



Les méthodes de datation par luminescence appliquées aux objets du patrimoine

Antoine Zink, Elisa Porto

► To cite this version:

Antoine Zink, Elisa Porto. Les méthodes de datation par luminescence appliquées aux objets du patrimoine. Spectra Analyse, 2013, 292, pp.61-66. <hal-03152335>

HAL Id: hal-03152335

<https://hal.science/hal-03152335v1>

Submitted on 8 Jun 2022

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.



HAL Authorization

Les méthodes de datation par luminescence appliquées aux objets du patrimoine

Antoine Zink, Elisa Porto

Centre de Recherche et de Restauration des musées de France - palais du Louvre - Porte des lions - 14 quai François Mitterrand -75001 paris tél : 01 40 20 56 63 Fax: 01 47 03 32 46 antoine.zink@culture.gouv.fr

Résumé

La datation par luminescence regroupe une famille de méthodes physiques basées sur la capacité des minéraux à accumuler de l'énergie provenant de la radioactivité ambiante puis de restituer celle-ci sous forme lumineuse. Les méthodes les plus communes sont la thermoluminescence (TL) et la luminescence stimulée optiquement (OSL). Ces méthodes permettent de dater les terres cuites, les pierres chauffées ou encore les noyaux de bronze, dans un domaine d'âge allant de l'actuel à plus de 100 ka. Pour obtenir une datation précise, il est nécessaire de mesurer la dose annuelle reçue par l'échantillon. Toutefois dans le cas d'objets de collection dont les sites d'origine sont inconnus ou ont été détruits, il est possible d'estimer l'âge en reconstituant cette dose annuelle.

Mots-clés : Luminescence, dosimétrie, défauts cristallins

Abstract

Luminescence dating covers a group of physical methods based on minerals ability to accumulate energy coming from ambient radioactivity and then to release it as luminescence. The most common methods are the thermoluminescence (TL) and the optically stimulated luminescence (OSL). These methods can be used to date terracotta, heated stones or earth cores of bronze, in an age range starting from the present time to more than 100 ka ago. For an accurate dating, the measurement of the annual dose received by the sample is required. However in the case of objects coming from collections whose origin sites are unknown or have been destroyed, it is still possible to estimate the age by reconstructing the annual dose.

Keywords : Luminescence, Radiation dosage, Crystal defects

I - Introduction

La datation par luminescence est basée sur la capacité des minéraux à accumuler de l'énergie provenant de la radioactivité ambiante puis de restituer celle-ci sous la forme de lumière émise suite à une stimulation externe (principalement thermique ou optique), l'intensité lumineuse étant proportionnelle à l'âge écoulé depuis la dernière remise à zéro. Si ce principe peut sembler relativement simple, la méthode reste complexe, notamment à cause de l'évaluation du facteur de proportionnalité qui se décompose en deux parties : d'une part la proportionnalité entre intensité lumineuse et dose accumulée mesurée par des méthodes de luminescence proprement dites et d'autre part, la proportionnalité entre âge et dose accumulée, laquelle est évaluée grâce aux méthodes dosimétriques. Plutôt qu'une méthode, il s'agit d'une famille de méthodes et de techniques. La stratégie suivie dépend non seulement de la problématique de l'étude, des minéraux disponibles et du domaine d'âge envisagé, mais aussi de la culture scientifique et des techniques disponibles dans chaque laboratoire. De fait, il est difficile de présenter un protocole d'étude normalisé. Au contraire, chaque cas étudié peut conduire à développer une méthodologie *ad-hoc*, ce qui rend délicate toute comparaison entre laboratoires. Dans la suite de cet article, nous essayons de donner une vue d'ensemble de ces méthodes dans le cadre des objets culturels (artefacts) du patrimoine. Les applications aux domaines de la géologie, très en vogue de nos jours, sont hors de notre propos.

II - Matériels et méthodes

1. Principe

(figure 1)

Ces méthodes se basent sur la nature imparfaite des cristaux. Lors de l'irradiation, des électrons changent de niveau d'énergie ou sont éjectés. Si la plupart regagnent directement leur niveau initial, un certain nombre d'entre eux se retrouvent piégés dans les défauts du matériau. Selon la nature de ces défauts, la durée de rétention va de quelques fractions de secondes à plusieurs millions, voire milliard d'années. Toutefois, un apport de chaleur ou de lumière permet de vider le piège de son électron. Celui-ci peut alors se recombinaison avec un trou en émettant de la lumière (Figure 1).

Si l'on se restreint aux pièges dont les durées de vie sont grandes par rapport à l'âge recherché, et en admettant que cet âge soit suffisamment faible pour que les pièges ne soient pas saturés, on peut considérer que ces pièges se sont remplis de façon proportionnelle au temps d'irradiation écoulé. Nous avons donc là une horloge physique, puisqu'il s'agit d'un phénomène évolutif dans le temps pour lequel il existe un instant remarquable susceptible d'être daté. Cet instant remarquable, ou initial, est le dernier vidage des pièges. Dans le cas des artefacts, il s'agit essentiellement de chauffe. On peut considérer que la remise à zéro est totale pour une chauffe au-delà de 500-600°C environ. Cette horloge physique s'exprime au travers de la dose accumulée depuis la dernière remise à zéro, appelée paléodose. La conversion en âge (années) s'effectue en divisant la paléodose par la dose accumulée annuellement, ou dose annuelle.

$$\hat{\text{Âge}} = \text{paléodose} / \text{dose annuelle}$$

Cette équation est remarquable, car elle donne, aux dimensions, un temps. C'est à dire que l'on obtient toujours un âge absolu. On peut décomposer l'équation d'âge en, d'une part, son numérateur correspondant à l'horloge physique, et d'autre part son 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 allant plus ou moins vite selon la nature du milieu.

L'âge maximum est lié à la saturation des pièges. Il est donc fonction, et du taux de remplissage (dose annuelle), et de la nature du cristal étudié. L'âge minimum susceptible d'être mesuré ne dépend que de la sensibilité de la mesure. Concrètement, la gamme d'âge couverte par ces méthodes s'étend de quelques dizaines d'années à quelques centaines de milliers d'années.

2. Matériaux susceptibles d'être datés

Selon les techniques, les températures de cuisson des poteries se situent dans un domaine de température allant de 600°C (poteries communes) à 1200°C (grès), suffisant donc pour une remise à zéro totale du signal. Quant aux pierres chauffées, volontairement ou non, elles ont rarement subi de telles températures. Leur remise à zéro est donc partielle. Dans ce cas, la comparaison qualitative de la courbe de luminescence obtenue pour l'échantillon archéologique (signal naturel) avec celle obtenue après irradiation en laboratoire (signal induit) permet une évaluation de la température de chauffe et une sélection des échantillons les plus aptes à être datés. Dans le cas des verres (artificiels ou naturels), le désordre est trop élevé pour obtenir un signal de luminescence exploitable, même si régulièrement des tentatives sont menées sur le sujet. Il a aussi été mené des expériences sur les scories d'ateliers métallurgiques, en particulier à partir des inclusions de quartz. S'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode susceptible de dater les métaux, il est possible d'utiliser la luminescence pour dater indirectement les objets métalliques obtenus par la méthode de la cire perdue à partir des restes de moules en terre ayant été cuits lors de la coulée du métal (Figure 2).

