

Titre : *Une approche d'IA sobre pour mettre à jour et expliquer l'alignement d'entités dans des graphes de connaissances évolutifs*

Direction de la thèse : Nathalie Pernelle (USPN, LIPN, équipe RCLN),

Co-encadrement : Danai Symeonidou (INRAE, Montpellier), Vincent Armant (IRD)

Contexte et problématique :

De nombreuses organisations représentent leurs données ou leurs connaissances, qui décrivent des entités du monde réel ou conceptuelles, sous forme de graphes de connaissances. Dans un graphe de connaissances (GC), un nœud modélise une entité identifiée (p. ex. un identifiant de ville) ou une valeur littérale (p. ex. le nombre d'habitants de la ville), et les arcs modélisent les relations sémantiques entre ces entités, ou entre entités et valeurs littérales. Ces graphes offrent un mode de représentation flexible et facilement compréhensible par un humain, et des langages standards ont été définis par le W3C pour les représenter afin de requêter, visualiser ou encore raisonner sur ce type de données. L'alignement d'entités consiste à identifier, à partir de descriptions hétérogènes et multi-sources, les identifiants d'entités qui représentent la même entité du monde réel. C'est une tâche indispensable du processus d'intégration de données, qui impacte la qualité de leur exploitation et des analyses que l'on souhaite effectuer en agrégeant des données issues de plusieurs sources. En raison de la volumétrie en constante augmentation de données représentées sous forme de graphes, il est nécessaire de développer des approches (semi-)automatiques d'alignement. Les approches existantes reposent essentiellement sur des méthodes d'apprentissage supervisé [1, 2] fondées sur l'apprentissage profond [12, 13], ainsi que sur des méthodes non supervisées fondées sur des règles [9] ou sur des approches hybrides [3]. Même si les approches les plus récentes [3, 4, 5] montrent de bonnes performances sur les jeux de données graphes standards (p. ex. Yago, DBpedia, Wikidata), elles peinent à se transposer à d'autres cas d'alignement d'entités observés dans les jeux de données du monde réel [6, 7, 8] représentant de grands graphes de connaissances épars (peu de relations entre les entités) et évolutifs (de nouvelles entités et relations sont mises à jour au fil du temps).

C'est le cas du graphe de connaissances des métadonnées de l'Infrastructure de Recherche DATA TERRA dans lequel l'INRAE et l'IRD sont investis [11]. Ces données sont fondamentales à la production d'indicateurs pour l'agriculture, l'environnement, la santé, la biodiversité, qui permettront de mieux anticiper les risques sanitaires ou climatiques tout en optimisant l'utilisation de ressources naturelles. Ce graphe de connaissances particulièrement hétérogène et évolutif est issu du moissonnage des pôles de données AERIS [19], Formaterre [18], Odatis [20], Theia [17], PNDB [21], qui collectent chacun des observations sur l'évolution d'un compartiment du système (resp. l'Atmosphère, la Terre solide, les Océans, la surface continentale et la biodiversité).

Les rares approches traitant de la tâche d'alignement pour des graphes de connaissances évolutifs [10] ont mis en place des stratégies privilégiant le calcul et la mise à jour rapides des alignements au détriment de la qualité des liens proposés, en particulier pour les graphes hétérogènes non-standards. De plus, dans ce contexte, pour renforcer la confiance des utilisateurs dans les décisions d'alignement, il est crucial de les expliquer [15] et, si possible, d'améliorer les approches d'alignement existantes en s'appuyant sur ces explications.

Afin de répondre aux contraintes de temps de calcul de l'alignement et de l'explication [10], tout en limitant l'usage extensif de ressources computationnelles, afin de réduire les

émissions de carbone, nous chercherons à explorer des approches numériques sobres offrant un bon compromis entre la qualité des explications et l'utilisation des ressources de calcul dans le contexte de graphes hétérogènes et évolutifs.

