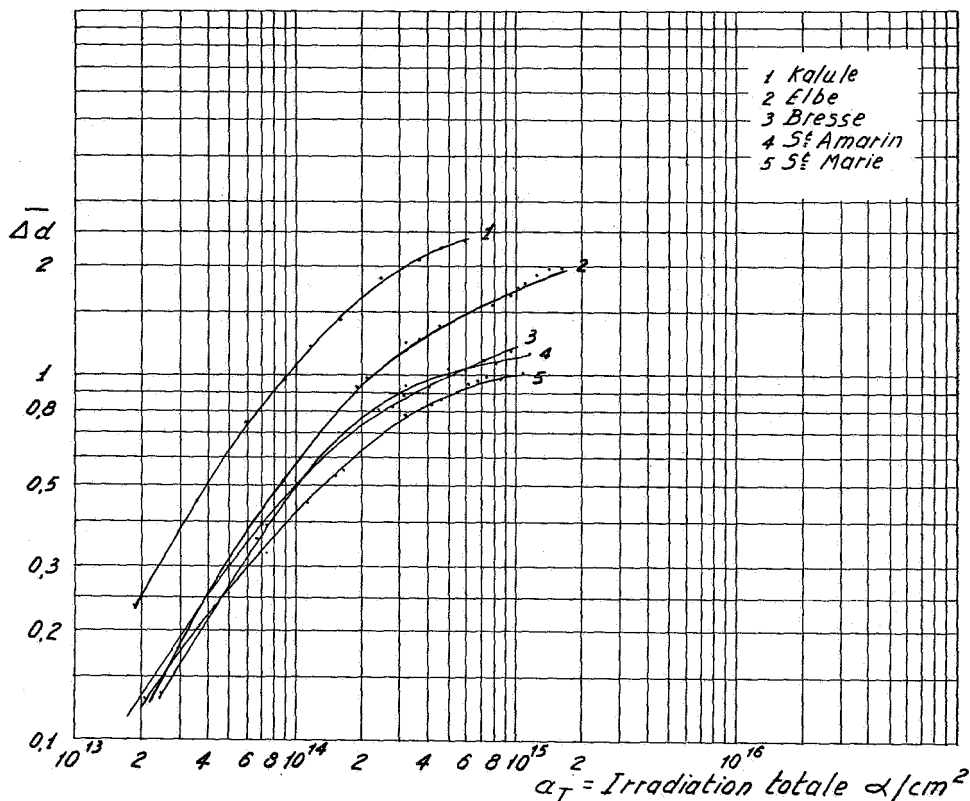


FIG. 6. — Noircissement par irradiation artificielle. Accroissement de la densité optique de biotites en fonction de la dose d' α reçue.

tats préliminaires d'irradiations effectuées sur certaines des biotites qui ont servi à l'observation des halos. Des fragments de clivage de biotite sont enfermés dans une ampoule de verre; cette dernière est remplie d'une quantité connue de radon et scellée. On a suivi au cours du temps l'accroissement de la

densité optique de la biotite, mesurée avec notre microphotomètre à travers l'ampoule de verre. Les résultats obtenus sur 5 des granites étudiés sont donnés dans la figure 6. A cause des différences dans les conditions géométriques d'émission des α , les courbes obtenues ne sont pas immédiatement comparables à celles des halos naturels. On peut raisonnablement supposer que les biotites donnant des courbes d'irradiations identiques auront la même sensibilité pour la formation des halos. Ces expériences, par contre, ne donnent pas beaucoup d'information sur la validité de l'hypothèse de réciprocité.

Les biotites des groupes 2, 3, 4 et 5 montrent un comportement très similaire jusqu'aux doses de $10^{14} \alpha / \text{cm}^2$ et divergent ensuite. La biotite du granite 1 (Kalule) montre un comportement différent des 4 autres : l'effet de coloration y est plus rapide et plus intense. Cette sensibilité exceptionnelle explique la position aberrante des points de Kalule sur le graphique. Ces premiers résultats suffisent à démontrer l'utilité de ces expériences d'irradiations artificielles. On peut dès maintenant affirmer qu'elles doivent nécessairement accompagner tout essai de mesure d'âge par les halos pléochroïques. Elles pourront permettre la détermination expérimentale de la fonction $\bar{D} = f(\alpha_T)$ dont la connaissance est nécessaire pour faire de cette méthode une méthode absolue de mesure d'âge.