3. Échantillonnage et préparation

(figure 2)

En pratique, l'échantillonnage et la préparation des échantillons sont relativement simple comparée en particulier aux méthodes isotopiques. Le paramètre le plus gênant étant l'exposition à la lumière, puisque celle-ci provoque une réduction du signal. Dans l'objet, seuls les grains en surface sont susceptibles d'être blanchis. Ceux-ci sont donc systématiquement éliminés avant d'effectuer le prélèvement. Typiquement les deux premiers millimètres sont retirés. Outre le problème de l'exposition à la lumière, cela permet d'éliminer l'interface susceptible d'être modifiée par le milieu (échange d'ions) et surtout la zone exposée aux radiations bêta provenant de l'extérieur.

Toute la préparation a lieu sous lumière atténuée, généralement de la lumière inactinique. Elle comporte deux étapes : tout d'abord l'élimination des carbonates et de la matière organique, puis la sélection des grains à mesurer.

Commune à l'ensemble des préparations, la première étape consiste donc à éliminer par attaque chimique les carbonates. En effet, les carbonates donnent un signal peu intense et peu reproductible. Lorsque cela s'avère nécessaire, des attaques à l'eau oxygénée éliminent les traces de matières organiques. La seconde étape porte sur la sélection des grains à mesurer. Elle varie au gré de la stratégie suivie par les laboratoires selon deux axes : minéralogie et granulométrie. Les minéraux les plus couramment utilisés sont le quartz ou le feldspath, car ils ont l'avantage d'être luminescents et abondants.

Le choix de la granulométrie peut être imposé par la distribution des grains, mais généralement, elle tient compte des propriétés dosimétriques des minéraux et de contraintes externes. Ainsi pour les quartz, minéraux qui ne contiennent quasiment pas de radioéléments, il sera possible d'utiliser de gros grains (150- 300 μm) auxquels on aura fait subir une attaque à l'acide (HF ou H_2SiO_6) afin d'éliminer les couches de surface, et donc, la contribution du rayonnement alpha (pénétration 20 μm). Ce traitement évite non seulement d'avoir à mesurer la dosimétrie alpha, mais aussi l'efficacité de ces alpha puisque celle-ci se distingue des autres rayonnements. À l'opposé, les grains fins (4-11 μm) se caractérisent par une homogénéité de la répartition de la dose alpha. Cela peut être utile si la contribution d'autres sources de rayonnement est mal connue, ce qui est en particulier le cas des échantillons conservés hors contexte.

4. Mesure de la luminescence

La mesure de la luminescence s'effectue sur des disques contenant soit une mono-couche de grains d'environ 1cm de diamètre, soit un nombre restreint de grains (en général cent) pouvant être mesurés individuellement. La méthode multi-grains permet d'avoir une bonne statistique de mesure, tandis que la méthode mono-grain permet la mise en évidence d'hétérogénéité et de populations distinctes de grains. Cette méthode est toutefois longue, car on estime que seuls 10 % environ des grains sont luminescents.

Les deux principales méthodes de mesure sont la thermoluminescence (TL) où l'échantillon est chauffé vers 500-650 °C et la luminescence stimulée optiquement (OSL selon l'acronyme anglo-saxon consacré).

Quelle que soit la méthode choisie, il s'agit de calibrer l'intensité lumineuse au moyen d'une source radioactive d'activité connue (Figure 3).

Il existe deux façons de procéder. Il est possible, d'une part (Figure 5), de travailler sur un même échantillon en mesurant tout d'abord le signal archéologique inconnu puis en irradiant, en laboratoire, l'échantillon avec différentes doses (mesure par régénération). Une mesure sans irradiation permet de contrôler le taux d'électrons repiésés après leur éviction des pièges (récupération). L'évolution de la sensibilité du signal au cours des cycles successifs d'irradiation et de mesure est corrigée au moyen d'une dose test répétée régulièrement. La validité de cette correction est contrôlée en refaisant à la fin de l'expérience l'irradiation initiale (recyclage). En choisissant judicieusement les doses, il est

possible d'encadrer la paléodose et donc de l'évaluer par interpolation, réduisant ainsi l'incertitude quant à la forme exacte de l'évolution du signal à la dose.

Cette technique est principalement mise en œuvre en OSL. En effet, les températures atteintes en TL induisent des changements dans le réseau cristallin et donc une modification forte de la sensibilité (création et/ou destruction de défauts). Une technique alternative (Figure 4) est donc de travailler avec plusieurs disques en parallèle. Certains servent à mesurer le signal naturel. Les autres sont irradiés avec des doses connues avant d'être mesurés (mesure par addition de doses). Il est alors possible de déterminer la dose par extrapolation. L'incertitude est plus élevée avec cette méthode.

5. Mesure de la dose annuelle

La dose annuelle peut être estimée indirectement à partir des teneurs en radioéléments naturels (séries de l'uranium, du thorium et potassium). Pour cela, on utilise les méthodes habituelles d'analyses élémentaires (fluorescence X, ICP-AES et spectrométrie de flamme pour le potassium, ICP-MS et activation neutronique pour l'uranium et le thorium). Dans ce cas, il faut tenir compte de la teneur en eau, celle-ci absorbant une partie de la radioactivité. Il est aussi possible de mesurer directement la radioactivité soit en laboratoire (comptage alpha, spectrométrie bêta, spectrométrie gamma bas bruit de fond) soit sur le terrain (spectrométrie gamma portable, dosimétrie TL). La contribution du rayonnement cosmique est généralement estimée à partir des données géographiques (latitude, altitude) et de la profondeur.

Dans le cas des œuvres de collections muséales, seule la radioactivité de l'objet lui-même est accessible à la mesure. Pour reconstituer la dose externe, nous nous sommes basés sur une compilation de doses gamma trouvées dans la littérature ou mesurées par nos soins (Castaing, Girod, et Zink 2004). Ces mesures (Figure 6) sont centrées autour de 0,9 mGy/a, avec trois *maxima* correspondant aux milieux peu radioactifs (0,3 mGy/a), moyennement radioactifs (0,9 mGy/a) et fortement radioactifs (1,2 mGy/a). La distribution de ces mesures est bien modélisée par une moyenne de 0,9 +/- 0,4 mGy/a. Toutefois, dans ces conditions, on ne peut guère espérer une incertitude sur l'âge inférieur à 12-15%.

