



N° d'ordre NNT : 2024LYO20005

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 512
Informatique et Mathématiques

Discipline : Informatique

Soutenue publiquement le 28 mars 2024 par :

Boubou Thiam NIANG

A Model-Driven Engineering and Software Product Line Approach to Support Interoperability in Systems of Information Systems.

Devant le jury composé de :

Christophe DANJOU, Professeur, École Polytechnique de Montréal, Président

Christelle URTADO, Professeure, IMT Mines Alès, Rapporteuse

Abdelhak-Djamel SERIAI, Maître de conférences HDR, Université Montpellier, Rapporteur

Yacine OUZROUT, Professeur, Université Lumière Lyon 2, Examinateur

Jessie GALASSO-CARBONNEL, Professeure Adjointe, McGill University, Examinatrice

Giacomo KAHN, Maître de conférences, Université Lumière Lyon 2, Examinateur

Amel BENNACEUR, Directrice de recherche, The Open University, Examinatrice

Jannik LAVAL, Maître de conférences HDR, Université Lumière Lyon 2, Directeur de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer ni l'adapter.

Résumé long :

Les systèmes d'information modernes requièrent une communication et une coordination sans faille entre leurs composants. Les organisations ont du mal à s'adapter aux changements fréquents lors de leurs engagements avec divers partenaires industriels en raison de la création manuelle et au cas par cas des mécanismes d'interopérabilité. Ces mécanismes doivent être réutilisables pour éviter des processus chronophages et sujets aux erreurs dans un environnement en constante évolution. Leur manque de réutilisation résulte de leur intégration fréquente dans des composants de logique métier, créant un couplage fort et rendant la maintenance complexe sans altérer le fonctionnement global du système.

Berger-Levrault est éditeur de logiciels, fournit principalement les institutions publiques, maintenant activement l'interopérabilité pour s'ajuster aux réformes fréquentes du secteur public local. La croissance par acquisitions d'entreprises entraîne une diversité d'applications héritées, avec des variations dans le langage, l'architecture, et les normes. L'objectif principal est de créer une solution d'interopérabilité adaptable facilitant l'interaction entre les composants du système d'information et les systèmes externes. Les défis incluent l'adaptation aux règles changeantes, la gestion de volumes de données variables, et l'intégration de nouveaux composants dans les institutions publiques.

Cette thèse analyse les flux d'échange de données entre composants et systèmes, propose une approche pour implémenter et faire évoluer les mécanismes d'interopérabilité, minimisant l'impact sur les opérations du système d'information. La méthodologie démarre par une vision réifiée des mécanismes d'interopérabilité, extrayant les mécanismes d'échange des constituants de la logique d'entreprise pour les considérer comme des connecteurs d'interopérabilité de première classe. Pour ce faire, on procède par rétro-ingénierie pour extraire les fonctionnalités des mécanismes d'interopérabilité existants et les réifie sous la forme d'un composant tangible, le connecteur, au sein du système d'information. L'analyse, s'appuie sur référentiel créé, comprenant des projets sélectionnés de manière transparente, garantissant un nombre minimal de projets et couvrant tous les modèles d'intégration d'entreprise provenant de différentes sources. Le métamodèle proposé confirme et valide cette réification en termes de complétude et d'extensibilité. La complétude du métamodèle de connecteur est validée par un processus bien défini, tandis qu'un autre processus garantit l'extensibilité du métamodèle. Le métamodèle extensible révèle que les connecteurs sont des entités communes, ce qui conduit à l'approche ConPL, un cadre de ligne de produits logiciels adapté aux connecteurs. L'outil PhaDOP a été utilisé pour mettre en œuvre cette approche, et une preuve de concept a été démontrée avec un cas d'utilisation spécifique. Des tests de performance ont été effectués sur la structure de

représentation des connecteurs proposée. Le cadre ConPL est validé par un cas d'utilisation industriel.

