



Le fer comme moyen de datation des bronzes khmers : première approche de prélèvement in situ

Stéphanie Leroy, Emmanuelle Delqué-Količ, Brice Vincent, Pierre Baptiste,
Enrique Vega, Forrest McGill, Mark Fenn

► To cite this version:

Stéphanie Leroy, Emmanuelle Delqué-Količ, Brice Vincent, Pierre Baptiste, Enrique Vega, et al.. Le fer comme moyen de datation des bronzes khmers : première approche de prélèvement in situ. *Technè*, 2022, 52, pp.82-91. 10.4000/technè.10073 . hal-03921246

HAL Id: hal-03921246

<https://hal.science/hal-03921246v1>

Submitted on 5 Jan 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



Fig. 1. Statue de Vishnu
(inv. MA1339) (H. 87 cm,
L. 34,5 cm, P. 12 cm), Paris,
Musée national des arts
asiatiques – Guimet.
© RMN-Grand Palais (MNAAG,
Paris)/T. Ollivier.

Stéphanie Leroy
Emmanuelle Delqué-Količ
Brice Vincent
Pierre Baptiste
Enrique Vega
Forrest McGill
Mark Fenn

Le fer comme moyen de datation des bronzes khmers : première approche de prélèvement *in situ*

Iron as a means of dating Khmer bronzes: a first
approach to testing samples *in situ*

Résumé. Les avancées méthodologiques liées à la datation directe du fer par le carbone 14 ont récemment ouvert la voie à des découvertes significatives, que ce soit sur l'emploi du fer dans le bâti, ou encore sur l'organisation des réseaux de distribution des produits ferreux de la Protohistoire au Moyen Âge. L'approche de datation développée jusqu'à présent repose sur la nécessité de procéder en deux étapes : une pièce de métal est échantillonnée dans l'objet pour une observation fine de la structure métallique en laboratoire, ce qui permettra ensuite d'effectuer les prélèvements destinés à la datation. Cependant, le caractère précieux des œuvres de collections muséales invite à penser ce protocole en une seule étape avec une stratégie *in situ* qui permet de garantir autant que possible l'intégrité des pièces. Cet enjeu s'est présenté pour l'étude de deux œuvres en bronze produites dans le Cambodge angkorien (IX^e-XV^e siècles) et caractérisées par la présence d'armatures internes en fer. Les résultats de datation obtenus dans ce cadre ouvrent des perspectives inédites pour l'étude de ces précieux témoignages artistiques et techniques de l'ancien royaume khmer.

Mots-clés. Fer, datation par le ¹⁴C, prélèvement *in situ*, bronzes khmers.

Abstract. Methodological advances linked to the direct dating of iron through carbon 14 have recently opened the way to important discoveries, whether about the use of iron in construction, or again in the organization of networks of distribution of iron products from Proto-history to the Middle Ages. The dating approach developed up until now has been based on the need obey a two-step process: a piece of metal would be sampled with the goal of a detailed observation of the metallic structure in a laboratory setting, which would then allow the researcher to lift samples for dating. However, the precious nature of the works in museum collections encourages us to rethink the protocol and reduce it to one single step with an *in situ* strategy allowing us to ensure the integrity of the objects as much as possible. This was the issue at stake in the study of two bronze works produced in Angkorian Cambodia (9th to 15th centuries) and characterized by the presence of internal support structures in iron. The results of the dates obtained within this framework open new avenues for the study of priceless artistic and technical remains from the ancient Khmer kingdom.

Keywords. Iron, carbon 14 dating, *in situ* sampling, Khmer bronzes.

La datation radiocarbone du fer

La datation radiocarbone du fer est une donnée que de nombreuses équipes de recherche ont tenté de mesurer et d'interpréter depuis la fin des années 1960, notamment sous l'impulsion des travaux de N. J. van der Merwe et M. Stuiver¹. La possibilité de dater directement ce métal repose sur le principe même de son procédé de fabrication et sur l'utilisation du charbon de bois comme combustible au moins jusqu'à la fin du Moyen Âge. Pendant l'opération de transformation du minerai, une partie du carbone du charbon de bois diffuse

dans le métal obtenu, dans des proportions très faibles (< 0,8 %_{mass} C), et se combine aux atomes de fer en formant de la cémentite (Fe₃C). Si ces teneurs en carbone sont extrêmement basses en comparaison de celles des matières organiques couramment datées, elles n'en restent pas moins acceptables pour une mesure par SMA (Spectromètre de masse par accélérateur) dans les cas où des quantités suffisantes de métal peuvent être extraites. Pour autant, ces travaux sont rarement parvenus à lever définitivement le doute sur la fiabilité des résultats obtenus, raison pour laquelle cette problématique peut encore faire l'objet de

