

La datation par luminescence

Antoine Zink et Elisa Porto

Résumé La luminescence peut être utilisée pour dater la dernière chauffe ou la dernière exposition à la lumière de minéraux. En effet, les minéraux accumulent de l'énergie au cours du temps provenant de la radioactivité naturelle. Sous l'effet d'une chauffe ou d'une stimulation optique, cette énergie est libérée sous forme de lumière. La quantité de lumière émise est donc proportionnelle au temps écoulé.

Mots-clés Thermoluminescence, luminescence stimulée optiquement, datation, dosimétrie, minéraux.

Abstract **Dating by luminescence**

The luminescence can be used to date the last heating or the last light exposure event of minerals. Indeed, the minerals accumulate energy during time coming from the natural radioactivity. Under the effect of a heating or an optical stimulation, this energy is drained and emitted in the form of a photon. The quantity of light is proportional to elapsed time.

Keywords Thermoluminescence, optical stimulated luminescence, dating, dosimetry, minerals.

La première mention scientifique incontestable d'un phénomène de thermoluminescence a été rapportée par Sir Robert Boyle le 28 octobre 1663 devant la Royal Society à Londres. Il s'agissait d'une expérience où ayant pris un diamant avec lui dans son lit « au contact d'une partie chaude de son corps nu », le diamant avait émis une « faible lueur » (rapporté dans [1]). Daniels *et al.* suggérèrent, parmi d'autres applications possibles, d'utiliser les propriétés dosimétriques de la thermoluminescence pour dater les minéraux et les céramiques archéologiques [2]. Ce fut chose faite en 1960 simultanément par deux équipes, une suisse [3] et une américaine [4]. Après une décennie de mise au point technique, la datation par thermoluminescence est devenue réellement opérationnelle au début des années 70.

Principe physico-chimique

Les minéraux (quartz, feldspaths, zircons) ont la faculté d'absorber et d'accumuler l'énergie provenant de la radioactivité ambiante et du rayonnement cosmique. Concrètement, l'énergie radioactive absorbée est transmise aux électrons des niveaux superficiels des atomes qui s'ionisent et se retrouvent dans la bande de conduction. De là, ils peuvent se déplacer librement dans tout le cristal. Toutefois, la plupart retournent à leur niveau initial en restituant l'énergie absorbée sous forme lumineuse : il s'agit de la radioluminescence. Mais du fait de l'imperfection du cristal, une partie des électrons se retrouvent piégés par des défauts, qui reçoivent le nom de pièges. L'agitation thermique fait qu'il existe toujours une certaine probabilité pour que les électrons piégés se libèrent et retournent à leur niveau initial en émettant de la lumière. La durée de rétention dans le piège peut être plus ou moins longue, de quelques fractions de seconde à plusieurs millions ou milliards d'années. Ce vidage peut être accéléré en apportant une énergie externe sous forme thermique ou optique : dans le premier cas, on parle de *luminescence stimulée thermiquement* ou plus communément de *thermoluminescence* (TL) ; dans le second cas, on parle de *luminescence stimulée optiquement* (ou OSL, pour « optical

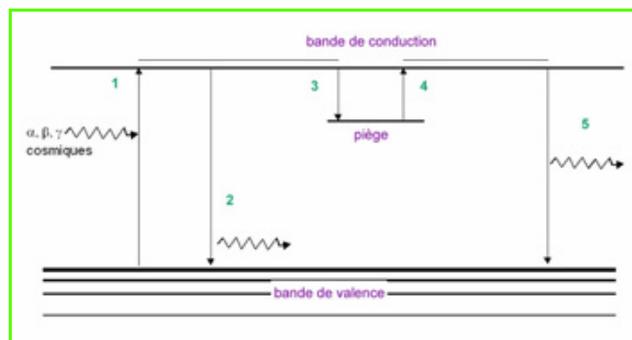


Figure 1 - Description du phénomène de la luminescence dans le modèle des bandes.

Passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction lors de l'irradiation (1) ; retour radiatif au niveau initial (2) ; piégeage par des défauts (3) ; sortie du piège spontanément ou par excitation thermique (thermoluminescence) ou optique (luminescence stimulée optiquement) (4) ; émission de photons (5).

stimulated luminescence ») (figure 1). Ces deux méthodes se caractérisent par le fait qu'il s'agit de phénomènes irréversibles : après la chauffe ou l'éclairement, les pièges sont vidés et le phénomène cesse. Elles se distinguent en cela d'autres phénomènes comme l'incandescence (ou l'émission du corps noir) et la photoluminescence, l'électroluminescence, etc.

Dosimétrie et horloge

Remise à zéro et accumulation sont les deux caractéristiques permettant l'application de la luminescence à la datation. En effet, pour pouvoir dater, on doit disposer d'une horloge, c'est-à-dire un phénomène physique évoluant avec le temps et comportant un instant remarquable. En l'occurrence, le phénomène est l'accumulation de l'énergie absorbée, c'est-à-dire de la dose : il s'agit donc d'une méthode dosimétrique, l'instant remarquable (ou initial) étant le dernier vidage des pièges. Celui-ci peut être la création du minéral

(stalagmites), une chauffe au-delà de 500-600 °C environ (céramiques, pierres chauffées), une exposition à la lumière, comme une journée avec un ciel couvert (sédiment éolien ou fluvial), ou un choc (faille sismique).

Toutefois, la datation ne se limite pas à la dosimétrie de l'objet. En effet, la mesure du débit de dose, ou dose annuelle, par des méthodes analytiques ou radiométriques permet d'obtenir un âge en faisant le rapport. L'équation d'âge est définie selon :

$$\text{âge} = \text{dose accumulée} / \text{dose annuelle}$$

Cette équation a de remarquable qu'elle donne un temps aux dimensions : c'est-à-dire que l'on obtient toujours un âge calendaire. À titre de comparaison, la méthode la plus connue de datation, le carbone 14, donne un âge dit C14 ; pour avoir un âge calendaire, on doit recourir à des calibrations externes, généralement au moyen d'une autre méthode de datation comme la dendrochronologie. On peut en fait décomposer l'équation d'âge en d'une part, le numérateur correspondant à l'horloge physique et d'autre part, le dénominateur qui joue le rôle de facteur correctif de l'erreur introduite par le milieu. D'un point de vue physique, le dénominateur représente ce que l'on sait de l'environnement de l'objet : l'horloge TL/OSL allant plus ou moins vite selon que l'on est dans un milieu très radioactif (ex : granites) ou non (ex : loess).

Applications

L'âge maximum est limité par le nombre maximum d'électrons pouvant être piégés en même temps. Étant lié à la saturation des pièges, il est fonction à la fois du taux de remplissage (dose annuelle) et de la nature du cristal étudié. Pour un minéral donné, cette saturation arrive plus ou moins rapidement selon la radioactivité ambiante. À titre d'ordre de grandeur, un quartz en milieu radioactif sature en 100 000 ans, alors qu'un feldspath en milieu faiblement radioactif peut n'être saturé qu'au bout de 700 000 ans. En comparaison, le carbone 14 ne permet pas de dater au-delà de 50 000 ans, et n'est calibré officiellement que jusqu'à 26 000 ans.

Concrètement, la gamme d'âge couverte par les méthodes de datation par luminescence s'étend donc de quelques dizaines d'années à 300 000 ans environ. Ainsi, l'ancienneté de l'homme moderne au Proche-Orient aux alentours de 100 000 ans a pu être mise en évidence par la thermoluminescence de silex chauffés [5]. Beaucoup plus près de nous, l'évolution depuis le milieu du XVIII^e siècle du système dunaire de Texel aux Pays-Bas a pu être datée par OSL [6]. La datation des céramiques conservées dans les musées est compliquée du fait de la méconnaissance de leur environnement de conservation. L'environnement actuel, en salle ou en réserve, n'est pas représentatif de l'environnement moyen rencontré par l'objet au cours de son histoire. Cela entraîne de fait une incertitude élevée sur la dose annuelle et donc sur l'âge. En effet, si les radiations alpha et bêta sont absorbées très rapidement par la matière, il n'en va pas de même pour le rayonnement gamma dont la contribution provient de plusieurs dizaines de centimètres autour de l'objet. Malgré cela, il est possible d'obtenir des résultats appréciables, comme sur la collection des figurines de Tanagra du Louvre, où l'emploi des méthodes de datation par luminescence ont permis de distinguer clairement entre les pièces authentiques (4^e-3^e siècles av. J.-C.) et les copies modernes de la fin du XIX^e siècle [7] (figure 2).