Pour arriver à ces travaux nous avons rédigé plusieurs chapitres de contribution. Le premier chapitre de contribution met en avant l'importance des mécanismes d'interopérabilité dans les systèmes d'information, en soulignant leur transformation de simples codes dispersés à des composants tangibles du système grâce à la réification. En se basant sur des exemples concrets et une analyse approfondie, l'étude montre comment cette approche facilite la gestion des interactions entre systèmes disparates, tout en permettant une évolutivité et une adaptabilité accrues. On se focalise sur les interactions asynchrones, avec pour objectif final de concrétiser ces mécanismes d'interopérabilité dans un système global plus compréhensible et efficace. Le deuxième chapitre de contribution se focalise sur la validation du connecteur réifié, c'est-à-dire considéré comme un composant à part entière du système, matérialisé par le métamodèle créé. Deux principaux axes sont abordés : évaluer l'exhaustivité du métamodèle des connecteurs d'interopérabilité en fonction de la couverture dans le référentiel, et confirmer ses capacités d'extensibilité. La création du référentiel implique une recherche sur diverses plateformes en ligne pour obtenir une collection de projets incluant des connecteurs couvrant tous les motifs d'interopérabilité, via un heuristique proposé. Malgré la complexité, l'approche offre une méthode transparente pour garantir l'adaptabilité du métamodèle. Le troisième chapitre de contribution présente une méthode innovante pour créer et générer les d'interopérabilité, utilisant l'ingénierie de lignes de produits logiciels. En utilisant un référentiel de connecteurs, nous construisons un modèle de fonctionnalités complet, intégrant le métamodèle du connecteur. Cette approche comprend des règles explicites et des transformations automatisées pour convertir le modèle de fonctionnalité en diagramme de classes, et introduit un métamodèle pour les artefacts réutilisables. Le chapitre suivant démontrera sa faisabilité à travers des études de cas industriels, tandis que les futures itérations visent à développer un modèle plus inclusif pour différentes plateformes d'interopérabilité, avec un support complet pour la gestion du cycle de vie des connecteurs. Ensuite, nous avons introduit le cadre PhaDOP, une approche centrée sur la transformation des lignes de produits logiciels. Conçu pour mettre en œuvre des LPL en utilisant le paradigme de la programmation orientée delta (DOP) et exploitant l'ingénierie dirigée par les modèles, il se concentre actuellement sur la génération de code orienté objet en mettant l'accent sur la suppression d'entités. Nos efforts en cours visent à élargir ses capacités pour inclure une gamme plus large d'opérations, y compris l'ajout d'entités. Le processus complet présenté valide la fonctionnalité du cadre à travers un cas d'utilisation simple. Nous poursuivons activement les améliorations continues. Pour finir, nous avons présenté une expérience industrielle visant à valider la faisabilité de mettre en œuvre une ligne de produits logiciels pour les connecteurs d'interopérabilité. L'expérience avait pour objectif de vérifier le processus de bout en bout, de l'identification des fonctionnalités à la génération de produits, en utilisant la programmation orientée delta (DOP) et l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE). Bien que réussie, des défis sont apparus dans la gestion des lignes de produits au niveau de la granularité des méthodes, résolus grâce au refactoring du code. Malgré la confirmation de la praticabilité du cadre

PhaDOP dans un contexte industriel, des axes d'amélioration, tels que la prise en compte des paramètres de méthode manquants et l'amélioration de la mise en forme du code, ont été identifiés pour des études futures.

Pour aboutir à ce résultat, plusieurs chapitres de contribution ont été élaborés. Le premier chapitre met en lumière l'importance des mécanismes d'interopérabilité dans les systèmes d'information, soulignant leur évolution de simples codes dispersés à des composants concrets du système grâce à la réification. À travers des exemples concrets et une analyse approfondie, il démontre comment cette approche facilite la gestion des interactions entre systèmes hétérogènes, tout en favorisant leur évolutivité et adaptabilité. Nous nous sommes focalisées sur les interactions asynchrones. Le processus de réification aboutit à la proposition d'un métamodèle spécifiant toutes les caractéristiques nécessaires à un connecteur pour une communication asynchrone.

Le deuxième chapitre se concentre sur la validation du connecteur réifié, considéré comme un composant à part entière du système et matérialisé par le métamodèle créé. Deux axes principaux sont explorés : évaluer l'exhaustivité du métamodèle des connecteurs d'interopérabilité en fonction de sa couverture dans le référentiel, et confirmer ses capacités d'extensibilité. La création du référentiel implique une recherche sur diverses plateformes en ligne pour obtenir une collection de projets incluant des connecteurs couvrant tous les motifs d'interopérabilité, via une heuristique proposée. Malgré sa complexité, cette approche offre une méthode transparente pour garantir l'adaptabilité du métamodèle.

Le troisième chapitre présente une méthode innovante pour générer des connecteurs d'interopérabilité, utilisant l'ingénierie de lignes de produits logiciels. À partir d'un référentiel de connecteurs, un modèle de fonctionnalités complet est construit, intégrant le métamodèle du connecteur. Cette approche comprend des règles explicites et des transformations automatisées pour convertir le modèle de fonctionnalité en diagramme de classes, introduisant ainsi un métamodèle pour les artefacts réutilisables. Les études de cas industriels démontrent la faisabilité de cette approche, tandis que les futures itérations visent à développer un modèle plus inclusif pour différentes plateformes d'interopérabilité, avec un support complet pour la gestion du cycle de vie des connecteurs.

Ensuite, le cadre PhaDOP est introduit, une approche centrée sur la transformation des lignes de produits logiciels. Conçu pour mettre en œuvre des LPL en utilisant le paradigme de la programmation orientée delta (DOP) et exploitant l'ingénierie dirigée par les modèles, il se concentre initialement sur la génération de code orienté objet en mettant l'accent sur la suppression d'entités. Des efforts sont en cours pour élargir ses capacités, notamment en incluant une gamme plus large d'opérations, telles que l'ajout d'entités. Le processus complet présenté valide la fonctionnalité du cadre à travers un cas d'utilisation simple, avec des améliorations continues en cours.

Enfin, une expérience industrielle est présentée pour valider la faisabilité de mettre en œuvre une ligne de produits logiciels pour les connecteurs d'interopérabilité. Cette expérience vise à vérifier le processus de bout en bout, de l'identification des fonctionnalités à la génération de produits, en utilisant la programmation orientée delta

(DOP) et l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE). Bien que réussie, des défis ont émergé dans la gestion des lignes de produits, notamment au niveau de la granularité des méthodes, résolus grâce au refactoring du code. Malgré la confirmation de la praticabilité du cadre PhaDOP dans un contexte industriel, des axes d'amélioration ont été identifiés pour des études futures, tels que la prise en compte des paramètres de méthode manquants et l'amélioration de la mise en forme du code.