Stéphanie Leroy, chargée de recherche CNRS, LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS, université Paris-Saclay (stephanie.leroy@cea.fr).
Emmanuelle Delqué-Količ, ingénieure de recherche CNRS, LMC14, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, université Paris-Saclay (emmanuelle.delque-kolic@cea.fr). Brice Vincent, maître de conférences, EFEO (brice.vincent@efeo.net). Pierre Baptiste, conservateur en chef, chargé des collections de l'Asie du Sud-Est, Musée national des arts asiatiques – Guimet (pierre.baptiste@guimet.fr).
Enrique Vega, ingénieur d'étude CNRS, LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS, université Paris-Saclay (enrique.vega@cea.fr).
Forrest McGill, Watis Senior Curator of South and Southeast Asian Art and Director of the Research Institute for Asian Art, Asian Art Museum of San Francisco (fmcgill@asianart.org). Mark Fenn, Associate Head of Conservation, Asian Art Museum of San Francisco (retired).



Fig. 2. Accrochage complet de palanquin comprenant deux crochets : inv. 1992.346.1 (H. 33,5 cm, l. 20,3 cm, D. 7,6 cm) et inv. 1992.346.3 (H. 34,2 cm, l. 19,4 cm, D. 9,5 cm), deux anneaux de suspension (inv. 1992.346.2 et 1992.346.4) et une douille centrale (inv. 1992.346.5), Asian Art Museum of San Francisco, Museum purchase, The Avery Brundage Collection. © Asian Art Museum of San Francisco.



débats. Les sources d'incertitude et de contamination associées aux dates sont en effet multiples, qu'elles soient induites par les protocoles d'extraction, la mesure expérimentale ou le procédé de fabrication de l'objet lui-même qui peut se révéler complexe. L'histoire de l'objet, que constituent les étapes de sa mise en forme, sa fonction d'usage ainsi que ses éventuels réemplois ou recyclages, érige l'interprétation de la mesure de radiocarbone elle-même en enjeu heuristique.

Un travail de collaboration² inscrit sur le long terme entre le LAPA et le LMC14 a permis de mettre au point une approche interdisciplinaire qui couple compréhension de l'histoire métallurgique de l'objet et optimisation des protocoles d'extraction du carbone³. L'une des particularités de cette approche est l'analyse d'une pièce de taille centimétrique coupée dans l'objet et destinée à l'étude en laboratoire des teneurs en carbone de son métal, ce qui permet ainsi de sélectionner sur coupe transversale les zones propices au prélèvement. Cependant, le caractère précieux de certaines œuvres de collections muséales ne permet pas cette approche, ce qui implique d'envisager la datation de fines particules de métal directement extraites de l'objet et préservant son intégrité physique. Cette configuration s'est notamment présentée dans le cadre de recherches⁴ s'intéressant aux statues et aux objets en bronze, ou alliage à base de cuivre, produits dans le Cambodge angkorien (IX^e-XV^e siècles) et caractérisés par la présence d'armatures internes en fer⁵.

Les statues et objets en bronze dans le royaume angkorien : matériaux, fabrication, datation

Le bronze étant, à l'époque angkorienne, un matériau de choix, les œuvres constituées de ce métal sont d'abord destinées aux dieux du royaume et à leurs sanctuaires, à moins qu'elles ne participent à l'apparat de l'élite politico-religieuse. Autant de pratiques qui sont documentées par des données à la fois épigraphiques et archéologiques, collectées depuis près d'un siècle. Plus récemment, les études technologiques de ces mêmes produits finis⁶, en même temps que celles portant sur le mobilier et les structures métallurgiques mis au jour sur un site de fonderie royale à Angkor Thom⁷, ont permis de caractériser de manière plus précise leurs modes de fabrication. Les fondeurs angkoriens ont ainsi recours au procédé de la fonte à la cire perdue, faisant le choix d'une fonte pleine ou en creux en fonction des dimensions des pièces à réaliser. Dans le cas de la fonte en creux de statues d'une taille supérieure à 20 ou 30 cm, le noyau est presque toujours construit autour d'une armature en fer, simple ou complexe, qui a un rôle structurel puisqu'elle assure d'abord

sa solidité, mais aussi son maintien dans le moule après le décirage⁸. Le choix technique d'une armature en fer est également imposé par la fonction de certains types d'objets (éléments de véhicules, accessoires culturels, motifs de couronnement de sanctuaires), bien qu'il s'agisse dans ce cas d'une fonte pleine sur armature⁹.

