



HAL
open science

La luminescence : Un bref éclairage sur une méthode de datation pour l'archéologie

Pierre Guibert, Norbert Mercier, Christelle Lahaye

► To cite this version:

Pierre Guibert, Norbert Mercier, Christelle Lahaye. La luminescence : Un bref éclairage sur une méthode de datation pour l'archéologie. *Reflets de la Physique*, 2019, 10.1051/refdp/201963008 . hal-02534991

HAL Id: hal-02534991

<https://hal.science/hal-02534991>

Submitted on 7 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La luminescence

Un bref éclairage sur une méthode de datation pour l'archéologie

Pierre Guibert (pierre.guibert@u-bordeaux-montaigne.fr)

Institut de Recherche sur les Archéomatériaux (UMR 5060 CNRS)
et Centre de recherche en physique appliquée à l'archéologie (IRAMAT-CRP2A)
Université Bordeaux-Montaigne, Maison de l'archéologie, 33607 Pessac Cedex

*Avec la collaboration de Norbert Mercier et de Christelle Lahaye,
membres de l'IRAMAT-CRP2A.*

La datation par luminescence repose sur la capacité des minéraux à stocker l'énergie provenant des particules émises par la radioactivité naturelle. Il est ainsi possible de dater la dernière exposition à la lumière d'un minéral ou encore son dernier chauffage.

Nous présentons ici les bases physiques et les récents développements de cette méthode de datation, plus proche de la réalité des situations archéologiques, telle que la prise en compte des effets de l'altération des objets dans le sol. L'analyse d'un grain unique permet de dater des événements correspondant à une brève exposition du grain à la lumière, comme la fabrication des mortiers de construction.

Chacun connaît l'importance du temps dans la perception des processus historiques. Au musée, en ville, sur un site archéologique, la datation est omniprésente pour caractériser l'ancienneté des objets observés, importante pour en retracer l'origine. Donner un âge n'est pourtant pas un acte si évident lorsqu'aucune inscription ou donnée historique écrite ne fournit l'information. De nombreuses voies de datation sont possibles selon l'objet d'étude, comme par exemple des procédés comparatifs (nous connaissons tous le style des constructions romanes ou gothiques) qui supposent l'existence d'un référentiel bien calé chronologiquement, cependant susceptible d'évoluer en fonction de l'accumulation des connaissances.

Nous nous intéresserons ici à l'une des méthodes physiques de datation, la luminescence. Cette méthode permet de remonter à la datation du dernier chauffage supérieur à 300°C ou à la dernière exposition à la lumière de minéraux, et couvre une bonne partie de l'histoire de l'homme (d'il y a 300 000 ans environ jusqu'à nos jours).

Elle a connu d'importantes évolutions ces dernières décennies, voire même un renouvellement des concepts depuis peu, sous l'effet conjugué de la réalité des terrains et des développements instrumentaux, dans le cadre des nouvelles problématiques archéologiques.

Luminescence cristalline, radioactivité et mesures d'âge

Nous rappelons ici succinctement les bases de la méthode de datation par luminescence. Un lecteur intéressé par un approfondissement du sujet pourra se référer à l'ouvrage de M.J. Aitken [1].

La datation par luminescence est une méthode paléodosimétrique. En ce sens elle est basée sur le fait que les minéraux naturels jouent le rôle de dosimètres, enregistrant la dose d'irradiation provenant de la radioactivité naturelle de l'objet lui-même et de son environnement. On mesure ainsi par luminescence (restitution sous forme de lumière) la quantité d'énergie accumulée depuis l'instant zéro à dater : la dose archéologique. Cela permet de déterminer la durée d'exposition à l'irradiation naturelle, connaissant par ailleurs le débit de dose absorbé annuellement par le minéral « dosimètre », que l'on suppose constant dans le temps. Le mode de mesure de la dose archéologique par luminescence se fait en général selon deux procédés qui donnent leur nom à deux méthodes jumelles :

- chauffage du minéral jusqu'à des températures voisines de 500°C, c'est la luminescence stimulée thermiquement (ou **thermoluminescence**, TL) ;
- éclairage, il s'agit alors de la **luminescence stimulée optiquement** (OSL).

