

Stage avec poursuite en thèse CIFRE : Quantification d'incertitude multivariée et robuste pour la vision, et applications ferroviaires critiques.

Laurent Gardès (SNCF)

Sébastien Gerchinovitz (IRT Saint Exupéry & Institut de Mathématiques de Toulouse)

Adrien Mazoyer (Institut de Mathématiques de Toulouse)

Résumé. Nous recherchons un.e candidat.e avec un solide bagage mathématique et informatique pour réaliser un stage puis une thèse CIFRE en apprentissage statistique profond, autour de questions de quantification d'incertitude robuste pour la vision par ordinateur dans le domaine ferroviaire. Un double intérêt pour les aspects théoriques et méthodologiques sera fortement apprécié.

Le stage aura lieu dans le cadre de la SNCF et sera localisé à Saint Denis.

Une poursuite en thèse CIFRE est prévue, avec un co-encadrement Institut de Mathématiques de Toulouse, IRT Saint Exupéry (dans le cadre du projet DEEL) et SNCF. Elle sera localisée soit principalement à Toulouse, dans les locaux du cluster IA ANITI, soit principalement à Saint Denis, dans les locaux de la SNCF (au choix du candidat).

Pour candidater. Merci d'écrire à sebastien.gerchinovitz@irt-saintexupery.com en joignant votre CV et vos derniers relevés de notes.

Contexte industriel : IA de confiance à la SNCF. Certaines technologies utilisant de l'Intelligence Artificielle sont actuellement utilisées (ou testées) à la SNCF. Un premier exemple est le projet de train autonome, qui a déjà démontré sa faisabilité mais se trouve contraint par des considérations de démonstration de sécurité lié à l'usage de l'IA. Il fait appel notamment à la reconnaissance de la signalisation latérale, via un détecteur d'objets basé sur un réseau de neurones. Il s'agit de détecter les différents panneaux et feux sur la voie, afin d'adapter la conduite automatique en conséquence.

Un autre exemple est la géolocalisation des trains, qui est utile pour de nombreuses fonctions : signalisation, suivi opérationnel, information voyageur. Depuis peu, au-delà des solutions existantes chères et imparfaites (limitation liée aux solutions GNSS notamment), la géolocalisation des trains s'envisage à l'aide de nouvelles technologies en lien avec l'odométrie et l'IA. L'une des approches consiste à analyser des signaux vibratoires issus de fibres optiques placées le long des voies et pré-traités sous la forme d'images. La tâche de segmentation d'image permet d'y repérer, avec une précision donnée, la présence d'un train.

Dans ces deux cas, obtenir des garanties statistiques sur les erreurs de prévision (pour la détection d'objet ou la segmentation) est d'importance majeure pour la SNCF.

Contexte scientifique : prédiction conforme multivariée et robuste pour l'apprentissage profond. La majorité des modèles d'apprentissage automatique fournissent des prédictions ponctuelles sans indicateurs d'incertitude statistiquement fiables. Cela est particulièrement problématique pour des applications critiques de l'IA, comme dans le domaine des transports. La quantification d'incertitude prédictive de modèles ML consiste à évaluer aussi finement que possible l'erreur de prédiction de ces modèles, voire à la calibrer en fonction d'objectifs statistiques précis.

Parmi les différentes approches existantes, la *prédiction conforme* combine de bonnes propriétés théoriques et une facilité de mise en œuvre. Initiée par Vovk [1] dans les années 2000, sa simplicité en a fait un outil d'intérêt croissant dans les milieux académiques [2,3] et industriels [4,5]. Cependant, la plupart des travaux en prédiction conforme souffrent de deux limitations :

- l'incertitude est souvent modélisée par un *paramètre scalaire*, ce qui réduit son application à des contextes simples ou très contraints. Quelques développements récents ont néanmoins été proposés, tels que la construction de régions quantiles conformes multivariées [6,7] ou la calibration séquentielle de deux paramètres pour la détection d'objets conforme [8].
- les garanties statistiques de la prédiction conforme sont souvent énoncées sous l'hypothèse que les données vues à la calibration et à l'inférence sont indépendantes et identiquement distribuées (ou, plus généralement, échangeables). De récents articles comme [9,10,11] ont étudié ces méthodes en présence de *distribution shifts*, mais sous des formes sans doute difficilement transposables à des objectifs de certification en milieu industriel.

Axes de recherche. Dans ce stage et la thèse qui suivra, le ou la candidate cherchera à réduire les deux limitations mentionnées ci-dessus.