Depuis les premiers travaux consacrés aux bronzes angkoriens, la question de leur datation ne cesse de retenir l'attention des chercheurs qui y trouvent un moyen d'ajuster des séquences chronologiques, au moins au siècle ou au demi-siècle près, en ce qui concerne des praxis aussi bien temporelles que séculières (les croyances religieuses, les pratiques culturelles, ou encore les savoir-faire métallurgiques). Si les critères invoqués sont jusqu'à présent iconographiques, stylistiques et/ou techniques, ils sont aussi à l'occasion complétés par un contexte archéologique ou, plus rarement, par la présence d'une épigraphe donnant une date absolue. Toutes ces données sont toutefois rarement réunies pour une même pièce, l'interprétation de la datation pouvant en outre être rendue difficile par des problèmes de diverses natures (prolongement et reprise d'une tradition stylistique, restauration ancienne ou moderne, voire copie et faux). Ainsi la possibilité de dater le fer des armatures apparaît comme un moyen inédit d'approcher une datation directe de ces bronzes. Nous présentons ici les résultats obtenus sur deux ensembles : une statue de Vishnu du Musée national des arts asiatiques – Guimet et une paire de crochets de palanquin de l'Asian Art Museum de San Francisco.

Objets d'étude

Statue de Vishnu

Acquis en vente publique à Paris en 1952, ce grand bronze était conservé dans une collection aristocratique française sans que le lieu de sa découverte ait été relevé, quoiqu'une tradition non attestée le rattache à la région de Battambang (nord-ouest du Cambodge). Il figure le dieu Vishnu à quatre bras que les proportions élancées, la stylisation du visage et le traitement du costume permettent d'inscrire dans l'art dit du Baphuon (ca. 1010-1080 EC), voire dans le dernier quart du XI^e siècle¹⁰ (fig. 1). Inachevée, reconsacrée puis restaurée, cette œuvre est singulière à bien des égards, tout en se laissant comparer à d'autres bronzes tardifs de l'art du Baphuon comme la divinité masculine du Phnom Bayang du Musée national du Cambodge (inv. ga 2993). Cette attribution stylistique invite en tout cas à être corroborée en recourant à l'analyse radiocarbone de l'armature en fer de la statue. Celle-ci

se compose d'une tige principale verticale, conservée depuis le sommet de la tête jusqu'au milieu du torse, puis à nouveau dans chacune des jambes, à laquelle sont fixées deux tiges secondaires qui se prolongent au niveau des épaules et des bras inférieurs et supérieurs.

Accrochage complet de palanquin

Acheté en 1992 à un antiquaire parisien sans origine connue, cet ensemble d'accessoires de palanquin, ou litière, forme un accrochage complet qui comporte deux crochets, deux anneaux de suspension et une douille centrale (fig. 2). Si l'étude stylistique permet de rattacher ces pièces à l'art dit du Bayon (ca. 1180-1220 EC), l'iconographie très complexe des seuls crochets, qui se distingue par une accumulation de figures symboliques et, pour certaines, stylisées, laisse supposer une production tardive, voire interroge leur authenticité. Ces crochets, destinés au portage et donc à un travail de force, sont chacun dotés d'une armature en fer qui se compose de deux parties : d'une part, une bague ronde disposée à l'intérieur de la douille et, d'autre part, une tige qui la prolonge et épouse la forme du crochet proprement dit.