>>>

leur localisation dans leur environnement. Pour ce qui concerne les méthodes paléodosimétriques, ce qui importe c'est l'énergie émise sous la forme de particules alpha (noyaux d'hélium), bêta (électrons) ou gamma (photons de haute énergie) au cours de la désintégration des radioéléments naturels. Les acteurs principaux sont l'isotope 40 du potassium (^{40}K), l'uranium (^{235}U et ^{238}U et leurs descendants jusqu'aux isotopes stables du plomb, ^{207}Pb et ^{206}Pb) et le thorium (^{232}Th et ses descendants jusqu'à ^{208}Pb). Ces radioéléments sont présents en quantité variable mais significative dans tous les matériaux et participent ainsi à l'irradiation naturelle. À cette radioactivité issue d'éléments de très longue période (de 700 millions d'années pour ^{235}U jusqu'à 14 milliards d'années pour ^{232}Th) s'ajoute celle du rayonnement cosmique qui, au niveau du sol, se trouve essentiellement composé de muons.

L'interaction d'une particule de quelques centaines de keV (kiloélectronvolts) avec la matière provoque des ionisations par transfert de son énergie à un électron, qui va se comporter lui-même comme une particule secondaire de moindre énergie. Il résulte de cette interaction en cascade un transfert de nombreux électrons (en nombre proportionnel à l'énergie absorbée) depuis la bande de valence vers la bande de conduction (fig. 1b). Autrement dit, des paires électron-trou apparaissent par irradiation.

Un trou électronique est une absence d'électron dans la bande de valence ; il se comporte comme un électron chargé positivement. La grande majorité de ces paires se recombine. Cependant, une petite proportion va être piégée et stabilisée par le système de défauts du cristal, les électrons au niveau de pièges à électrons (comme une lacune d'oxygène, chargée positivement), et les trous au niveau de pièges à trous (un centre aluminium par exemple, chargé négativement) (fig. 1c). L'effet de capture est cumulatif, et le nombre de charges délocalisées puis piégées durablement par l'irradiation est proportionnel à sa durée et à son débit, ce qui permet de dater.

À température ambiante, certains porteurs de charge peuvent rester des millions d'années dans cet état métastable, et c'est justement ceux-là qui sont pertinents pour la datation. Au fur et à mesure de l'irradiation naturelle, des pièges vont se

peupler progressivement. Une stimulation thermique (chauffage) ou optique (éclairage par de la lumière visible) permettra de libérer tout ou partie des électrons et trous piégés (fig. 1d). Des recombinaisons électron-trou vont donc se produire, accompagnées d'une émission de lumière, dont le spectre est lié au système de défauts et impuretés impliqué dans le processus (fig. 1e).

Le chauffage et l'éclairage des minéraux sont à l'origine des deux types de mesures et des deux types d'évènements principaux que l'on cherche à dater. Cela correspond à la « remise à zéro » du chronomètre. On peut ainsi avoir accès à l'âge de la dernière chauffe qui peut correspondre à la fabrication d'une céramique, au fonctionnement d'un foyer, à la chauffe d'un fragment de roche, à l'incendie d'un bâtiment. On peut aussi dater la fin de l'exposition des matériaux à la lumière : recouvrement des dépôts sédimentaires, dépôt de loess (sédiments éoliens), sables dunaires, mise en place des matériaux de construction dans un bâtiment et, depuis peu, la fabrication des mortiers de construction.

La mesure d'âge, qui est une mesure de la durée d'exposition à la radioactivité naturelle depuis l'instant zéro à dater, revient à déterminer deux grandeurs :

- la dose archéologique, ou quantité d'énergie (ramenée à l'unité de masse de matière) accumulée depuis l'instant zéro à dater, *via* un dépiégeage des charges par une stimulation thermique (TL) ou optique dans le visible ou le proche infrarouge (OSL). L'unité de dose dans le système SI est le **gray**, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$;
- la dose annuelle d'irradiation ou quantité annuelle d'énergie absorbée par le matériau qui a servi à la mesure de luminescence (Gy/année).

L'âge est obtenu par le rapport de la dose archéologique à la dose annuelle. Les mesures de dose archéologique par luminescence sont réalisées grâce à des équipements suffisamment sensibles, sur des phases minérales sélectionnées au préalable selon leur granulométrie et leur nature par extraction et traitements physico-chimiques, dans des conditions expérimentales évitant tout réchauffement ou éclairage parasite (fig. 2, p. 9). Le principe de la mesure consiste à comparer l'intensité lumineuse émise par le

matériau à dater avec celles générées dans le même matériau par une source d'irradiation artificielle, de débit connu, intégrée à l'équipement. Ceci assure en quelques minutes l'équivalent de l'irradiation naturelle de plusieurs millénaires.

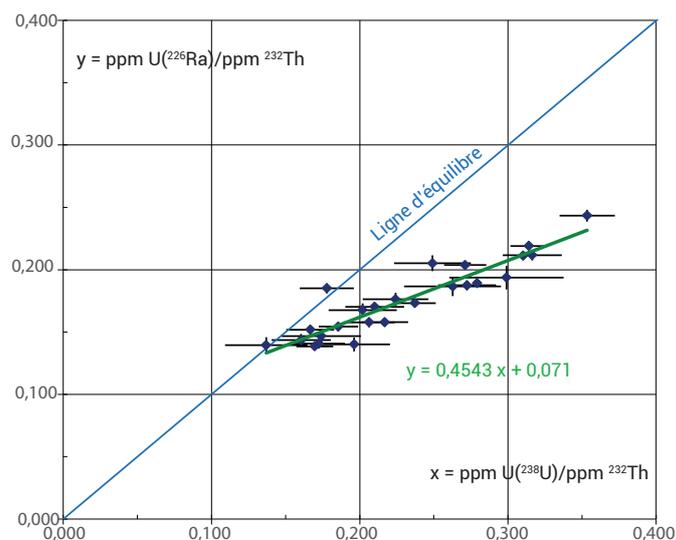
La dose annuelle, quant à elle, est en général déterminée à partir de mesures de la composition radiochimique de l'échantillon, de celle de matériaux composant l'environnement de l'objet daté ainsi qu'à partir de mesures directes de dosimétrie environnementale effectuées sur site.

Radioactivité naturelle et modèle d'irradiation standard

Plusieurs types de particules participent à l'irradiation naturelle des échantillons. Cela implique que le système radioactif associé à l'échantillon daté soit bien défini, car la portée des particules est très variable selon leur nature et leur énergie. On distingue les irradiations alpha, bêta, gamma, et celle par les muons cosmiques, dont les portées sont respectivement de l'ordre de 20 μm , 3 mm, plusieurs dizaines de centimètres et plusieurs dizaines de mètres dans les roches. Ainsi principalement, les particules alpha proviennent des grains analysés et de leur environnement immédiat ; les particules bêta proviennent de l'objet étudié (de dimensions pluricentimétriques) ; les rayons gamma proviennent de l'objet et de son environnement. La contribution du rayonnement cosmique dépend de la situation géographique, de la profondeur d'enfouissement et de l'effet d'écran du relief proche ou des structures architecturales en élévation.

Au départ, l'irradiation des objets est supposée de débit constant dans le temps, ce qui justifie que la mesure effectuée aujourd'hui reste transposable aux temps archéologiques. Cependant, les modifications de l'environnement (déplacement des objets, modifications architecturales... et pollutions nucléaires artificielles) et les processus géochimiques altérant les matériaux porteurs des radioéléments peuvent être à l'origine de variations du débit de dose.

En première approximation, l'irradiation est issue d'un milieu supposé homogène et isotrope à toutes les échelles. Cependant la simplicité de ce modèle n'a pas résisté très longtemps à la réalité de



3. Étude radiochimique par spectrométrie gamma de sédiments de l'abri de Roc de Marsal (Dordogne), site du Paléolithique moyen qui a révélé une probable inhumation d'un enfant néandertalien il y a plus de 60 000 ans. La spectrométrie gamma, en accédant aux émissions naturelles des séries de l'uranium, du thorium et du potassium 40, permet de déterminer les concentrations en radioéléments U, Th et K. Pour l'uranium, plusieurs radioéléments émetteurs gamma sont mesurés : ceux qui sont en rapport constant avec ^{238}U (comme ^{234}Th et ^{235}U), ceux qui descendent immédiatement du radium-226 (comme ^{214}Bi et ^{214}Pb) et sont en équilibre avec celui-ci dans les conditions de la mesure au laboratoire. Ces deux ensembles déterminent des teneurs équivalentes en élément parent, notées respectivement $\text{U}(^{238}\text{U})$ et $\text{U}(^{226}\text{Ra})$. Une différence significative entre elles met en évidence un déséquilibre (par rapport à la droite théorique en bleu), qu'il s'agit de caractériser, ce qui est le cas à Roc de Marsal où l'on voit que la teneur $\text{U}(^{238}\text{U})$ des échantillons est généralement supérieure à $\text{U}(^{226}\text{Ra})$. Une analyse détaillée par ailleurs [2], non explicitée ici, a permis de montrer l'existence d'un événement ancien d'altération des niveaux de sédiment archéologique, se traduisant par un enrichissement en uranium et non un appauvrissement en radium. Les deux possibilités aboutissent à des modèles d'évolution de la dose annuelle très distincts et, pour réduire l'incertitude de la datation, il était important de pouvoir déterminer quel processus avait été à l'œuvre.

l'hétérogénéité naturelle des matériaux à dater et du terrain. Les chercheurs ont dû développer des modèles et des outils analytiques qui tiennent compte des aléas du temps et des irrégularités radiochimiques spatiales. Ceci a conduit à modifier les stratégies d'échantillonnage, et à enrichir mais aussi, corrélativement, à complexifier les mesures analytiques.

Modéliser l'évolution de la radioactivité liée à l'altération des matériaux

La datation par des méthodes paléodosimétriques suppose que la radioactivité est constante dans le temps, hypothèse basée sur l'importance des périodes radioactives des radioéléments naturels (^{40}K , ^{235}U , ^{238}U et ^{232}Th), très largement supérieures aux âges archéologiques à mesurer (qui sont, au plus, de quelques centaines de milliers d'années), et sur le fait que les séries radioactives des actinides, uranium ou thorium, sont en

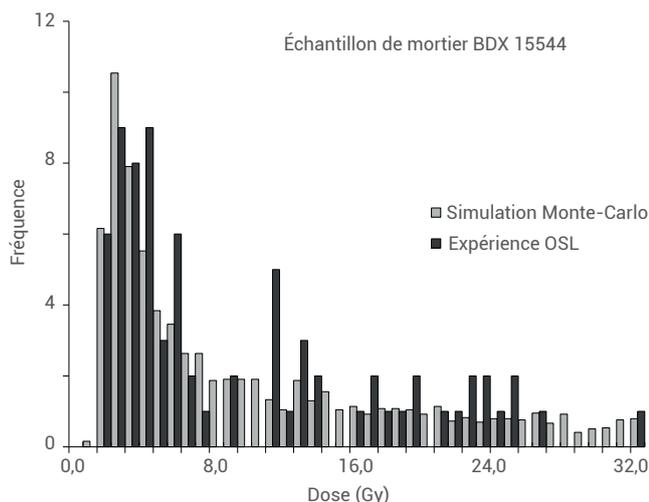
équilibre séculaire (la durée de l'activité des radio-isotopes successifs de la chaîne est identique et égale à celle des parents, de plus longue période : ^{235}U et ^{238}U). Or l'altération naturelle des minéraux dans le sol génère des modifications progressives de la composition radiochimique, par apport ou lessivage de certains éléments mobiles comme l'uranium et le radium sous l'effet des eaux d'infiltration. Ceci entraîne une évolution du débit d'irradiation durant les temps archéologiques, contredisant ainsi l'hypothèse de constance de la dose annuelle. En témoigne l'observation récurrente de déséquilibres dans les séries de l'uranium dans les sédiments, voire même dans les matériaux de construction, mis en évidence par des mesures de spectrométrie gamma de haute résolution en laboratoire. Ainsi, les propriétés chimiques des éléments de longue période dans les chaînes de désintégration de l'uranium (les parents ^{235}U et ^{238}U eux-mêmes, et leurs descendants de longue période comme ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra) étant très

différentes sur les temps archéologiques, des modifications de la composition en uranium ou en radium peuvent être observées selon la nature des inévitables processus d'altération subis par les matériaux enfouis. Un exemple type est donné par la figure 3, qui montre un déséquilibre dans des niveaux paléolithiques de la grotte de Roc de Marsal (Dordogne), que nous avons identifié comme le résultat d'un enrichissement des niveaux en uranium [2]. Pour la détermination de la dose annuelle, l'idée dorénavant est d'en déterminer la valeur moyenne au cours du temps et non plus de nous baser uniquement sur celle mesurée aujourd'hui.

La révolution du monograin : un changement radical d'échelle d'analyse

Une révolution dans le petit monde de la datation par luminescence est en marche depuis le milieu des années 2000, c'est la « révolution du monograin ». Traditionnellement la mesure de luminescence optiquement stimulée (OSL) est effectuée en déposant des dizaines, voire des centaines, de grains de quartz ou autres minéraux de dimensions comprises entre 100 et 300 μm extraits des échantillons à dater, sur des disques portoirs de 1 cm de diamètre. La mesure est globale et intègre la luminescence issue de tous les grains. Si cette pratique, l'OSL dite classique, fonctionne bien pour des dépôts éoliens (sédiments transportés par le vent), car la remise à zéro optique des minéraux lors de leur transport dans l'air est bien assurée, les dépôts fluviaux (sédiments transportés par des cours d'eau) ont longtemps résisté à la datation dans la mesure où nul ne pouvait garantir un éclaircissement suffisant des grains au cours de leur transport vers le lieu de dépôt. On observait en effet assez fréquemment des surestimations d'âge très significatives. Aussi, de nouveaux appareils dits monograin sont disponibles et permettent aujourd'hui l'analyse individuelle de minéraux en grains, disposés dans des cavités *ad hoc* usinées dans des disques de 10 mm de diamètre (100 emplacements sont disponibles pour chaque disque et un grain est déposé dans chaque emplacement). Un faisceau laser vient ainsi stimuler les grains les uns après les autres. Le changement d'échelle d'analyse

>>>



4. Datation de l'amphithéâtre Palais-Gallien, à Bordeaux (fin du 1^{er} ou 2^e siècle apr. J.-C.). À gauche : photo de l'amphithéâtre (cliché P. Guibert, IRAMAT-CRP2A). À droite : histogramme des doses archéologiques individuelles de grains de quartz issus des mortiers de fondation (en gris foncé) et comparaison avec la simulation Monte-Carlo la plus approchante (en gris clair). Il s'agit d'un ensemble de grains ayant été assez faiblement exposés à la lumière durant la fabrication du mortier (moins de 10 secondes à la lumière solaire en moyenne). On distingue le groupe des grains les mieux exposés qui présentent des doses inférieures à 8 Gy, tandis que de nombreux autres grains montrent une forte dose résiduelle d'origine géologique (radioactivité naturelle).

>>>

constitue la « révolution culturelle » des dateurs : nous devons repenser les choses en termes de grains individuels et de distributions statistiques et non plus en termes de grandeurs macroscopiques moyennes. Ainsi, il faut plusieurs milliers de grains et donc plusieurs milliers d'analyses pour produire une datation et disposer d'un échantillonnage suffisant, qui permette de séparer les données des grains qui ont été bien éclairés de ceux qui le furent insuffisamment lors du processus de transport ou d'éclairement que nous cherchons à dater.

Nous appliquons ainsi ce type d'analyse à la datation des mortiers de construction en vue d'établir la date de l'édification de structures architecturales [3, 4]. Les mortiers résultent en effet d'un mélange de sable et de chaux, et c'est le moment où les anciens bâtisseurs ont fabriqué le mortier qui nous intéresse, car il témoigne directement de la construction. Ce que l'on étudie, ce sont les grains de quartz. On montre qu'au cours du processus de mélange chaux/sable, les grains sont exposés à la lumière de façon très hétérogène : seule la surface du mélange est exposée, et ce n'est que lorsque les grains y parviennent au cours de leur brassage qu'ils sont éclairés durant un bref instant avant de replonger dans les zones sombres. L'exposition se distribue parmi les grains selon une exponentielle décroissante (les places au soleil sont chères !), et c'est ce que l'on observe au final avec les mesures de dose [5].

Aujourd'hui, on construit les outils statistiques pour modéliser les distributions observées (fig. 4) et des programmes prototypes pour traiter les données : nous sommes encore loin de la routine...

Modéliser la distribution de radioactivité à l'échelle microdosimétrique

L'évaluation des débits de dose induits par les différentes particules émises par la radioactivité naturelle reste, aujourd'hui encore, problématique à l'échelle des grains. Même si une mesure directe de l'effet des photons gamma interagissant dans la matière peut être facilement réalisée en déterminant la dose qu'ils y déposent à l'aide de dosimètres d'irradiation ou de sondes gamma, il en va tout autrement pour les particules alpha et bêta en raison de leurs faibles parcours (quelques dizaines de micromètres pour les alphas, et moins de 3 mm pour les bêtas). Aussi, une stratégie fondée sur l'utilisation de la modélisation et de la simulation numérique a-t-elle été développée. Pour cela, il est nécessaire d'accéder à la caractérisation précise du sédiment : il faut ainsi identifier les espèces minérales présentes, leurs dimensions, leur répartition spatiale, leur composition élémentaire et leur radioactivité.

La figure 5 montre l'image d'un bloc de sédiments d'environ 30 mm d'épaisseur

dont on distingue 14 couches selon la texture, la distribution granulométrique des grains minéraux et leur répartition. À l'aide du logiciel DOSI-VOX [6] développé dans notre laboratoire, ce bloc a été modélisé (partie centrale de la figure 5) : les grains constituant les sédiments sont représentés par de petites sphères en assurant un niveau de compacité équivalent à celui observé sur les images. Les éléments majeurs, tout comme les radioéléments, ont été affectés à ces sphères en respectant leurs concentrations moyennes, de manière à modéliser les différentes phases minérales présentes dans chacune des couches (grains de quartz, de feldspaths, calcite, argiles).

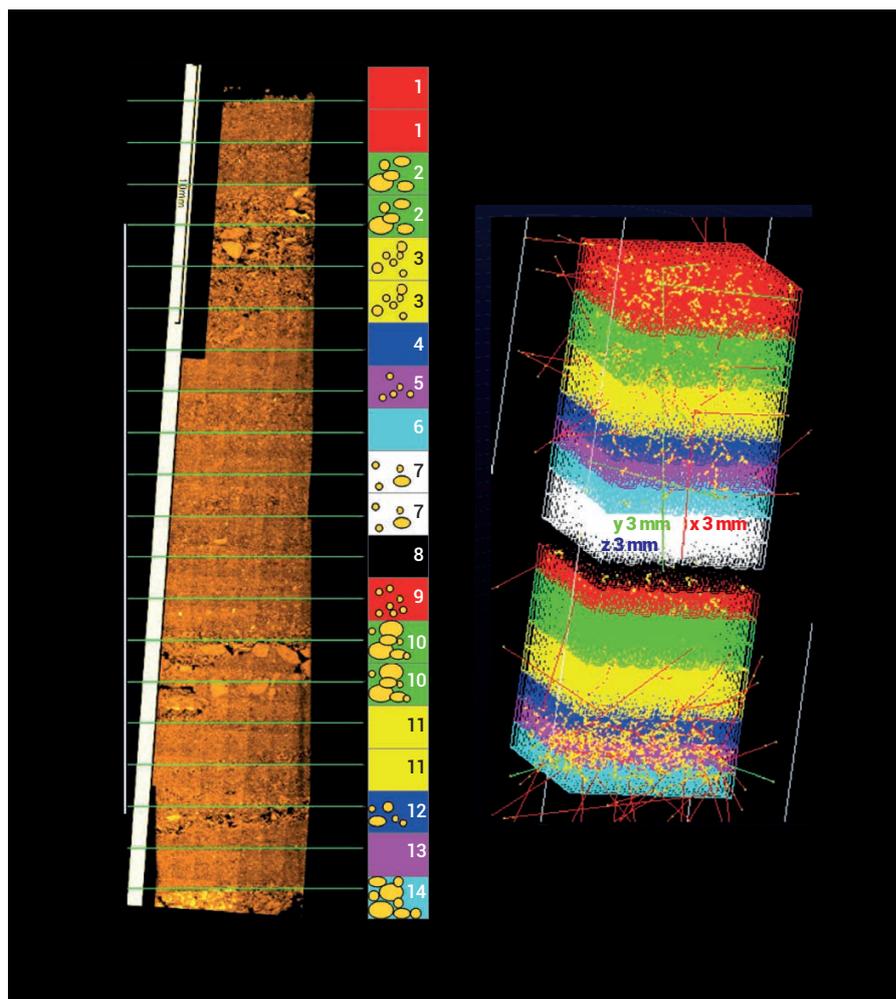
Après cette étape de modélisation, une simulation numérique de type Monte-Carlo a été lancée : les particules primaires ont été générées en fonction de la concentration de chaque radioélément (U, Th et K) et des taux de désintégration caractérisant chaque famille radioactive. La partie droite de la figure montre ainsi le trajet des particules émises dans le modèle (traits rouges et verts), et les points d'interaction des particules primaires et secondaires avec la matière (points jaunes), points où la dose est réellement déposée. En simulant des millions de particules primaires, il est ainsi possible d'obtenir une représentation 3D de la distribution de la dose pour les deux types de particules, alpha et bêta, dont la dosimétrie directe est toujours difficile.

Conclusion

Nous avons présenté dans ces pages quelques aspects de la recherche méthodologique sous-jacente à la datation par luminescence. Il s'agit d'une recherche sur le long terme qui suppose une accumulation progressive de faits, rarement médiatisés sauf à l'occasion de la découverte d'un nouveau fossile humain ou de la datation de sites célèbres. Cette recherche est interdisciplinaire. Elle suppose des connaissances en physique, en chimie des matériaux, mais aussi en géochimie, en dosimétrie des irradiations, en modélisation numérique, en archéologie ou en environnement selon les applications-cibles. Les champs à défricher restent immenses, les besoins augmentent, alors que le nombre de spécialistes stagne à un niveau plutôt réduit (moins de 1000 sur la planète, dont une douzaine en France, en comptant doctorants, postdoctorants et ingénieurs contractuels).

Parmi les défis sur lesquels les spécialistes de la datation se penchent aujourd'hui, nous pouvons citer l'extension de la méthode vers les grands âges, le million d'années. La saturation des niveaux pièges usuels de l'OSL reste le verrou principal, et on ne remonte guère encore aujourd'hui au-delà de quelques centaines de milliers d'années. La réduction des incertitudes de la datation demeure un défi permanent. Afin d'en améliorer la précision et la justesse (capacité de la méthode à fournir des âges avec des erreurs systématiques les plus faibles possibles), on teste régulièrement la capacité réelle de la méthode par des intercomparaisons de mesures d'âge sur des échantillons dont la chronologie est connue et validée. Les protocoles de mesure, qui tendent à se normaliser, sont basés sur la connaissance des processus de la luminescence dans les minéraux naturels. Cependant, cette connaissance est partielle et incomplète, ce qui justifie entièrement selon nous, des recherches fondamentales permanentes, par exemple sur la durée de vie des états métastables ou sur les mécanismes de transfert de charge et de luminescence, avec un objectif d'application en datation.

Ainsi, pour un physicien qui s'intéresse aux processus fondamentaux, la compréhension fine des phénomènes de luminescence dans les minéraux naturels reste un défi permanent pour parvenir à améliorer les performances et l'efficacité de la méthode. ■



5. Modélisation de la distribution de radioactivité naturelle d'un bloc de sédiment.

À gauche : image reconstituée de cartographie élémentaire, obtenue par spectrométrie de rayons X en dispersion d'énergie dans un microscope électronique à balayage (hauteur du bloc : 30 mm environ). Il s'agit d'un bloc de sédiment induré dans de la résine, dans lequel 14 couches ont été identifiées par observation à la loupe binoculaire, schématisées par le dessin du milieu. La partie droite de la figure montre une simulation Monte-Carlo de l'émission de particules bêta (traits rouges et verts), et les points d'interaction des particules primaires et secondaires avec la matière (points jaunes), points où la dose est réellement déposée et mémorisée, afin d'en déduire la distribution de dose annuelle bêta dans les différentes parties du sédiment.

Références

- 1• M.J. Aitken, *An Introduction to Optical Dating. The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-Stimulated Luminescence*, Oxford University Press (1998).
- 2• P. Guibert *et al.*, *Radiation Measurements*, **44** (2009) 223-231.
- 3• C. Sapin *et al.*, *Dossiers d'Archéologie*, **363** (2014) 38-49.
- 4• P. Urbanová et P. Guibert, *Geochronometria* **44** (2017) 77-97.
- 5• P. Urbanová et P. Guibert, *Mélanges de l'École française de Rome*, 129-1 (2017). <http://journals.openedition.org/mefrm/3633>
- 6• P. Guibert *et al.*, *Radiation Measurements*, **107** (2017) 48-57.
- 7• L. Martin *et al.*, *Ancient TL*, **33**, 1 (2015) 1-10.

Sites web

- www.aber.ac.uk/en/dges/research/quaternary/luminescence-research-laboratory/
- www.iramat-crp2a.cnrs.fr/
- <http://geochrono.free.fr/fr/tech/thermo/principe/tlprin2.html>