III - Applications

1. Jade

Le jade est la gemme emblématique de la Chine ancienne. Le 'vrai' jade correspond à la néphrite ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), une solution solide évoluant entre deux termes : actinolite et tremolite, appartenant au groupe des amphiboles. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques est utile pour l'étude des problématiques archéologiques et patrimoniales des jades antiques, tel que la provenance, l'authentification ou le traitement thermique. Ce dernier point est particulièrement important pour comprendre comment des objets gravés finement ont pu être obtenus à une époque ignorant les métaux. La thermoluminescence a été utilisée afin d'étudier les défauts du cristal dans le but de mettre en évidence des traitements thermiques passés. La Figure 8 reporte la durée de vie des différents pièges. Les plus profonds dépassent le million d'années. L'étude par luminescence stimulée optiquement (sous 2,6 eV) montre que les sections efficaces optiques sont similaires à celles observées dans les quartz et correspondraient donc à des défauts communs aux silicates. Ainsi l'application de la TL pourrait permettre d'identifier des traitements thermiques antiques au delà de 500°C, voire de dater des jades chauffés. Nous sommes toutefois pratiquement limités par le caractère destructif de la méthode, et dans ce cas précis, au vu de la préciosité des objets, des techniques comme le Raman sont préférables pour la mise en évidence de traitement thermique (Chen *et al.* 2004).

2. La citadelle de Nishapour

L'ancienne cité de Nishapour, l'une des capitales du grand Khorasan (Iran oriental et régions limitrophes) comprend une ville basse (Shahrestan) et une citadelle (Qohandez). Les recherches archéologiques conduites au cours du XX^e siècle ont conclu à l'absence de trace d'occupations Sassanides (III^e – première moitié du VII^e siècle après J.-C.) et de niveau pré-islamique (avant 650 après J.-C.) en dépit des informations contraires obtenues à partir des sources historiques et toponymiques. Pour mieux comprendre la question de la fondation pré-islamique de la cité et ses relations avec les occupations postérieures, de nouvelles fouilles franco-iraniennes ont eu lieu sous la direction du musée du Louvre entre 2004 et 2009. Afin de compléter les données stratigraphiques, et d'établir une chronologie absolue, en l'absence d'artefacts diagnostiques (pièce de monnaie, céramique datées par ailleurs,...) des tessons provenant de différentes tranchées et unités stratigraphiques ont été datés par thermoluminescence. Celle-ci montre l'existence de trois périodes (Figure 9) à 485 av. J.-C. - 415 ap. J.C., 405 - 745 ap. J.-C. et 745 - 1165 ap. J.-C. il n'y a pas de relation univoque entre ces périodes et les unités stratigraphiques. En effet, un certain nombre de tessons sont venus contaminés des niveaux stratigraphiques postérieurs du fait de l'activité humaine. La combinaison avec des études par archéomagnétisme (pour cette méthode voir l'article de Lanos et Herve p. 39-45) ont permis de confirmer et de préciser cette chronologie en trois phases : (1) phase antique, (2) antiquité tardive (niveau Sassanide) et période Islamique (Rante et Collinet 2013).

3. Objets de musée

Les objets issus de collections de musées, présentent une double particularité. D'une part la nécessité de leur conservation et de leur intégrité physique impose que les prélèvements soient les moins invasifs possibles. Les quantités manipulées sont donc très faibles, quelques centaines de mg. D'autre part, les objets se trouvent hors contexte : l'environnement dans lequel ils se trouvent (salles d'exposition ou réserve) n'est pas représentatif de l'environnement qu'ils ont pu connaître dans le passé. Ainsi seules les contributions internes de la radioactivité peuvent être mesurées. La contribution externe ne pouvant être qu'estimée.

Cela conduit à sélectionner de préférence les grains fins, dont le diamètre est petit par rapport à la distance de pénétration des alpha. On peut donc considérer que ces grains ont reçu une irradiation homogène en alpha. La connaissance de la radioactivité alpha permet de réduire du même coup la part de la contribution de la radioactivité externe dans la dose annuelle totale.

3.1 Tanagra

Dans le cadre de l'exposition Tanagra - Mythe et Archéologie (Paris, 2003; Montréal, 2004, Valence 2010), 140 figurines des collections du musée du Louvre ont été étudiées en luminescence. La contribution de la radioactivité environnementale a été estimée a posteriori à partir des dates de production des tanagréennes (IV^e - III^e siècle av. J.-C.) (Figure 10). Le résultat est cohérent avec la faible radioactivité caractéristique de la Grèce continentale. En appliquant ces valeurs à l'ensemble des pièces, deux périodes se distinguent, l'une à 2300 ± 400 ans et l'autre à 150 ± 50 ans, en accord avec la redécouverte du site et l'entrée des pièces dans la collection (Zink et Porto, 2005).

3.2 Della Robbia

En 35 ans, près de 85 échantillons de l'œuvre des *della Robbia* ont été datés par luminescence dans notre service. Il ne s'agit pas de pièces conservées dans le sol, mais généralement exposées sur des murs à l'intérieur ou à l'extérieur. On ne peut donc utiliser la distribution modélisée établie sur la figure 6. Le théorème de superposition indique que la contribution des gammas à un endroit donné est la somme des contributions provenant

de chaque direction. Cette contribution est totale si le milieu matériel (sol, mur) est à moins de trente mètres (au delà, les gammas sont absorbés par l'air) et mesure plus de trente centimètres d'épaisseur. Pour une œuvre exposée à quelques mètres de haut, l'ensemble des gammas produits par le sol dans un rayon de trente centimètres est absorbé par l'œuvre, ainsi que ceux produits par le mur sur lequel elle repose. Ce n'est pas forcément le cas du mur opposé. Quant à la couverture, si elle existe, sa contribution peut être considérée comme faible : épaisseur réduite, matériaux peu radioactifs (bois) ou peu épais (tuiles). Donc, contrairement à un artefact enfoui recevant des gammas provenant de l'ensemble des directions, dans le cas d'une sculpture robbiesque, seulement 75 % des directions contribuent à la dosimétrie gamma. Ainsi la dose annuelle de la contribution gamma est évaluée à $0,65 \pm 0,4$ mGy/a. La contribution du rayonnement cosmique est évaluée à $0,25 \pm 0,03$ mGy/a, soit la dose reçue dans nos latitudes à la surface du sol (Zink et al. 2011).

3.3 Limpopo

Une étude préliminaire a été lancée sur onze sites de la province Limpopo (Afrique du Sud) afin de tester l'application de l'OSL aux poteries de l'âge du fer. La séquence chronologique de l'âge du fer est bien connue à partir de la typologie des céramiques et les sites ont été précédemment datés par carbone 14 (voir pour cette méthode l'article de P. Richardin pp.55-60). Toutefois, lors du démarrage de notre étude, les sites sélectionnés avaient déjà été détruits du fait des fouilles empêchant du même coup toute mesure de la radioactivité *in situ*. Pour reconstituer la dose environnementale, nous avons évalué les débits de dose à l'échelle régionale à partir de données issues de la littérature. Le résultat est dans l'ensemble satisfaisant (Figure 11).

IV - Conclusion

Nous avons présenté ici un ensemble d'applications des méthodes de datations aux objets du patrimoine. La thermoluminescence est utilisée en routine depuis le début des années 70 et la luminescence stimulée optiquement depuis le milieu des années 90. Pourtant, la complexité des paramètres à prendre en compte conduit à des adaptations perpétuelles des stratégies de datation et ne permet pas la mise en œuvre d'un protocole unique normalisé. Nous ne nous sommes pas non plus appesantis sur les conséquences de cette complexité sur la précision (médiocre) des mesures (Zink 2009). Ces méthodes, absolues mais peu précises, permettent de valider des hypothèses de datation avant que d'autres méthodes de datation, physico-chimiques ou non, viennent les préciser.