Stratégie de prélèvement *in situ*

Configuration et prérequis

La datation des objets de musées exige de préserver l'intégrité de l'œuvre tout en garantissant la fiabilité du résultat radiocarbone. Ces conditions conduisent à minimiser la taille du prélèvement, à le réaliser dans une zone non accessible au regard des visiteurs et à assurer la qualité de l'échantillon mesuré, c'est-à-dire dans notre cas à obtenir des quantités suffisantes de carbone issues d'un métal sans pollutions exogènes et non oxydé. Ces prérequis, parfois antagonistes (taille minimale du prélèvement *vs.* quantité suffisante de carbone à extraire), invitent à penser une stratégie de prélèvement *in situ* qui repose sur la connaissance du « cycle de vie » de l'œuvre et sur l'appréhension des caractéristiques techniques supposées du métal destiné à la datation (nature de l'alliage, degrés d'élaboration). Cette approche intégrative des contextes historiques et archéologiques permet à la fois de juger de la faisabilité de l'étude et d'optimiser les conditions du prélèvement.

Dans le cas d'une statue ou d'un objet en bronze produit dans le Cambodge angkorien, un premier examen visuel et radiographique doit aider à identifier la zone la plus favorable

au prélèvement en termes d'accessibilité à l'armature, de moindre dommage pour l'œuvre et d'état de dégradation du métal. Il doit aussi permettre de rejeter les zones issues des restaurations éventuelles. Quant au métal que l'on cherche à dater, il provient de tiges ou barres en fer dont les procédés de fabrication ne semblent pas justifier une transformation poussée de la matière impliquant soudure, repli et/ou assemblage, propices à la contamination de la mesure finale. De plus, les études sur les procédés techniques en métallurgie du fer dans le Cambodge angkorien montrent que le métal produit et utilisé à partir du XI^e siècle est un acier faiblement carburé ($0,1 < \%_{\text{mass}} \text{C} < 0,3^{11}$). Ces basses teneurs en carbone nous ont conduits à prélever une masse de métal en conséquence (c'est-à-dire une quantité de matière relativement importante) sur les armatures pour assurer un résultat. L'évaluation au plus près d'une quantité minimale requise se révèle d'autant plus indispensable que la préservation de l'œuvre doit rester une priorité.

Prélèvements

Pour la statue de Vishnu, la lecture des radiographies de rayons X réalisées par le C2RMF¹² a encouragé le prélèvement de la portion de l'armature principale qui traverse la tête et affleure au niveau de la chevelure sur environ 1 cm², cette partie présentant le métal le mieux préservé (fig. 3 a). Le dégagement du noyau en terre cuite autour de l'armature a été indispensable afin d'éliminer les dépôts de matières exogènes qui s'y trouvent (argile, sable, matières organiques) (fig. 3 b). Pour les crochets de palanquin, le procédé de fabrication est celui de la fonte pleine sur armature. Celle-ci, en partie accessible au niveau de la bague ronde et à travers le décor ajouré, n'était donc pas noyée dans un noyau en terre cuite (fig. 3 c-d). La jonction entre cette bague et la tige qui se prolonge dans le crochet ne présentait pas de traces importantes de corrosion et de fissuration. Elle a ainsi constitué une zone privilégiée de prélèvement pour les deux crochets ; soin a été pris d'éviter les éventuels replis et soudures à ce niveau.

Dans les deux cas, après avoir procédé au nettoyage des couches externes de l'armature en fer, l'extraction du métal s'est faite directement par forage en utilisant des mèches en acier rapide revêtues d'une couche de nitrure de titane (type HSS-TiN), pour augmenter leur dureté et éviter toute pollution par du carbone. Les particules ont été collectées en plusieurs passes successives, grâce à un aimant recouvert de papier aluminium qui sert de réceptacle aux copeaux produits par le perçage et évite de polluer le prélèvement par contact direct des copeaux avec l'aimant. Les particules ont



Fig. 3 a-d. Localisation de l'armature et repérage des zones favorables aux prélèvements pour la statue de Vishnu (a-b) et les crochets de palanquin (c-d). a. © C2RMF/T. Borel ; b-d © S. Leroy/M. Fenn.

Tableau 1. Datations radiocarbone des prélèvements réalisés sur les armatures en fer

Œuvres	Prélèvements <i>in situ</i>	Quantité prélevée (mg)	Prélèvements datation	Quantité datée (mg)	Carbone extrait (mg)	%C	Référence du laboratoire	δ13CSMA ‰	Âge BP	Intervalle calibré (EC à 95,4 %)*
Vishnu MA 1339	MA1339-2	47	MA1339-2/3	67	0,17	0,25	SacA 48243	-17,4	1215 ± 45	688-741 (9,0 %) 770-904 (73,0 %) 914-974 (13,4 %)
	MA1339-3	20								
	MA1339-4	109	MA1339-4	109	0,24	0,22	SacA 48245	-20,0	1055 ± 35	898-924 (6,2 %) 960-1048 (80,3 %) 1084-1142 (8,9 %)
Crochet n° 1 1992.346.1	1992.346.1	153	1992.346.1	153	0,47	0,31	SacA 53458	-21,4	870 ± 30	1156-1230 (90,7 %) 1246-1263 (4,8 %)
Crochet n° 2 1992.346.3	1992.346.3-1	63	1992.346.3-1	63	0,11	0,18	SacA 53455	-36,8	875 ± 65	1042-1276 (95,4 %)
	1992.346.3-2	86	1992.346.3-2/3	107	0,10	0,12	SacA 53456	-36,0	1175 ± 70	689-740 (6,3 %) 770-1021 (89,1 %)
	1992.346.3-3	21								
* OxCal v4.4.4 Bronk Ramsey (2009) ; r:5 ; Atmospheric data from Reimer <i>et al.</i> (2020), Hogg <i>et al.</i> (2020) ; Mix_Curve_IntCal20_50%/SHCal20_50%										
%C = teneur en carbone du métal de l'armature, calculée à partir de la masse de carbone extraite et de la quantité de métal traité. Les âges radiocarbone sont exprimés en BP, <i>Before Present</i> = avant 1950, année de référence pour les âges carbone 14. La calibration convertit les âges radiocarbone en intervalles d'âges exprimés en EC (Ére Commune).										

été régulièrement examinées (loupe binoculaire ou Dinolite) pour vérifier la qualité des copeaux extraits.

Datation par le radiocarbone des objets étudiés

Préparation des échantillons et mesure du carbone 14

Les copeaux métalliques collectés ont été enfermés sans prétraitement dans des tubes en quartz en présence d'un excès d'oxyde de cuivre et d'un fil d'argent, mis sous vide, scellés puis placés dans un four à 835 °C pendant cinq heures¹³. Cette étape permet de dissocier le carbone du fer et de l'extraire sous forme de dioxyde de carbone (CO₂). Le CO₂ ainsi obtenu a été mis en présence d'hydrogène et de poudre de fer à 600 °C pour former du carbone solide, dont la teneur isotopique en carbone a été ensuite mesurée par SMA (Spectrométrie de masse par accélérateur¹⁴). Des quantités de carbone entre 0,1 et 0,5 mg ont pu être extraites des échantillons. Elles correspondent à des teneurs en carbone dans le fer de l'ordre de 0,1 à 0,3 %_{mass}, compatibles avec les hypothèses émises sur la nature de l'alliage produit (< 0,3 %_{mass} de

C) pour les chronologies présupposées, toutes postérieures au XI^e siècle. Deux échantillons, extraits du crochet n° 2, ont fourni des masses de carbone de 0,1 et 0,2 mg. Considérés comme des microéchantillons, ils ont nécessité une adaptation des conditions de préparation et de mesure¹⁵ et ont conduit à des incertitudes de mesure plus grandes. Les âges radiocarbone ont finalement été convertis en âge calendaire grâce aux courbes de calibration internationales. Pour les échantillons provenant de zones intertropicales comme l'Asie du Sud-Est, il est recommandé d'appliquer une calibration tenant compte, à parts égales, des données de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud¹⁶.

Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.

Statue de Vishnu. Les intervalles de dates obtenus sur les prélèvements, censés avoir le même âge, se recouvrent partiellement sur le X^e siècle (914-974 EC pour MA1339-2/3 et 898-924 EC et 960-1048 EC pour MA1339-4) (fig. 4), époque antérieure à celle attendue pour l'œuvre. Cependant, le

