

THÈSE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 641
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Mathématiques et leurs Interactions*

Par

Destin ASHUZA CIRUMANGA

**Inférence et apprentissage statistique appliqués à la construction
de la chronologie de sites archéologiques à partir de datations par
le radiocarbone**

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 09/12/2025

Unité de recherche : Laboratoire de Mathématiques Jean Leray (LMJL)

Rapporteurs avant soutenance :

Badih GHATTAS Professeur des universités, Aix Marseille Université
Christine HATTE Directeur de recherche, CEA & Université Paris-Saclay

Composition du Jury :

Attention, en cas d'absence d'un des membres du Jury le jour de la soutenance, la composition du jury doit être revue pour s'assurer qu'elle est conforme et devra être répercutee sur la couverture de thèse

Président :	Prénom NOM	Fonction et établissement d'exercice (à préciser après la soutenance)
Examinateurs :	Badih GHATTAS	Professeur des universités, Aix Marseille Université
	Christine HATTE	Directeur de recherche, CEA & Université Paris-Saclay
	Frédéric PROIA	Professeur des universités, Nantes Université
	Marco CORNELI	Chaire de Professeur Junior HDR, Université Côte d'Azur
	Benoit COMBES	Chargé de recherche, Centre INRIA de l'Université de Rennes
Dir. de thèse :	Anne PHILIPPE	Professeur des universités, Nantes Université
Co-dir. de thèse :	Guillaume GUERIN	Chargé de recherche HDR, CNRS & Université Rennes 1

Titre : Inférence et apprentissage statistique appliqués à la construction de la chronologie de sites archéologiques à partir de datations par le radiocarbone.

Mot clés : Réseaux de neurones, modélisation bayésienne, approximation variationnelle, étalonnage des mesures, variables entachées d'erreurs, datation carbone 14.

Résumé : Cette thèse propose de nouvelles méthodes statistiques pour estimer la courbe d'étalonnage des âges carbone 14 et calibrer de nouvelles mesures. L'approche développée s'appuie sur les réseaux de neurones bayésiens et l'inférence variationnelle. Le premier axe de travail développe un cadre d'étalonnage de fonctions non linéaires unidimensionnelles, avec des procédures de calibration individuelle et simultanée. Les performances obtenues en calibration sont prometteuses et dépassent celles de la courbe IntCal20 sur des données réelles traitées dans la thèse. Le second axe s'intéresse à la régression sur variables entachées d'erreurs, une

problématique peu traitée dans le cadre de modèles de régression par réseaux de neurones. Une nouvelle approche est développée pour la prise en compte de l'incertitude en entrée du réseau de neurones dans le cas des erreurs de mesure gaussiennes. Enfin, le troisième axe introduit pour la première fois l'utilisation de variables exogènes dans l'estimation de la courbe de calibration du radiocarbone. Cette approche conduit à une courbe de calibration plus informative. Les résultats obtenus ouvrent la voie à une modélisation complète des incertitudes et à leur propagation de la phase d'estimation à celle de la calibration.

Title: Inference and machine learning applied to the construction of archaeological sites' chronology from radiocarbon dating.

Keywords: Neural networks, Bayesian modelling, variational inference, measurements calibration, errors-in-variables, radiocarbon dating.

Abstract: This thesis proposes new statistical methods for estimating the calibration curve of ^{14}C ages and calibrating new measurements. The approach is based on Bayesian neural networks and variational inference. The first line of work develops a framework for calibrating one-dimensional non-linear functions, with independent and joint calibration procedures. The performances obtained are promising and exceed those of the IntCal20 curve on real data processed in the thesis. The second line focuses on errors-in-variables models for a regression task. This problem is rarely ad-

dressed in neural network regression models. A new statistical approach has been developed to take account of uncertainty in the neural network input in the case of Gaussian measurement errors. Finally, the last line introduces, for the first time, the use of covariates in the estimation of the radiocarbon calibration curve. This leads to a more informative calibration curve. The results obtained pave the way for comprehensive modelling of uncertainties and their propagation in the model from the estimation phase through to the calibration phase.