Il ou elle développera et analysera de nouveaux algorithmes pour la prédiction conforme multivariée (calibration de plusieurs paramètres). Une première étape consistera à tenter d'étendre les récents travaux de [8] à trois paramètres ou plus, avec une analyse théorique et une application à la détection de signaux ferroviaires dont l'incertitude pourra dépendre de différents facteurs comme la distance estimée à la caméra ou à d'autres objets. Le problème de la segmentation conforme pour la géolocalisation de trains sera également étudié, dans la lignée des premiers travaux de [12], avec un travail de modélisation pour prendre en compte les spécificités du problème de localisation de trajectoire.

Le deuxième axe concerne la création de méthodes de prédiction conforme qui soient robustes aux distribution shifts sous une forme compatible avec des contraintes industrielles. Cette robustesse sera étudiée sous un axe novateur, en s'inspirant des récents travaux de [13,14] sur la transformation de lois de probabilité sous contraintes de moments ou de quantiles.

Pour ces deux axes de recherche, il sera attendu du ou de la candidate un aller-retour entre théorie et pratique, en proposant des développements théoriques et méthodologiques au plus près des objectifs finaux, en contribuant aux bibliothèques python open-source existantes (ajout des algorithmes nouvellement proposés), et en démontrant leur intérêt sur les cas d'usage de détection de signalisation et géolocalisation ferroviaire.

Profil recherché. Niveau Bac+5 (Ingénieur ou Master 2) avec une dominante Mathématiques Appliquées, notamment en machine learning. Nous cherchons un.e candidat.e avec les compétences suivantes :

- Connaissances théoriques solides en machine learning et en statistiques.
- Maîtrise de Python et des frameworks de deep learning (par ex : TensorFlow / PyTorch).
- Faire preuve d'autonomie, d'initiative et de rigueur.
- Maîtrise de l'anglais, tant à l'écrit qu'à l'oral.

Références.

[1] V. Vovk, A. Gammerman, and G. Shafer. Algorithmic Learning in a Random World. Springer-Verlag, 2005.

- [2] A. Angelopoulos, S. Bates. Conformal Prediction: A Gentle Introduction. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 16, 494-591, 2023.
- [3] S. Bates, A. Angelopoulos, L. Lei, J. Malik, M. Jordan. Distribution-Free, Risk-Controlling Prediction Sets. *Journal of the ACM*, 68, 2021.
- [4] F. de Grancey, J.-L. Adam, L. Alecu, S. Gerchinovitz, F. Mamalet, D. Vigouroux. Object Detection with Probabilistic Guarantees: A Conformal Prediction Approach. *WAISE@SAFECOMP*, 316-329, 2022
- [5] L. Andéol, T. Fel, F. de Grancey, L. Mossina. Confident Object Detection via Conformal Prediction and Conformal Risk Control: an Application to Railway Signaling. *COPA*, 36-55, 2023.
- [6] G. Thurin, K. Nadjahi, C. Boyer. Optimal transport-based conformal prediction. *ICML 2025*.
- [7] S. Braun, L. Aolaritei, M. Jordan, F. Bach. Minimum Volume Conformal Sets for Multivariate Regression. Preprint arXiv:2503.19068, 2025.
- [8] L. Andéol, L. Mossina, A. Mazoyer, S. Gerchinovitz. Conformal Object Detection by Sequential Risk Control. Preprint arXiv:2505.24038, 2025.
- [9] R.F. Barber, E.J. Candès, A. Ramdas, R.J. Tibshirani. Conformal prediction beyond exchangeability. *The Annals of Statistics*, 51, 816-845 , 2023.
- [10] I. Gibbs, E.J. Candès. Conformal inference for online prediction with arbitrary distribution shifts. *Journal of Machine Learning Research*, 25, 1-36, 2024.
- [11] F. Iutzeler, A. Mazoyer. Risk-controlling Prediction with Distributionally Robust Optimization. *Transactions on Machine Learning Research*, 2025.
- [12] L. Mossina, C. Friedrich. Conformal Prediction for Image Segmentation Using Morphological Prediction Sets. *MICCAI 2025*.
- [13] F. Bachoc, F. Gamboa, M. Halford, J.-M. Loubes, L. Risser. Explaining machine learning models using entropic variable projection. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 12, 1686-1715, 2023.
- [14] M. Il Idrissi, N. Bousquet, F. Gamboa, B. Iooss, J.-M. Loubes. Quantile-constrained Wasserstein projections for robust interpretability of numerical and machine learning models. *Electronic Journal of Statistics*, 18, 2721-2770, 2024.