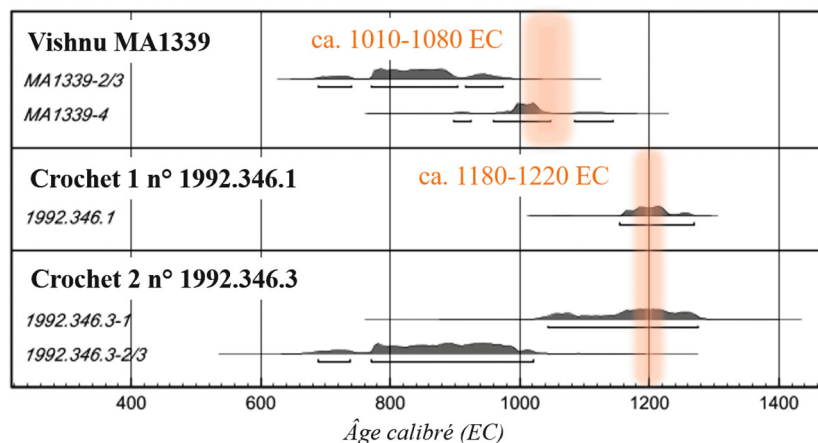


Fig. 4. Âges calibrés des armatures en fer pour la statue de Vishnu et les crochets de palanquin. Les rectangles orange représentent les périodes d'attribution stylistique.
© E. Delqué-Količ.

prélèvement MA1339-2/3, qui donne un âge plus ancien, rassemble deux prélèvements de petites masses et a produit une quantité de carbone inférieure à 0,2 mg. Malgré les précautions prises tout au long du processus de préparation, les petites quantités de matière sont plus sensibles aux pollutions carbonées qui peuvent fausser la mesure de carbone 14 et par là même l'âge de l'échantillon. Par conséquent, si l'on considère uniquement les intervalles de dates les plus probables obtenus pour l'échantillon MA1339-4 (960-1048 EC et 1084-1142 EC), on retrouve l'attribution au ^x^e siècle pressentie pour l'œuvre. Quoiqu'il en soit, une attribution postérieure au ^{xii}^e siècle est écartée par les résultats des mesures de carbone 14 réalisées sur l'armature.

Crochets de palanquin. Le prélèvement 1992.346.1 réalisé sur le crochet n° 1 a donné un intervalle de 1156 à 1263 EC, compatible avec la période attendue pour cet objet, à savoir la première moitié du ^{xiii}^e siècle (fig. 4). Les résultats obtenus

pour le crochet n° 2 fournissent des intervalles de dates sans recouvrement (1042-1276 EC pour 1992.346.3-1 et 689-740 EC et 770-1021 EC pour 1992.346.3-2/3), mais dont l'un (1042-1276 EC) coïncide parfaitement avec la date radiocarbone du crochet n° 1 et l'âge attendu pour l'objet. Si l'étude stylistique de cet ensemble pouvait laisser planer des doutes sur l'authenticité des crochets, assez distincts de la douille centrale notamment, elle n'envisageait pas une origine antérieure au ^{xiii}^e siècle. La date radiocarbone du prélèvement 1992.346.3-2/3 pourrait donc présenter un vieillissement que peuvent expliquer la très faible quantité de carbone extraite (0,1 mg) et les risques de contamination plus importants qu'elle entraîne. Les mesures radiocarbone réalisées sur les armatures de ces

crochets mettent néanmoins en évidence leur ancienneté, excluant ainsi la possibilité d'une contrefaçon moderne.

Conclusion

Les résultats de datation obtenus sur les bronzes khmers étudiés ouvrent des perspectives inédites pour l'étude de ces précieux témoignages artistiques et techniques, produits en grande quantité dans l'ancien royaume khmer et dont de nombreux exemples sont conservés dans les musées du monde entier. Au-delà de ce contexte historique spécifique, la méthodologie développée permet d'envisager la datation d'objets ne pouvant pas supporter un prélèvement massif. Les résultats sont alors conditionnés par plusieurs critères qui jalonnent la démarche et relèvent des différentes disciplines qui l'ont accompagnée : l'archéoméallurgie, la datation radiocarbone, l'histoire de l'art et la conservation.

Notes

1. Van der Merwe, Stuiver, 1968.
2. Les auteurs remercient également Jean-Pascal Dumoulin, Marion Perron, Ingrid Caffy et Christophe Moreau du LMC14 pour la préparation et la mesure C14. Cette collaboration est possible grâce au soutien de Lucile Beck, responsable du LMC14, et de Philippe Dillmann, responsable du LAPA.
3. Leroy *et al.*, 2015 et 2018.
4. Projets IRANGKOR (dir. S. Leroy) et LANGAU (dir. B. Vincent).
5. Ce travail a bénéficié du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-14-CE31-0007) dans le cadre du projet IRANGKOR.
6. Bourgarit *et al.*, 2003 ; Vincent, 2012.
7. Polkinghorne *et al.*, 2014.
8. Le décirage est une étape dans la réalisation d'une sculpture en bronze qui consiste à faire fondre la cire qui se trouve à l'intérieur du moule réfractaire, à une température de 200 à 300 °C.
9. Vincent, 2012, p. 270-273.
10. Baptiste, Zéphir, 2008, p. 204-205.
11. Leroy *et al.*, 2018.
12. Bourgarit *et al.*, 2003.
13. Le détail du protocole est décrit dans Leroy *et al.*, 2015.
14. Dumoulin *et al.*, 2017.
15. Descriptions dans Delqué-Količ *et al.*, 2013 et Moreau *et al.*, 2020.
16. Hogg *et al.*, 2020 ; Reimer *et al.*, 2020.

