

MoRe MBSE

Modularité et Réutilisabilité en Ingénierie Systèmes Basée sur les modèles afin de supporter la transformation numérique de l'ingénierie

Modularity and Reusability in Model-Based Systems Engineering supporting Digital Transformation of Engineering

Thèse dirigée par Dr. HDR A. Aubry et Dr. P. Marangé du CRAN

Début 1/03/2025 – Fin 29/02/2028

Mots-clés : MBSE, transformation numérique de l'ingénierie, réutilisabilité des modèles, maturité des modèles, adoption du MBSE.

Contexte

Le contexte général de cette thèse CIFRE s'inscrit dans le cadre de la transformation numérique de l'ingénierie au sein de l'entreprise Crouzet et plus spécifiquement sur la mise en œuvre de l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles (Model-Based Systems Engineering). Il s'agit de lui donner la capacité de se projeter dans des programmes tels que la « Décarbonation de l'aviation » porté par le CORAC (Conseil de Recherche pour l'Aviation Civile) sur l'aviation civile à l'horizon 2035, dans une vision d'Entreprise Étendue en lien avec les donneurs d'ordres et les fournisseurs du domaine aéronautique civil. Ainsi les intégrateurs requièrent de leurs fournisseurs des modèles de simulation, qu'ils intègrent dans des simulations à l'échelle des systèmes (avion ou automobile), pour valider au plus tôt les performances des solutions proposées. Un autre challenge pour l'entreprise est de passer de l'échelle de composants pour l'industrie aéronautique ou automobile à celle de systèmes tels que des interfaces Humain-Machine.

L'approche Model-Based Systems Engineering (MBSE) présente de nombreux avantages (formalisation des artefacts d'ingénierie, communication entre les acteurs, vérification/validation plus rigoureuse, traçabilité, analyse des impacts de changement des exigences, automatisation de la production de livrables ...) [1], mais demande une bonne connaissance des processus d'Ingénierie Systèmes, de profondes modifications dans l'organisation de l'entreprise, dans les processus et méthodes d'ingénierie, ainsi que dans l'infrastructure technique et logicielle d'ingénierie [2,3]. Le challenge est de conduire cette transformation sans perte du savoir-faire de l'entreprise, et en facilitant le travail des ingénieurs et leur appropriation du MBSE. De plus, afin de raccourcir les délais d'ingénierie, la prise en compte au plus tôt de l'industrialisation du produit lors de sa conception nécessite de prendre en compte des problématiques de co-ingénierie entre le produit et son système industriel et d'étendre le MBSE au-delà du produit [4].

La mise en œuvre des méthodes et des outils associés au MBSE nécessite un environnement numérique d'ingénierie basé notamment sur une Authoritative ou Single Source Of Truth (ASOT ou SSOT) [5] pour le partage d'une référence unique des données et modèles et supportant une continuité digitale (Digital Thread) entre les différents artefacts d'ingénierie pour la traçabilité et les analyse d'impact [6]. Comme l'ont montré de nombreux travaux de recherche, le succès de la démarche d'intégration du MBSE dans une entreprise nécessite des efforts d'adoption cadrés par une roadmap d'adoption [7].

Sujet

Dans une entreprise sous-traitante de l'industrie aéronautique comment faciliter le déploiement et l'adoption de l'ingénierie systèmes basée sur des modèles en utilisant la modélisation pour formaliser et capitaliser le savoir-faire de l'entreprise et simplifier le travail quotidien des ingénieurs, des modélisateurs et les échanges avec les autres parties prenantes d'un projet ? Ce sujet se déroule sur 3 axes : modélisation, environnement numérique et adoption.

- **Modélisation**

Il s'agit notamment de mettre en application des principes de standardisation et de modularité pour concevoir des architectures modulaires de modèles, favorisant la réutilisation et permettant une conception de produits plus rapide, par composition de différents modèles. A noter que les modèles peuvent être des modèles de produits (exemple : modèle d'un bouton pour la modélisation d'un grip d'aéronef). Les modèles considérés sont soit descriptifs et spécifient les architectures en termes de structure et de comportement, soit analytiques et supportent des simulations pour vérifier tout ou partie des systèmes [8]. Il est également important de mettre en œuvre ces modèles afin de pouvoir mener des analyses d'impacts liés à des modifications d'exigences des donneurs d'ordre.

On peut s'appuyer pour cela sur des propriétés recherchées de ces modèles dans le contexte spécifique de l'entreprise : adapté à l'échelle des problèmes (scalable), exploitables et supportant les décisions (actionnable), en adéquation avec le cycle de vie du système à faire, réutilisables, agiles, dignes de confiance, reconfigurables, modulaires... Ces propriétés doivent être définies formellement afin de faciliter leur vérification [9].

Pour la réutilisation des modèles, de la conception vers la fabrication de produits, il convient de définir des patrons de conception de modèles et de produits intégrant le savoir-faire de l'entreprise, associant des modèles produits à des modèles du système industriel.