L'explicabilité définit la capacité d'un système à justifier ou expliquer ses décisions de manière compréhensible pour les utilisateurs humains. Dans le cadre de l'apprentissage automatique, il peut s'agir d'expliquer une seule prédiction d'un modèle d'IA (explicabilité locale) ou le fonctionnement global du modèle dans son ensemble (explicabilité globale). Une autre distinction réside dans la différence entre l'entraînement de modèles intrinsèquement explicables (explicabilité ante-hoc) et l'explication d'un modèle de type boîte noire après son entraînement (explicabilité post-hoc). Il existe de nombreux travaux actuellement concernant l'explicabilité (XAI) mais peu de travaux s'intéressent à l'explication des processus d'alignement automatique [14] : certains proposent une explication ante-hoc issue directement d'un processus d'alignement basé sur des règles [3], tandis que d'autres approches d'explication post-hoc se basent sur SHAP ou LIME [16]. Enfin, certains travaux ont pu montrer l'intérêt de la prise en compte de l'importance de certaines propriétés des entités dans la décision d'alignement pour améliorer la pertinence des explications et le processus d'alignement lui-même [22]. Cependant, aucune approche ne s'intéresse à la mise à jour d'explications et du processus d'alignement dans un contexte évolutif.

Les objectifs de cette thèse adresseront les questions de recherche suivantes :

Peut-on adapter les explications locales post-hoc, fondées sur les approches LIME ou SHAP [16], existantes dans un contexte de découverte d'alignements et de non alignement dans des graphes de connaissances statiques, afin de limiter leur temps de calcul dans le cas d'alignements issus de grands graphes évolutifs ?

Peut-on générer efficacement des explications post-hoc contrefactuelles dans ce contexte, et définir des approches de mise à jour de ces explications plus sobres qui permettraient de ne pas recalculer l'ensemble des explications (i.e., méthode itérative) ?

Comment ces types d'explications locales post-hoc peuvent permettre de corriger ces alignements ou d'ajuster les méthodes d'alignement utilisées dans ce contexte dynamique ?

Plan de thèse

La méthodologie envisagée durant la thèse pour répondre aux objectifs et aux questions de recherche est la suivante :

1ère année : Étude approfondie de l'état de l'art des méthodes d'alignement d'entités, avec une attention particulière portée à l'explicabilité et à la frugalité. Sélection des méthodes les plus pertinentes et expérimentation sur des données réelles (i.e. choix de sous-graphes de DATA TERRA et benchmarks classiques disponibles dans différentes versions comme DBPedia).

Un premier papier présentant l'étude de l'état de l'art sera soumis au cours de la première année dans une revue internationale (ex. Knowledge-Based Systems).

2ème année : Proposer une amélioration des approches d'explication post-hoc incrémentales basées sur SHAP ou LIME qui ne nécessitent pas le recalcul complet des

explications, et dépendantes des différents types de mise à jour du graphe possible (ajout d'entité, suppression/modification/ajout de propriétés dans la description des entités). Cette proposition fera l'objet d'une soumission dans une conférence internationale (ex. ISWC, CIKM).

3ème année : Proposition d'une approche incrémentale de génération d'explications contrefactuelles pour les alignements dans les graphes évolutifs. Les performances et la frugalité seront évaluées selon plusieurs dimensions : qualité des explications, temps de calcul, consommation mémoire et estimation de l'empreinte énergétique des modèles. Cette approche sera soumise à une conférence internationale de haut niveau (ex. WWW, AAI). La troisième année sera également consacrée à la rédaction du manuscrit de thèse et à la préparation de la soutenance.

Partenariats Nationaux :

Le co-encadrement se base sur une coopération existante entre D. Symeonidou (INRAE Montpellier), Vincent Armant (IRD Montpellier) et N. Pernelle. N. Pernelle est experte en découverte de connaissances dans les graphes de données. D.Symeonidou est experte en alignement de données dans les graphes de connaissances [9, 20,24,25] et elle a proposé des approches permettant de générer des explications pour le processus d'alignement [24] et pour la recherche d'information dans des graphes de connaissances [11], Vincent Armant est expert en intégration de données [9], et en explicabilité pour des systèmes complexes [11, 23].

Collaboration avec Jean-Christophe Desconnet, le responsable de l'interopérabilité des données du projet Gaia Data de l'Infrastructure de Recherche Data Terra qui est le nœud pilote l'écosystème européen de science ouverte (European Open Science Cloud - <https://www.data-terra.org/eosc>).