Bibliographie

- Baptiste P., Zéphir T., 2008, *L'art khmer dans les collections du musée Guimet*, Éditions RMN-Grand Palais, Paris.
- Bourgarit D., Mille B., Borel T., Baptiste P., Zéphir T., 2003, "A millenium of Khmer bronze metallurgy: analytical studies of bronze artifacts from the Musée Guimet and the Phnom Penh National Museum", in P. Jett, J. G. Douglas, B. McCarthy et J. Winter (dir.), *Scientific research in the field of Asian art. Proceedings of the First Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art*, Archetype Publications, Londres, p. 103-126.
- Bronk Ramsey C., 2009, "Bayesian analysis of radiocarbon dates", *Radiocarbon*, 51 (1), p. 337-360.
- Delqué-Količ E. *et al.*, 2013, "Advances in handling small radiocarbon samples at the Laboratoire de Mesure du Carbone 14 in Saclay, France", *Radiocarbon*, 55 (2-3), p. 648-656.
- Dumoulin J.-P., Comby-Zerbino C., Delqué-Količ E., Moreau C., Caffy I., Hain S., Perron M., Thellier B., Setti V., Berthier B., Beck L., 2017, "Status report on sample preparation protocols developed at the LMC14 Laboratory, Saclay, France: from sample collection to ¹⁴C AMS measurement", *Radiocarbon*, 59 (3), p. 713-726.
- Hogg A. G., Heaton J., Hua Q., Palmer J. G., Turney C. S., Southon J., Bayliss A., Blackwell P. G., Boswijk G., Bronk Ramsey C., Pearson C., Petchey F., Reimer P., Reimer R., Wacker L., 2020, "SHCal20 Southern hemisphere calibration, 0-55,000 years cal BP", *Radiocarbon*, 62 (4), p. 759-778.
- Leroy S., Hendrickson M., Bauvais S., Vega E., Blanchet T., Disser A., Delqué-Količ E., 2018, "The ties that bind: archaeometallurgical typology of architectural crampons as a method for reconstructing the iron economy of Angkor, Cambodia (tenth to thirteenth c.)", *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10, p. 2137-2157.
- Leroy S., L'Héritier M., Delqué-Količ E., Dumoulin J.-P., Moreau C., Dillmann P., 2015, "Consolidation or initial design? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French Gothic Cathedrals", *Journal of Archaeological Science*, 53, p. 190-201.
- Moreau C., Messenger C., Berthier B., Hain S., Thellier B., Dumoulin J.-P., Caffy I., Sieudat M., Delqué-Količ E., Mussard S., Perron M., Setti S., Beck L., 2020, "ARTEMIS, the ¹⁴C AMS facility of the LMC14 National Laboratory: a status report on quality control and microsample procedures", *Radiocarbon*, 62 (6), p. 1755-1770.
- Polkinghorne M., Vincent V., Thomas N., Bourgarit D., 2014, "Casting for the King: the Royal Palace bronze workshop of Angkor Thom", *Bulletin de l'École française d'Extrême-Orient*, 100, p. 327-358.
- Reimer P. J., Austin W., Bard E. *et al.*, 2020, "The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curves (0-55 cal kBP)", *Radiocarbon*, 62 (4), p. 725-757.
- Van der Merwe N. J., Stuiver M., 1968, "Dating iron by the carbon-14 method", *Current Anthropology*, 9 (1), p. 48-53.

Document inédit

- Vincent B., 2012, Samrit. *Étude de la métallurgie du bronze dans le Cambodge angkorien (fin du XI^e-début du XIII^e siècle)*. Thèse de doctorat, université Sorbonne Nouvelle – Paris 3.