L'ensemble des résultats exposés ici nous semble confirmer les espoirs exprimés dans notre article précédent, sur le grand intérêt géologique que présente l'étude quantitative des halos et justifie la poursuite des recherches entreprises dans cette direction.

REMERCIEMENTS.

Nous sommes reconnaissants aux Professeurs BIANCHI et HIEKE MERLIN (Padoue), DENAEYER et MORTELMANS (Bruxelles), MICHOT (Liège), PABST (Berkeley) et SILVER (Pasadena) d'avoir mis à notre disposition des échantillons et lames minces de leur collection et de nous avoir fourni des informations sur les âges géologiques.

Nous remercions très vivement le Professeur KIPFER, Conseil à l'Union Minière du Haut-Katanga (Bruxelles), pour sa collaboration qui a permis, avec l'aide technique de M. JANS, l'irradiation artificielle des biotites.

Nous exprimons notre gratitude aux Professeurs HOUTERMANS (Berne) et SCHÖN (Munich) pour des fructueuses discussions et suggestions.

Nous tenons à remercier Mlle STORMS, M. OCKUM et M. DEWAELEHEYNs pour leur aide technique.

Ce travail a bénéficié de l'aide financière de l'Institut Inter-universitaire des Sciences Nucléaires.

BIBLIOGRAPHIE.

- COPPENS, R., *C. R.*, **231**, p. 343 (1950).
- DEUTSCH, S., HIRSCHBERG, D. et PICCIOTTO, E., *Experientia*, **11**, p. 172 (1955).
- EBERHARDT, P., GEISS, J., VON GUNTEN, H. R., HOUTERMANS, F. G. et SIGNER, P., *Bull. Soc. belge Géol.*, (1956).
- HAYASE, I., *Am. Miner.*, **39**, p. 761 (1954).
- HEE, A., *Ann. de Geophys.*, **4**, p. 242 (1948).
- HENDERSON, G. H., *Proc. Roy. Soc. A*, **145**, p. 591 (1934).
- HIEKE MERLIN, O., PICCIOTTO, E. et WILGAIN, S., *Mem. Inst. Geol. Min. Univ. Padova*, **19** (1955).
- HOLLAND, H. D. et KULP, J. L., *Science*, **3**, p. 312 (1950).
- HOLMES, A., *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, **32**, p. 117 (1947).
- HURLEY, P. et FAIRBAIRN, H. W., *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **64**, p. 659 (1953).
- JOLY, J., *Phil. Mag.*, **13**, p. 381 (1907).
- KULP, J. L., VOLCHOK, H. L. et HOLLAND, H. D., *Am. Min.*, **37**, p. 709 (1952).
- LARSEN, E. S., GOTTFRIED, D. et WARING, C. L., *Nuclear Geology*, J. Wiley & Sons, p. 265 (1954).
- LEDENT, D., PICCIOTTO, E. et POULAERT, G., *Bull. Soc. belge Géol.*, **00**, p. 97 (1956).
- MOREHEAD, D. F. et DANIELS, F., *J. Phys. Chem.*, **56**, p. 548 (1952).
- MUGGE, O., *Zentralbl. f. Min.*, **397**, p. 226 (1907).
- PICCIOTTO, E., *Bull. Soc. belge Géol.*, **58**, p. 75 (1949).
- *Ibid.*, **00**, p. 122 (1956).
- POWELL, C. F., OCCHIALINI, G. P., LIVESEY, D. L. et CHILTON, L. V., *J. of Sc. Instruments*, **23**, p. 102 (1946).
- ZELLER, E. J., *Nuclear Geology*, J. Wiley & Sons, p. 180 (1954).
-
-