Travaux liés:

[1] Sun, Zequn, et al. "Bootstrapping entity alignment with knowledge graph embedding." *Ijcai*. Vol. 18. No. 2018. 2018.

[2] Wu, Yuting, et al. "Relation-aware entity alignment for heterogeneous knowledge graphs." *arXiv preprint arXiv:1908.08210* (2019).

[3] Peng, Yiwen, Thomas Bonald, and Fabian M. Suchanek. "FLORA: Unsupervised Knowledge Graph Alignment by Fuzzy Logic." *International Semantic Web Conference*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025.

[4] Zhu, Beibei, et al. "A survey: knowledge graph entity alignment research based on graph embedding." *Artificial Intelligence Review* 57.9 (2024): 1.

[5] Fanourakis, Nikolaos, et al. "Knowledge graph embedding methods for entity alignment: An experimental review." *arXiv preprint arXiv:2203.09280* (2022).

[6] Raoufi, Ensiyeh, et al. "Analysis of the Performance of Representation Learning Methods for Entity Alignment: Benchmark Versus Real-World Data." *Semantic Web* 17.1 (2026): 09217134251389825.

[7] Yang, Linyan, et al. "DAEA: Enhancing Entity Alignment in Real-World Knowledge Graphs Through Multi-Source Domain Adaptation." *Proceedings of the 31st International Conference on Computational Linguistics*. 2025.

- [8] Zhao, Xiang, et al. "An experimental study of state-of-the-art entity alignment approaches." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 34.6 (2020): 2610-2625.
- [9] **Danai Symeonidou, Vincent Armant, Nathalie Pernelle**. BECKEY: Understanding, comparing and discovering keys of different semantics in knowledge bases. *Knowledge Based Systems*, vol 195, pp 105708, 2020.
- [10] Yan, Yuchen. et al. "Dynamic Knowledge Graph Alignment". *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(5), 4564–4572. 2021.
- [11] **Armant, Vincent, ..., Danai Symeonidou**, et al. "Leveraging Knowledge Graphs for Earth System Dataset Discovery." *International Semantic Web Conference*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
- [12] Mao Xin et al. "Boosting the Speed of Entity Alignment 10×: Dual Attention Matching Network with Normalized Hard Sample Mining." *Proceedings of the Web Conference 2021 (WWW '21)*
- [13] Y. Li, J. Li, Y. Suhara, A. Doan, and W.-C. Tan, "Deep Entity Matching with Pre-Trained Language Models," *Proc. VLDB Endow.*, vol. 14, no. 1, pp. 50–60, Sep. 2020.
- [14] Saravanan Thirumuruganathan, et al. "Explaining Entity Resolution Predictions: Where are we and What needs to be done?" *HILDA@SIGMOD 2019*: 10:1-10:6
- [15] Yang, Linyao, et al. "Integrating knowledge from knowledge graphs and large language models for explainable entity alignment." *Information Fusion* (2025): 103587.
- [16] Barlaug, Nils. "LEMON: explainable entity matching." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 35.8 (2022): 8171-8184.
- [17] THEIA. <https://catalogue.theia-land.fr>
- [18] FormaTerre. <https://en.poleterresolide.fr/data-access/catalog/#/>
- [19] AERIS. <https://www.aeris-data.fr/en/catalogue-en>
- [20] ODATIS. <https://www.odatis-ocean.fr/>
- [21] PNDB. <https://pndb.opendatasoft.com/pages/accueil/>
- [22] Generating Explanations to Understand and Repair Embedding-based Entity Alignment Xiaobin Tian, Zequn Sun, Wei Hu, the 40th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE 2024).
- [23] **Armant Vincent**, Diagnostic distribué de systèmes respectant la confidentialité. Thèse soutenue en 2012 (Un diagnostic est une explication du comportement anormale d'un système distribué).
- [24] Olivier Inizan, Fatiha Saïs, Anne Goelzer, Joe Raad, **Danai Symeonidou**: Abstracting Entity Matching for Analysing and Explaining Identity and Difference Decision and Indecision. *KES 2025*: 2125-2134.
- [25] Raphaël Conde Salazar, Clément Jonquet, **Danai Symeonidou**: Classification of Linking Problem Types for Linking Semantic Data. *Journal SEMANTiCS 2023*: 194-209.