Bibliographie

Castaing J, Girod M, Zink A. 2004. *Radiation background due to radioactivity in palaces and museums: influence on TL/OSL dating*. J. Cult. Herit. 5:393–397.

Chen TH, Calligaro T, Pagès-Camagna S, menu M. 2004. *Investigation of Chinese archaic jade by PIXE and μ Raman spectrometry*. Applied Physics A 79:177–180.

Galbraith RF. 1990. *The radial plot: graphical assessment of spread in ages*. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 17:207–217.

Rante R, Collinet A. 2013. *Nishapur Revisited: stratigraphy and ceramics of the Qohandez*. Oxbow Books. Available from: <http://www.oxbowbooks.com/oxbow/nishapur-revisited.html>

Zink A. 2009. *Luminescence date and archaeological ages: An epistemology of the luminescence dating*. In: Cavulli F, Prudêncio MI, DIAS MI, editors. *Defining a*

Methodological Approach to Interpret Structural Evidence; Archaeometry. Vol. S2045. *British Archaeological Report*. Archaeopress. p. 113–116.

Zink A., Porto E., 2005. Luminescence dating of the Tanagra terracottas from the Louvre collections. *Geochronometria*, 24: 21-26

Zink A, Porto E, Castaing J, Quere G. 2011. Les méthodes physiques de datation appliquées aux robbiesques. In: Bouquillon A, Bormand M, Zucchiatti A, editors. *Della Robbia -dieci anni di studi/dix ans d'études*. SAGEP editori.

Zink A.J.C., Susino G.J., Porto E., Huffman T.N., 2012. Direct OSL dating of Iron Age pottery from South Africa – Preliminary dosimetry investigations. *Quaternary Geochronology*, 8: 1-9

Légendes des Figures

Figure 1 : Schéma de principe simplifié de la luminescence stimulée 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 & 5). Piégeage par des défauts (3). Sortie du piège, spontanément, par excitation thermique (thermoluminescence) ou optique (luminescence stimulée optiquement) (4).

Figure 2 : Prélèvement au cœur d'un noyau de bronze sous lumière rouge afin d'éviter d'effacer le signal lors de la manipulation (statue d'Hawthar'athat, Musée national de Sanaa, Yémen, inv. YM23206) Crédit photo T. Borel - C2RMF.

Figure 3 : Comparaison du signal de thermoluminescence de figurine de Tanagra (rouge) avec 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^{ème} siècle (n° inv. CA6068 - Musée du Louvre). Crédit photo D. Bagault - C2RMF

Figure 4 : Courbes de thermoluminescence (TL): en trait noir, le signal archéologique, en pointillé le signal archéologique avec un ajout de 7,5 Gy et en gris le signal archéologique avec un ajout de 15 Gy. La vignette représente l'évolution de l'intensité lumineuse avec la dose bêta. La dose archéologique correspond à l'intersection de la droite avec l'axe des x.

Figure 5 : Comparaison de la courbe de luminescence stimulée optiquement (OSL) du signal archéologique avec des courbes induites après irradiation alpha et bêta (en tireté, le signal de récupération obtenu en l'absence d'irradiation). La vignette représente l'évolution de l'intensité lumineuse avec la dose bêta et l'estimation de la dose équivalente bêta pour le signal archéologique et pour une irradiation alpha.

Figure 6 : Modélisation de la dose externe gamma susceptible d'être reçue par un artefact conservé dans le sol. Cet histogramme résulte de la compilation de données issues de 95 références bibliographiques et couvrant un ensemble de zones géographiques représentatif de la majeure partie du globe.

Figure 7 : Mesure de la radioactivité gamma dans le sol à l'aide d'un spectromètre NaI(Tl)

NanoSpec (Target GmbH) et spectre correspondant obtenu après 900 secondes. En rouge, les régions d'intérêt correspondant au potassium 40, au bismuth 214 (série de l'uranium) et au thallium 208 (série du thorium). Amas de tessons (briquetage) du site de Marsal - Pransieu, vallée de la Seille, fouille programmée MNA St Germain en Laye - Crédit photo A. Zink - C2RMF

Figure 8 : Densité des pièges en fonction de leurs durées de vie pour différents jades - néphrites [$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$].

Figure 9 : Représentation radiale (Galbraith 1990) des âges de différents tessons provenant de la citadelle de Nishapur (Iran). Les rayons tiretés correspondent à l'âge moyen de chaque groupe, tandis que la zone colorée correspond à une incertitude de 2 sigma.

Figure 10 : Distribution de la dose gamma théorique reçue par les figurines Tanagréennes des collections du Louvre et comparaison avec la distribution de la dose gamma déduite des teneurs en radioéléments des œuvres elles-mêmes.

Figure 11 : Âges obtenus par luminescence pour les poteries du Limpopo (Zink *et al.*, 2012). En vert, date obtenus à partir de la modélisation de la dose externe gamma à l'échelle mondiale (figure 6), en rose, les dates obtenues en se basant sur les teneurs en radioéléments des poteries elles-mêmes, en bleu les dates obtenues en se fondant sur la dosimétrie à l'échelle régionale. Les rectangles rouges indiquent les datations des tessons d'après leurs cultures respectives indiquées à droite du graphique.