Pour favoriser la réutilisation, le second volet de la recherche concerne l'identification des modèles (carte d'identité des modèles, modèles d'intention) à capitaliser ou sous-modèles pour leur archivage et leur recherche. Plusieurs travaux ont abordé le sujet [10, 11, 12] dans des contextes différents, et méritent d'être approfondis en les couplant avec la définition de la maturité d'un modèle pour sa réutilisation et les processus associés (vérification / validation de modèles descriptifs ou de simulation).

La pertinence de l'utilisation des outils de l'IA et du Machine Learning pour l'extraction de patrons de modélisation et leur capitalisation doit être analysée parmi les solutions possibles [13,14,15].

- **Environnement numérique – Continuité digitale – ASOT**

L'environnement numérique, support à la mise en œuvre du MBSE, est classiquement réduit au choix d'un outil logiciel de modélisation, il doit être étendu à la méthode de modélisation et à l'environnement numérique de modélisation et de partage.

La méthode est à choisir selon les objectifs de l'entreprise et les objectifs de modélisation. Il sera donc pertinent d'analyser la littérature pour déterminer des critères de décision pour le choix d'une méthode en accord avec les exigences de modularité et de réutilisation.

L'environnement numérique doit être adapté aux enjeux auxquels l'entreprise sera confrontée. Il est essentiel de construire une Authoritative Source of Truth pour valider, qualifier et partager les modèles et données entre les différentes parties prenantes, afin de référencer les modèles sûrs à exploiter par les équipes [5].



Cette source doit permettre de développer le système industriel, de réaliser des simulations et des optimisations, ou encore de produire des rapports avec des modèles et données de référence partagés.

Pour l'échange de modèles (de simulation) avec les partenaires extérieurs d'un projet, une attention particulière doit être portée sur la propriété intellectuelle et la non-diffusion du savoir-faire de l'entreprise au travers des modèles.

Associée à la source de vérité, la continuité digitale soulève des problématiques d'intégration et d'interopérabilité des modèles et des applications, largement documentés dans la littérature mais toujours source de difficultés de mise en œuvre. Ainsi les standards actuels peuvent être envisagés (Open Services for Lifecycle Collaboration – OSLC ou Open Model Based Engineering Environment openMBEE) et utilisent les technologies web pour relier les différentes vues des artefacts d'ingénierie tout au long du cycle de vie ou pour connecter les différents outils d'ingénierie [16].

- **Adoption**

Enfin le dernier point scientifique d'intérêt concerne l'adoption du MBSE au sein des équipes d'ingénierie. La littérature récente fait état de la criticité du processus d'adoption du MBSE et des transformations, organisationnelles et opérationnelles induites [17].

Il est pertinent d'utiliser des frameworks d'architecture d'entreprise tels que TOGAF (The Open Group Architecture Framework) ou UAF (Unified Architecture Framework), car ils offrent des méthodologies éprouvées pour structurer et gérer la transformation des systèmes d'information et des processus organisationnels [18]. En s'appuyant sur ces cadres, on peut identifier de manière systématique les obstacles potentiels à l'adoption de nouvelles solutions (freins), ainsi que les facteurs qui faciliteront cette adoption (leviers). Ces frameworks permettent également de modéliser la situation actuelle ("As-Is") et la situation cible ("To-Be"), tout en définissant une feuille de route détaillée pour guider la transition de l'état actuel vers l'état désiré, en prenant en compte les priorités stratégiques, les ressources disponibles, et les étapes clés à franchir. La roadmap d'adoption doit se développer selon les axes organisationnels et techniques avec des problématiques d'alignement entre ces deux axes, incluant des formations et ateliers, des bacs à sable...

Dans un second temps, il est important de mesurer le niveau d'adoption du MBSE et d'analyser l'impact de cette adoption sur les performances de l'entreprise. Cela passe par la définition et la mise en place d'indicateurs de la maturité d'adoption du MBSE (nombre de personnels formés, personnel impliqués dans des projets, ...), puis par la définition et mise en place d'indicateurs mesurant l'impact de la maturité sur les performances de l'entreprise en interne et en externe (conception, industrialisation, livraison, ...).



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

CRAN UMR 7039

CAMPUS SCIENCES - BP 70239 - 54506 Vandœuvre-lès-Nancy - Cedex

Tél. : + 33 (0)383684419 - Fax : + 33 (0)383684437

E-mail : cran-secretariat@univ-lorraine.fr - Web : www.cran.univ-lorraine.fr

Organisation de la thèse

La première année de la thèse sera consacrée à l'identification et l'analyse des problématiques industrielles afin de formaliser plus précisément les problématiques de recherche et de réaliser l'analyse de la littérature associée à ces problématiques.