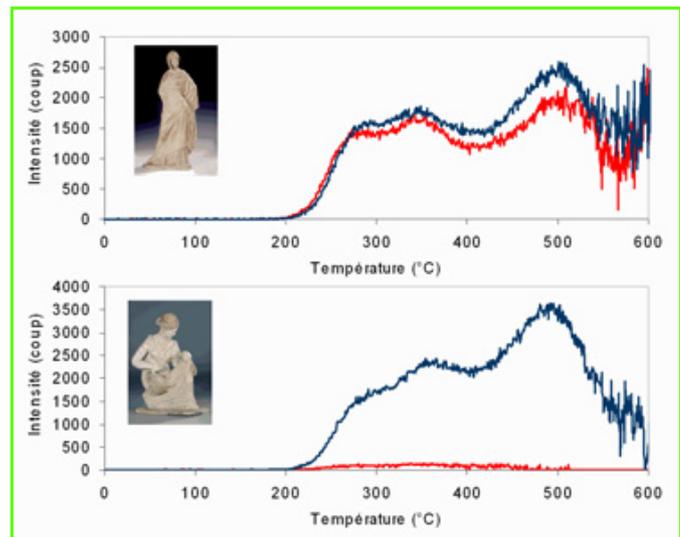


Figure 2 - Comparaison du signal de thermoluminescence de figurine de Tanagra (rouge) et de celui induit avec une dose connue en laboratoire (irradiation 3,5 Gray, noir).

(a) Cas d'une Tanagra authentique (n° inv. MNB 585, Musée du Louvre) ; (b) Cas d'une copie du XIX^e siècle (n° inv. CA6068, Musée du Louvre). Crédit photo : D. Bagault/C2RMF.

Conclusion

Si la prise en compte de la dose annuelle dans l'équation d'âge augmente les sources d'incertitudes (la précision est de l'ordre de $\pm 7\%$ sur un âge), elle a l'avantage de corriger l'erreur introduite par l'environnement. De ce fait, l'âge obtenu par luminescence peut être qualifié d'absolu. Ainsi, ces méthodes permettent de caler des chronologies relatives (stratigraphie, typologie), de calibrer d'autres méthodes physiques (archéomagnétisme) et de contrôler l'ancienneté d'artefacts.

Références

- [1] Aitken M.J., *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, Londres, 1985.
- [2] Daniels F., Boyd C.A., Saunders D.F., Thermoluminescence as a research tool, *Science*, 1953, 117, p. 343.
- [3] Grögler N., Houtermans F.G., Stauffer H., Ueber die datierung von keramik und ziegel durch thermolumineszenz, *Helvetica Physica Acta*, 1960, 33, p. 595.
- [4] Kennedy G.C., Knopf L., Dating by thermoluminescence, *Archaeology*, 1960, 13, p. 147.
- [5] Valladas H., Reyss J.L., Joron J.L., Valladas G., Bar-Yosef O., Vandermeersch B., Thermoluminescence dating of Mousterian "Proto-Cro-Magnon" remains from Israel and the origin of modern man, *Nature*, 1988, 331, p. 614.
- [6] Ballarini M., Wallinga J., Murray A.S., van Herteren S., Oost A.P., Bos A.J.J., van Eijk C.W.E., Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale, *Quaternary Science Review*, 2003, 22, p. 1011.
- [7] Zink A., Porto E., Luminescence dating of the Tanagra terracottas of the Louvre collections, *Geochronometria*, 2005, 24, p. 21.



A. Zink

Antoine Zink est ingénieur de recherche (Ministère de la Culture) et Elisa Porto est technicienne de recherche (Ministère de la Culture) au Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF)*.



E. Porto

* Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, UMR 171 CNRS-MCC, Palais du Louvre, Porte des Lions, 14 quai François Mitterrand, 75001 Paris.
Courriel : antoine.zink@culture.gouv.fr