Figure 1

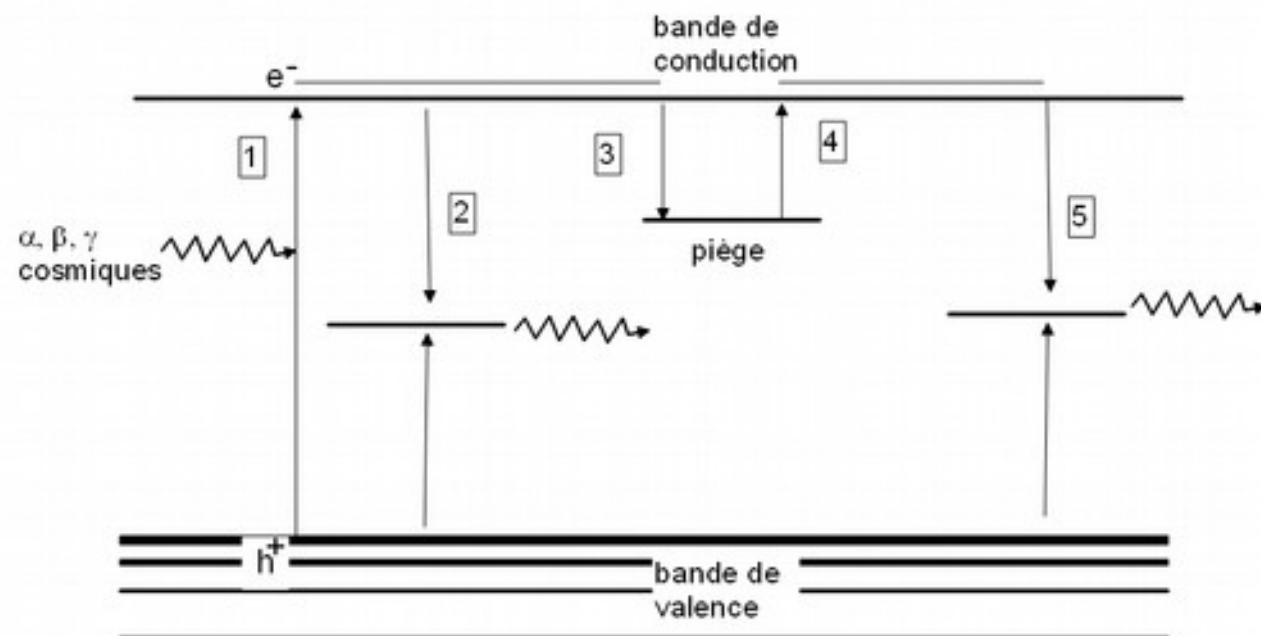


Figure 2



Figure 3

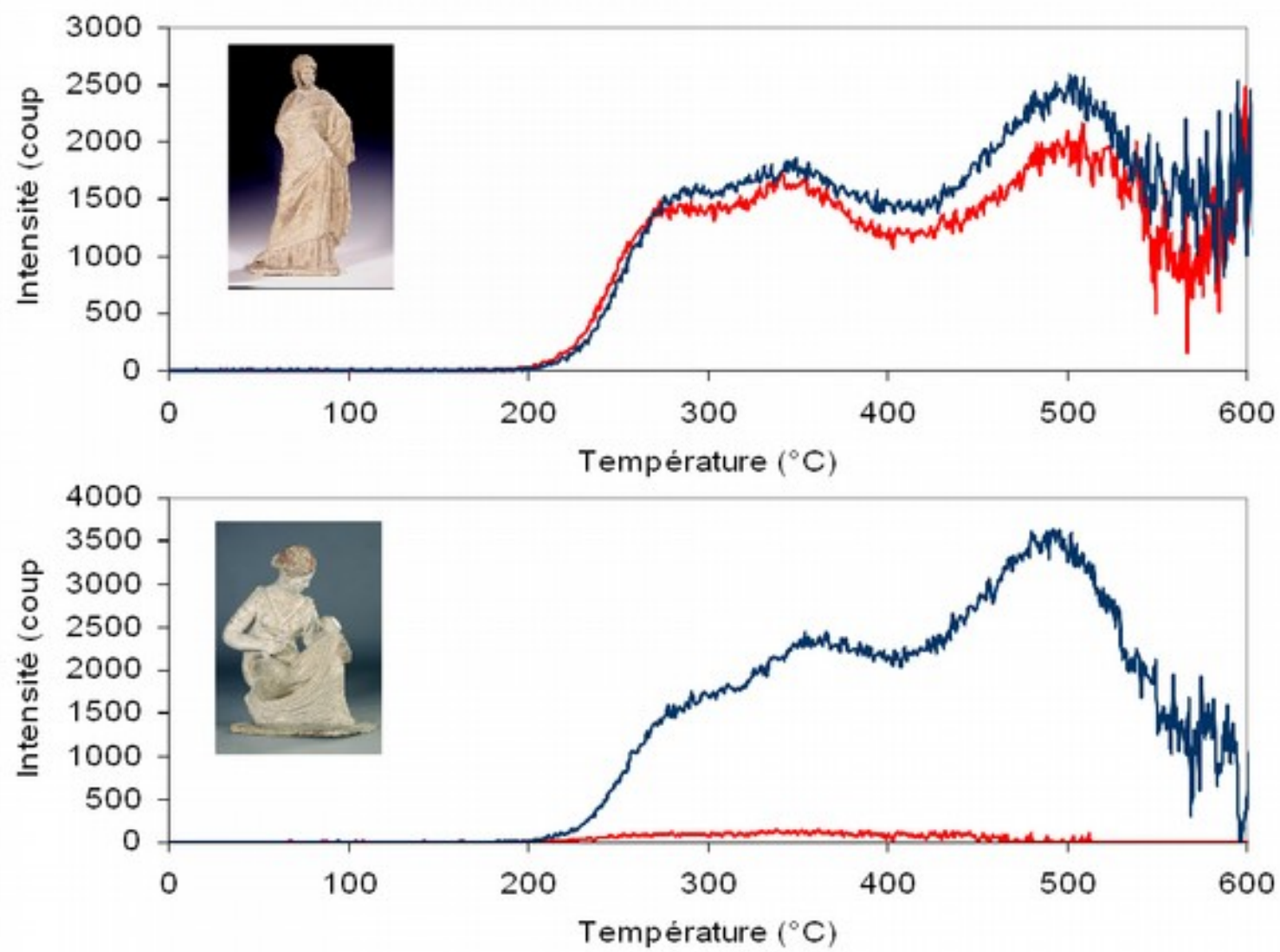


Figure 4

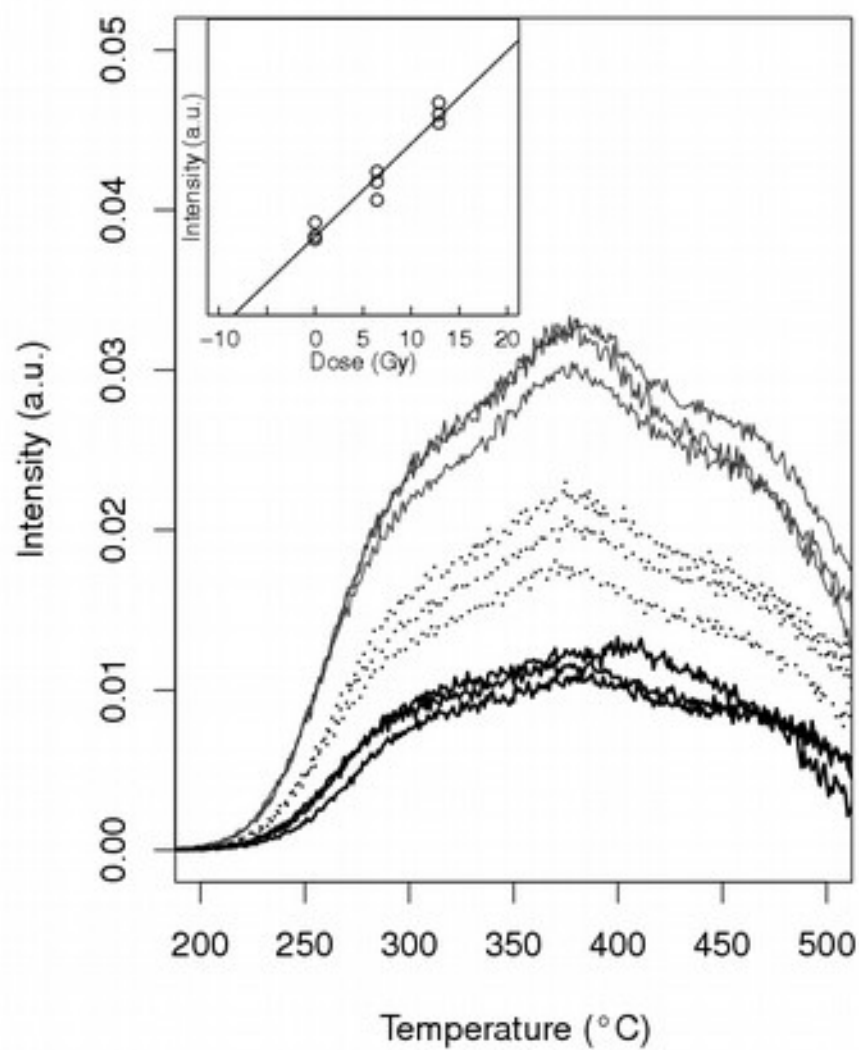


Figure 5

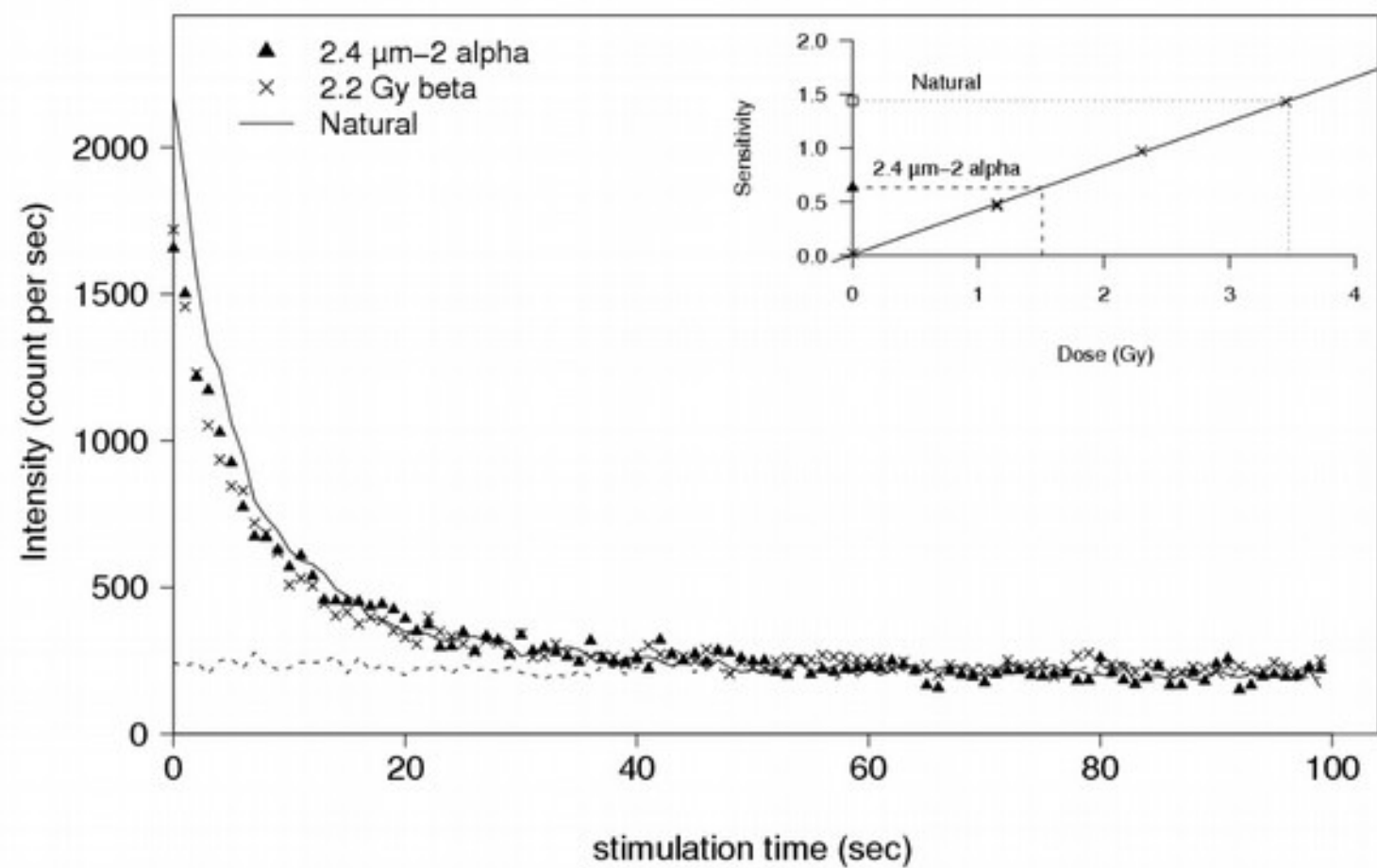


Figure 6

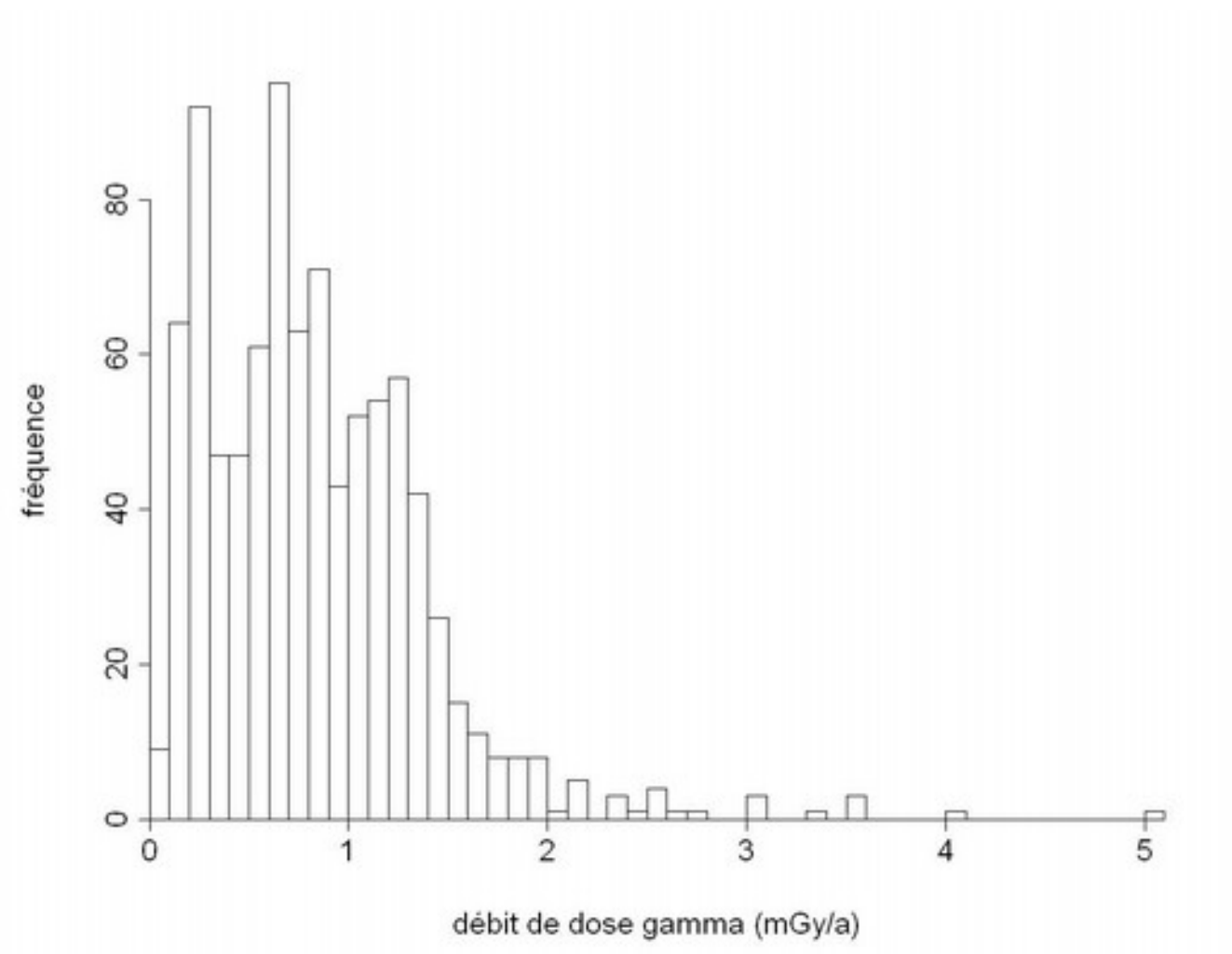


Figure 7

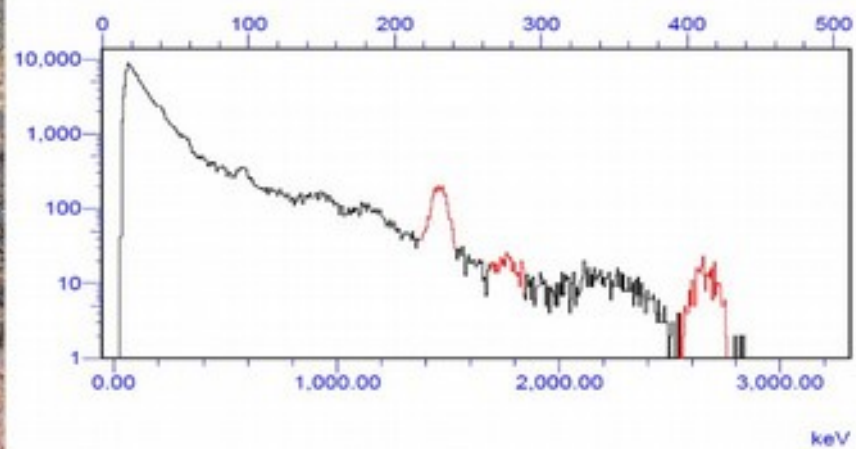


Figure 8

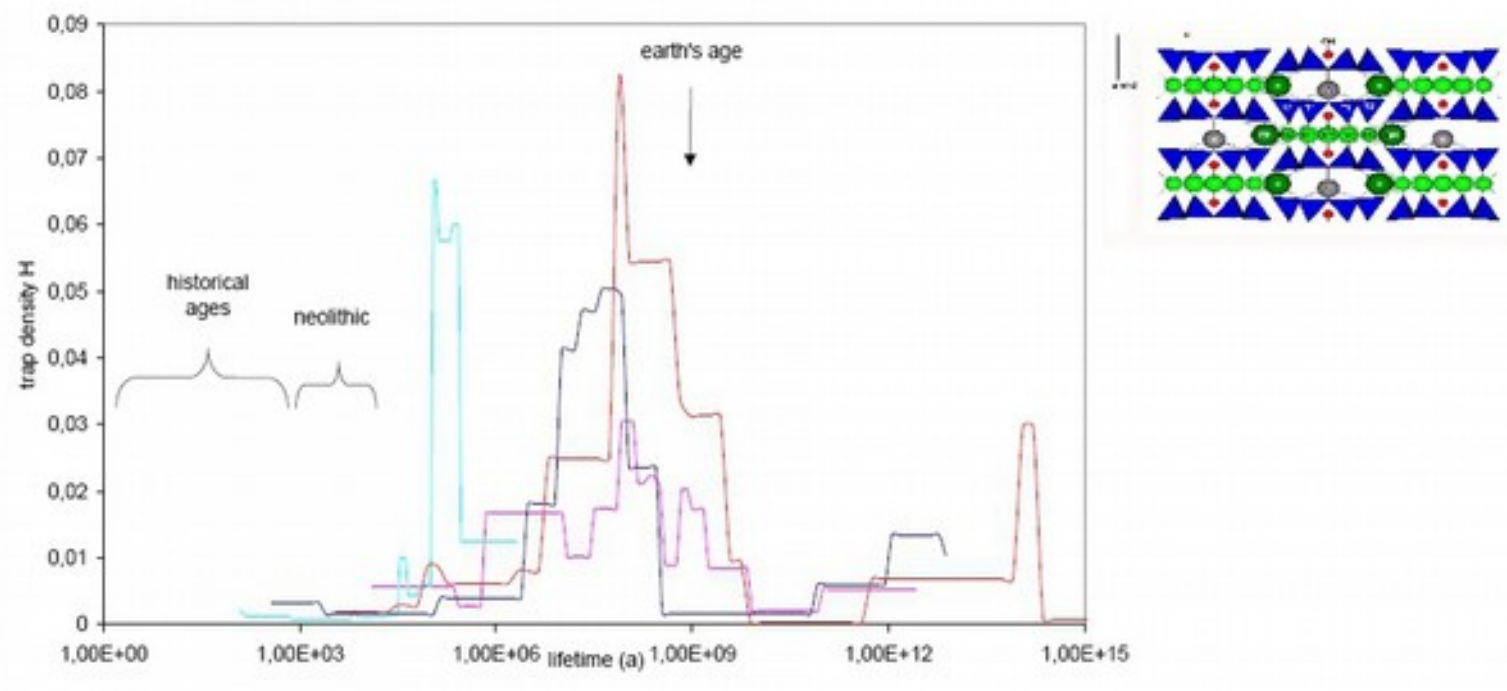


Figure 9

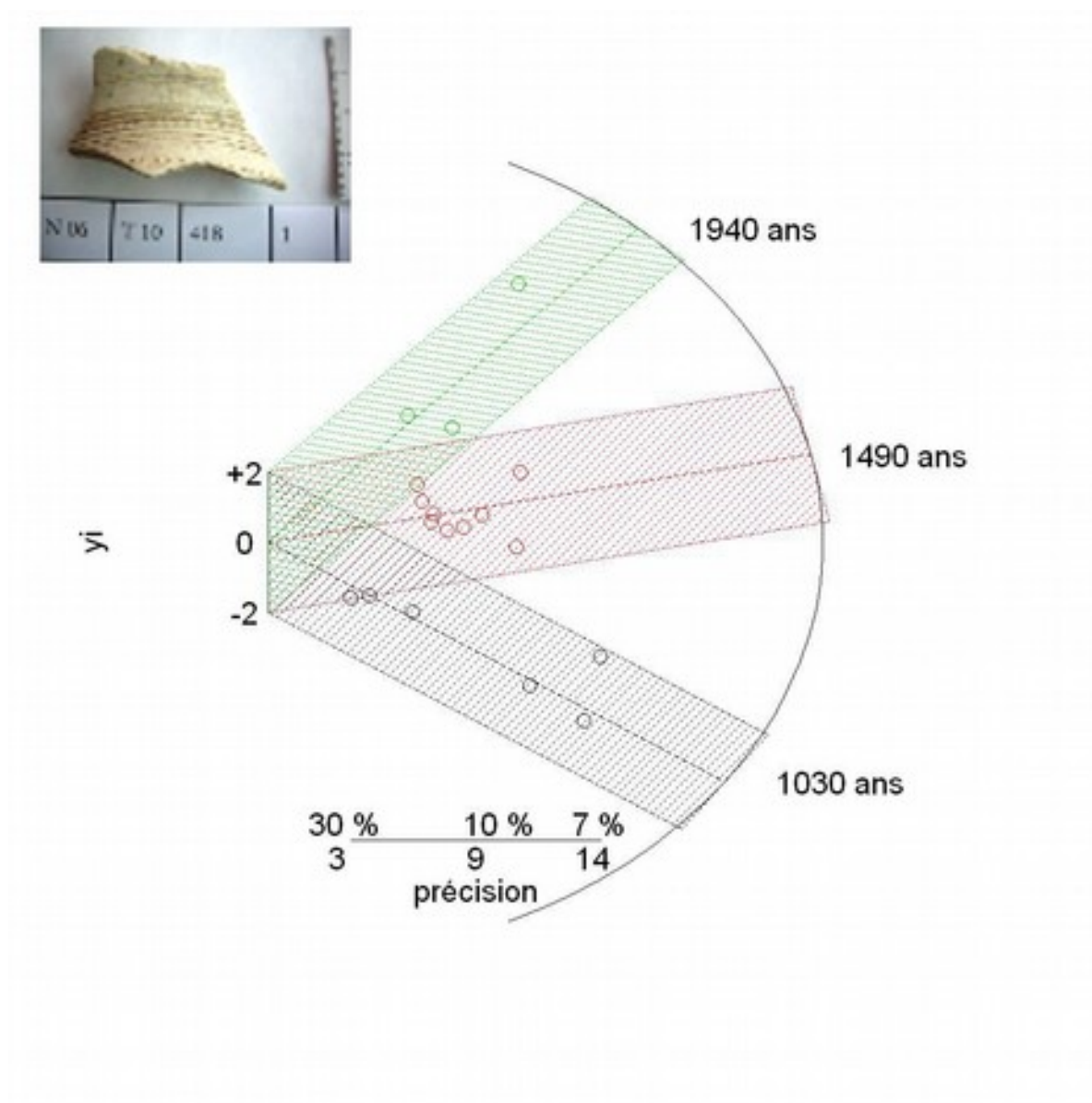


Figure 10

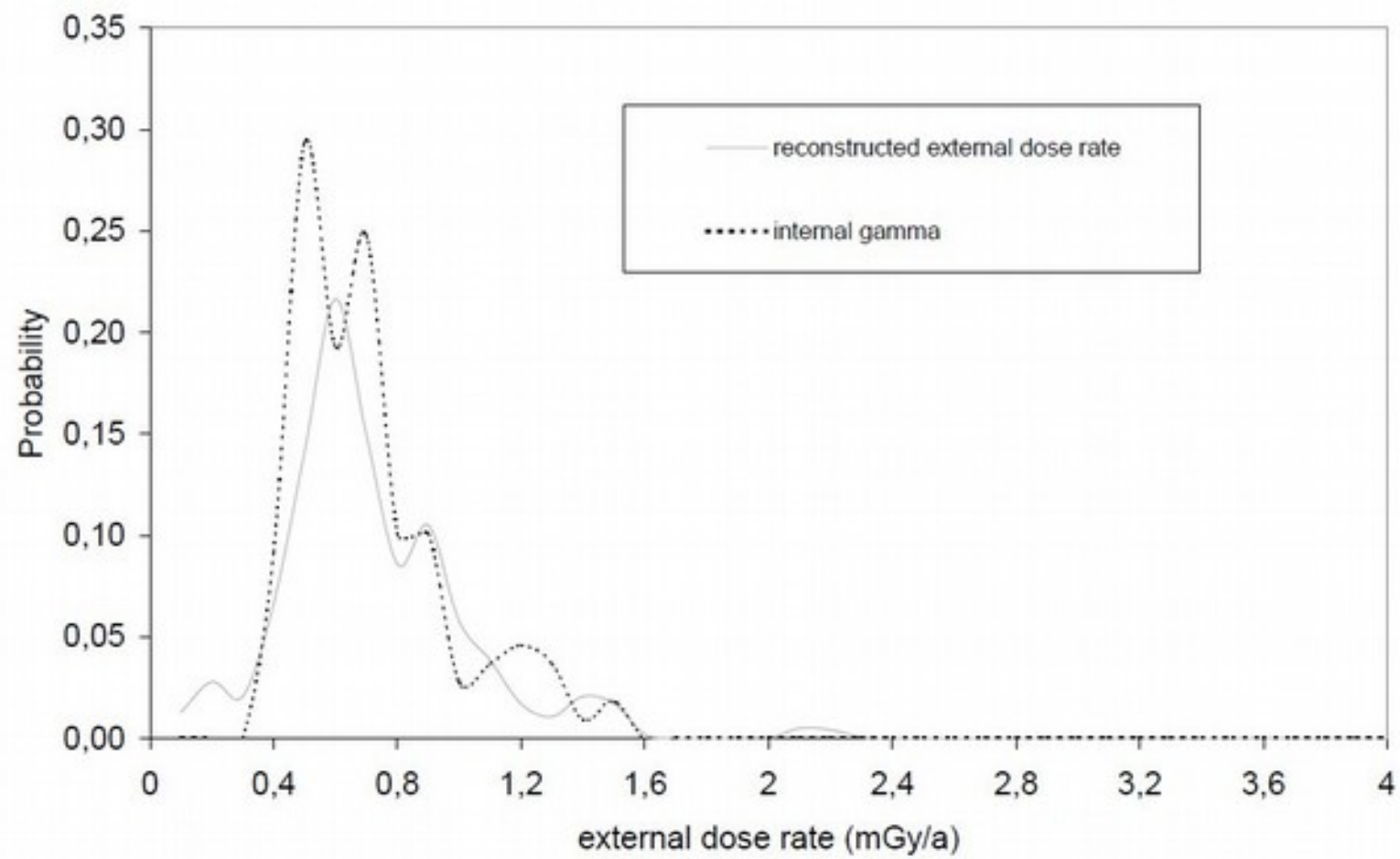


Figure 11