La deuxième année sera consacrée à la définition et la formalisation de l'approche MBSE permettant la modularité et la réutilisabilité des modèles dans l'ingénierie des produits dans une entreprise comme Crouzet ainsi que la définition de l'environnement technique permettant la mise en œuvre de cette approche. Le protocole expérimental sur un cas d'étude Crouzet permettant de tester l'approche et son environnement technique devra également être défini à la fin de cette seconde année. Le dernier axe de cette seconde année concernera l'adoption de la démarche MBSE afin de définir les pratiques d'adoption dans une entreprise comme Crouzet.

La dernière année permettra d'expérimenter l'ensemble des résultats sur le cas d'étude Crouzet et la rédaction du manuscrit de thèse.

L'encadrement de la thèse coté Crouzet sera assuré par Benjamin BOZON, ingénieur responsable de l'équipe « Ingénierie Systèmes » chez Crouzet. L'entreprise Crouzet apportera son expertise sur l'ingénierie de composants et systèmes d'interfaces humain-machine pour l'aéronautique. Elle fournira de plus le cas d'étude industriel pour l'expérimentation des résultats de la thèse associée à ce projet.

L'encadrement de la thèse coté CRAN sera assuré par Alexis AUBRY, Maître de Conférences – HDR, et par Pascale MARANGE, Maîtresse de Conférences.

Le CRAN apportera son expertise autour du MBSE (définition de méthodologies, approches, modèles et outils pour le MBSE). Ce projet fait suite à d'autres thèses et des projets autour du MBSE et de la transformation numérique de l'ingénierie : chaire industrielle ACTE MBSE (Actionable Collaborative Trustworthy Executable Model-Based Systems Engineering) avec AIRBUS¹, projet européen EDINAF². Dans le cadre de la chaire ACTE MBSE, Pascale Marangé encadre une thèse autour de la vérification de modèles pour l'ingénierie des exigences [9,19]. Dans le cadre de cette chaire, Alexis Aubry encadre une thèse autour de la co-ingénierie du système d'intérêt et de son système industriel [4] dans un contexte MBSE. Pascale Marangé et Alexis Aubry sont impliqués dans le WP9 du projet EDINAF³ dont l'un des objectifs est d'identifier les méthodes, modèles, outils pour l'ingénierie numérique des systèmes de navires de guerre numériques.

Références

- [1] Henderson K, Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. *Systems Engineering*. 2021; 24: 51–66. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/sys.21566>
- [2] Gregory Vial, Understanding digital transformation: A review and a research agenda, *The Journal of Strategic Information Systems*, Volume 28, Issue 2, 2019, Pages 118-144, ISSN 0963-8687, <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003>
- [3] Papke, B.L., Wang, G., Kratzke, R. and Schreiber, C. (2020), Implementing MBSE – An Enterprise Approach to an Enterprise Problem. *INCOSE International Symposium*, 30: 1550-1567. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/j.2334-5837.2020.00803.x>

¹ <https://factuel.univ-lorraine.fr/node/16927>

² [Project – EDINAF](#)

³ [Work Packages – EDINAF](#)

- [4] Elliott Duverger, Alexis Aubry, Eric Levrat, Rebeca Arista, Early concurrent engineering in the aerospace industry supported by a Digital Thread framework, IFAC-PapersOnLine, Volume 58, Issue 19, 2024, Pages 510-515, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.263>
- [5] Smith, T., Payne, C. and Shackleton, J. (2022), Constructing an Authoritative Source of Truth in a Changing Information Landscape. INSIGHT, 25: 29-33. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/inst.12369>
- [6] S. Wu, J. Lu, Z. Hu, P. Yang, G. Wang and D. Kiritsis, "Cognitive Thread Supports System of Systems for Complex System Development," 2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE), Västerås, Sweden, 2021, pp. 82-87, doi:10.1109/SOSE52739.2021.9497473.
- [7] McDermott, T. and Verma, D. (2022), Guiding Systems Engineering Research for Enhanced Impact in the Development of Increasingly Complex Cyber-Physical Systems. INSIGHT, 25: 23-28. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/inst.12407>
- [8] Friedenthal, S. (2018), REQUIREMENTS FOR THE NEXT GENERATION SYSTEMS MODELING LANGUAGE (SysML® v2). INSIGHT, 21: 21-25. <https://doi.org/10.1002/inst.12186>
- [9] Bacquet, C., Marangé, P., Bonjour, É. and Kerbrat, A. (2023), Challenges in Early Verification and Validation of System Requirements. INSIGHT, 26: 12-14. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/inst.12462>
- [10] Göknur Sirin. Ingénierie des systèmes basés sur les modèles (MBSE) appliquée au processus de conception de simulation complexe : vers une ontologie de la modélisation et la simulation pour favoriser l'échange des connaissances en entreprise étendue. Other. Ecole Centrale Paris, 2015.
- [11] Fabien Retho. Méthodologie collaborative d'aide à la construction de produits virtuels pour la conception d'aéronefs à propulsion électrique.. Autre. CentraleSupélec, 2015.
- [12] Q. Wu, D. Gouyon, É. Levrat and S. