

Titre de la thèse : Approche IA neuro-symbolique pour la classification des résidus de tir

Laboratoire d'accueil : LIB - EA 7534, 9 avenue Alain Savary, 21000 Dijon, France - <https://lib.ube.fr/>

Spécialité du doctorat préparé : Informatique / IA

Mots-clefs : Intelligence artificielle (IA), IA symbolique, IA neuro-symbolique, ontologies, raisonnement à base de règles, apprentissage automatique, classification, interprétabilité, IA explicable, criminalistique, résidus de tir, aide à la décision

Descriptif détaillé de la thèse

Contexte général : Le sujet s'inscrit dans le cadre du projet IGNIS (Intelligent System for Gunshot Residue Classification), porté conjointement par le Laboratoire d'Informatique de Bourgogne (LiB), l'Institut de Mathématiques de Bourgogne (IMB) et le Service National de la Police Scientifique (SNPS). Le projet IGNIS vise la conception d'un système de classification automatique et explicable des résidus de tir observés par microscopie électronique à balayage couplée à la spectrométrie dispersive en énergie (MEB-EDX). L'environnement de recherche est interdisciplinaire, à l'interface entre intelligence artificielle, représentation des connaissances, apprentissage automatique, statistique, optimisation et criminalistique. Il bénéficie d'un accès à des données réelles issues des laboratoires du SNPS.

Contexte scientifique : Les résidus de tir sont des particules issues du tir d'une arme à feu, constituées de composants inorganiques et organiques provenant des munitions. Leur analyse par MEB-EDX est aujourd'hui considérée comme la technique de référence, car elle permet d'observer la morphologie des particules et d'estimer leur composition élémentaire, en s'appuyant notamment sur le cadre normatif ASTM E1588-20. Dans la pratique, la classification des particules de résidus de tir repose sur une première phase d'analyse automatique, suivie d'une validation manuelle par un expert du SNPS. Cette situation soulève plusieurs verrous scientifiques : (1) la formalisation de la connaissance experte mobilisée lors de la validation des particules ; (2) la robustesse des modèles d'apprentissage, fortement dépendante de la qualité, de la représentativité et de l'évolution des données, notamment avec l'émergence de nouvelles munitions et de compositions sans plomb ; (3) l'explicabilité, centrale dans un contexte judiciaire.

La thèse vise à dépasser ces limites en proposant une approche IA neuro-symbolique capable non seulement de classer les particules, mais aussi d'expliquer ses décisions dans un langage compatible avec l'expertise métier. L'originalité scientifique du projet réside dans l'intégration d'une représentation formelle des connaissances criminalistiques au sein d'une architecture neuro-symbolique permettant de combiner apprentissage à partir des données et raisonnement explicite fondé sur des connaissances expertes.

Problématiques de recherche : La thèse s'attachera à répondre à la question suivante : comment concevoir un système d'intelligence artificielle neuro-symbolique capable de classer automatiquement des particules de résidus de tir de manière fiable, adaptable et explicable, tout en respectant les contraintes scientifiques, opérationnelles et judiciaires propres à la criminalistique ?

Cette problématique générale se décline en plusieurs questions de recherche :

- Comment représenter formellement les connaissances expertes relatives aux résidus de tir, en intégrant normes ASTM, critères morphologiques, compositions élémentaires et règles métier, au sein d'une base de connaissances exploitable par une machine ?
- Comment articuler cette représentation symbolique avec des modèles d'apprentissage pour affiner les règles de classification existantes, d'apprendre de nouvelles classes ou sous-classes de particules et de maintenir la robustesse du système ?
- Comment produire des explications compréhensibles et acceptables par les experts du SNPS, en combinant raisonnement symbolique, méthodes d'explication post-hoc et analyse de sensibilité ?
- Comment évaluer un tel système non seulement en termes de précision algorithmique, mais aussi en termes d'utilité métier, en sécurité d'intégration, en reproductibilité et en potentiel de transfert vers d'autres laboratoires ?

Travaux envisagés : Les travaux envisagés s'articulent autour de cinq volets : (1) la conception d'une ontologie formalisant les connaissances relatives aux particules, leurs compositions élémentaires, les classes ASTM et les règles d'interprétation des experts SNPS ; (2) nettoyage, structuration et intégration des données fournies par le SNPS dans la base de connaissances dédiée aux résidus de tir ; (3) la conception d'un moteur de règles et d'un classificateur hybride capables de combiner contraintes symboliques, apprentissage automatique et adaptation à l'évolution des compositions de munitions ; (4) l'intégration d'un module d'explicabilité, fondé sur des approches comme SHAP ou LIME ; (5) la validation expérimentale sur les jeux de données fournis par le SNPS, avec évaluation de la robustesse, de la précision, et du gain métier.

La thèse s'inscrit dans une dynamique de transfert, les résultats de classification étant destinés à être intégrés dans le processus du SNPS. Une attention particulière sera portée à la sécurité des données, à la reproductibilité et à l'appropriation par les utilisateurs finaux. Le projet vise explicitement un système plus fiable, plus rapide et plus transparent, afin de réduire le temps d'expertise et d'augmenter la capacité de traitement des laboratoires du SNPS. Une part importante du travail doctoral consistera donc à faire dialoguer les exigences de la recherche en IA avec les contraintes de la criminalistique.

Références bibliographiques

Maitre, M., Kirkbride, K. P., Horder, M., Roux, C., & Beavis, A. Current perspectives in the interpretation of gunshot residues in forensic science: A review. *Forensic Science International*, 270, 1-11, 2017.

ASTM International. ASTM E1588-20 - Standard Practice for Gunshot Residue Analysis by Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectrometry, 2022.

Mandel, M., Israelsohn Azulay, O., Zidon, Y., Tsach, T., & Cohen, Y. Classification Improvements in Automated Gunshot Residue (GSR) Scans. *Journal of Forensic Sciences*, 2018.

Matzen, T., Kukurin, C., van de Wetering, J., et al. Objectifying evidence evaluation for gunshot residue comparisons using machine learning on criminal case data. *Forensic Science International*, 335, 111293, 2022.

de Bie, K., Vinkenoog, M., Arins, S., et al. Proposed method to objectively evaluate gunshot residue comparisons does not generalise to different-location settings. *Forensic Science International*, 369, 112414, 2025.

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. *NeurIPS*, 2017.

Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier. *KDD*, 2016.

Sobol, I. M. Global sensitivity indices for non-linear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55, 271-280, 2001.

Profil recherché : Les candidats doivent être titulaires d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur en informatique, intelligence artificielle, science des données, ou mathématiques appliquées. Les candidats doivent avoir un bon niveau en français et en anglais (niveau min. C1).

Les candidats doivent avoir un intérêt pour la recherche, un solide bagage scientifique, et des compétences en programmation. Des compétences en apprentissage automatique, représentation de connaissances et analyse de données massives sont attendues. Des compétences en modélisation statistique, optimisation ou raisonnement symbolique seront un plus.

Le profil recherché suppose également de bonnes capacités rédactionnelles et de communication avec des experts métier, un goût pour le travail interdisciplinaire et une aptitude à évoluer dans un environnement partenarial avec des contraintes de confidentialité et de sécurité. Une sensibilité aux enjeux de la criminalistique ou des domaines à forte exigence de traçabilité serait particulièrement appréciée. Du fait des contraintes liées au contexte applicatif sensible, la candidature retenue sera validée après enquête de moralité.

Le profil sera particulièrement adapté à une personne capable de travailler à l'interface entre recherche fondamentale et transfert technologique, avec un goût pour la construction de prototypes, l'analyse de données réelles et la co-conception avec des partenaires institutionnels.

Financement : Région Bourgogne Franche-Comté (BFC)

Dossier à envoyer avant le 13/07/2026

Période d'auditions: au fil de l'eau

Début du contrat : Septembre-Octobre 2026

Salaire mensuel brut : 1975€

Direction / codirection de la thèse :

Ana ROXIN PU (direction) / Laurence DUJOURDY IR-HDR (co-encadrante) / Ludovic JOURNAUX

MCF (co-encadrant)

Contact:

Ana ROXIN: ana-maria.roxin@ube.fr

Laurence DUJOURDY: laurence.dujourdy@agrosupdijon.fr

Ludovic JOURNAUX: ludovic.journaux@agrosupdijon.fr

Les candidats sont invités à soumettre leur candidature à l'équipe de direction.

La candidature doit contenir les documents suivants :

- CV
- une lettre de motivation
- relevé de notes de M1/M2 (ou diplôme équivalent)
- au moins 1 lettre de référence

PhD title: Neuro-symbolic AI Approach for the Classification of Gunshot Residue

Hosting laboratory: LIB - EA 7534, 9 avenue Alain Savary, 21000 Dijon, France - <https://lib.ube.fr/>

PhD speciality: Computer science / AI

Keywords: Artificial intelligence (AI), symbolic AI, neuro-symbolic AI, ontologies, rule-based reasoning, machine learning, classification, interpretability, explainable AI, forensics, gunshot residue, decision support

Detailed thesis description

Context: The topic is part of the IGNIS project (Intelligent System for Gunshot Residue Classification), jointly led by the Laboratoire d'Informatique de Bourgogne (LIB), the Institut de Mathématiques de Bourgogne (IMB), and the French National Forensic Science Service (SNPS). The IGNIS project aims to design an automatic and explainable classification system for gunshot residues observed by scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDX). The research environment is interdisciplinary, at the interface of artificial intelligence, knowledge representation, machine learning, statistics, optimisation and forensic science. It benefits from access to real data from SNPS laboratories.

Scientific context: Gunshot residues are particles produced when a firearm is discharged, consisting of inorganic and organic components originating from ammunition. Their analysis by SEM-EDX is now considered the reference technique, as it makes it possible to observe particle morphology and estimate elemental composition, notably on the basis of the ASTM E1588-20 standard framework. In practice, the classification of gunshot residue particles relies on a first automatic analysis phase, followed by manual validation by an SNPS expert.

This situation raises several scientific challenges: (1) formalising the expert knowledge used during particle validation; (2) the robustness of learning models, which is strongly dependent on data quality, representativeness and evolution, particularly with the emergence of new ammunition types and lead-free compositions; and (3) explainability, which is central in a judicial context.

The thesis aims to go beyond these limitations by proposing a neuro-symbolic AI approach capable not only of classifying particles, but also of explaining its decisions in language compatible with professional expertise. The scientific originality of the project lies in the integration of a formal representation of forensic knowledge within a neuro-symbolic architecture that combines data-driven learning with explicit reasoning based on expert knowledge.

Research questions: The thesis will seek to answer the following question: how can a neuro-symbolic artificial intelligence system be designed to automatically classify gunshot residue particles in a reliable, adaptable and explainable way, while complying with the scientific, operational and judicial constraints specific to forensic science?

This general issue breaks down into several research questions:

- How can expert knowledge relating to gunshot residues be formally represented, integrating ASTM standards, morphological criteria, elemental compositions and business rules, within a machine-readable knowledge base?
- How can this symbolic representation be combined with learning models to refine existing classification rules, learn new classes or sub-classes of particles, and maintain system robustness?
- How can understandable and acceptable explanations be produced for SNPS experts, by combining symbolic reasoning, post-hoc explanation methods and sensitivity analysis?
- How can such a system be evaluated not only in terms of algorithmic accuracy, but also in terms of operational usefulness, integration safety, reproducibility and potential transferability to other laboratories?

Planned work: The planned work is structured around five strands: (1) the design of an ontology formalising knowledge relating to particles, their elemental compositions, ASTM classes and SNPS expert interpretation rules; (2) cleaning, structuring and integrating SNPS-provided data into the dedicated

gunshot residue knowledge base; (3) the design of a rule engine and a hybrid classifier capable of combining symbolic constraints, machine learning and adaptation to the evolution of ammunition compositions; (4) the integration of an explainability module, based on approaches such as SHAP or LIME; (5) experimental validation on datasets provided by SNPS, with evaluation of robustness, accuracy and operational benefit.

The thesis is part of a transfer-oriented dynamic, with classification results intended to be integrated into the SNPS workflow. Particular attention will be paid to data security, reproducibility and adoption by end users. The project explicitly aims for a more reliable, faster and more transparent system, in order to reduce the time required for expert assessment and increase the processing capacity of SNPS laboratories. A major part of the doctoral work will therefore consist of aligning the requirements of AI research with the constraints of forensic science.

References

Maitre, M., Kirkbride, K. P., Horder, M., Roux, C., & Beavis, A. Current perspectives in the interpretation of gunshot residues in forensic science: A review. *Forensic Science International*, 270, 1-11, 2017.

ASTM International. ASTM E1588-20 - Standard Practice for Gunshot Residue Analysis by Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectrometry, 2022.

Mandel, M., Israelsohn Azulay, O., Zidon, Y., Tsach, T., & Cohen, Y. Classification Improvements in Automated Gunshot Residue (GSR) Scans. *Journal of Forensic Sciences*, 2018.

Matzen, T., Kukurin, C., van de Wetering, J., et al. Objectifying evidence evaluation for gunshot residue comparisons using machine learning on criminal case data. *Forensic Science International*, 335, 111293, 2022.

de Bie, K., Vinkenoog, M., Arins, S., et al. Proposed method to objectively evaluate gunshot residue comparisons does not generalise to different-location settings. *Forensic Science International*, 369, 112414, 2025.

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. *NeurIPS*, 2017.

Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier. *KDD*, 2016.

Sobol, I. M. Global sensitivity indices for non-linear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55, 271-280, 2001.

Candidate Profile: Candidates must hold a Master 2 or an engineering degree in computer science artificial intelligence, data science, or applied mathematics. Candidates must have a good level of French and English (minimum C1 level). Candidates must have an interest in research, a strong scientific background, and programming skills. Skills in machine learning, knowledge representation and big data analysis are expected. Skills in statistical modelling, optimisation or symbolic reasoning will be an asset.

The desired profile also requires strong writing skills and the ability to communicate with subject-matter experts, a taste for interdisciplinary work, and the ability to operate in a partnership-based environment with confidentiality and security constraints. An interest in forensic science or in fields with strong traceability requirements would be particularly appreciated. Due to the constraints linked to the sensitive application context, the selected candidate will be approved following a background check.

The profile will be particularly suitable for someone able to work at the interface between fundamental research and technology transfer, with a taste for building prototypes, analysing real-world data, and co-designing solutions with institutional partners.

Financing Institution: BFC Region

Application deadline: 13th of July 2026

Starting date: September-October 2026

Monthly salary (rough): 1975€

Supervisor(s): Ana ROXIN PU (lead) / Laurence DUJOURDY IR-HDR (co-lead) / Ludovic JOURNAUX MCF (co-lead)

Contact:

Ana ROXIN: ana-maria.roxin@ube.fr

Laurence DUJOURDY: laurence.dujourdy@agrosupdijon.fr

Ludovic JOURNAUX: ludovic.journaux@agrosupdijon.fr

Applicants are invited to submit their applications to the PhD supervisors.

The application must include the following documents:

- CV
- A cover letter
- M1/M2 transcript of records (or equivalent degree)
- At least one reference letter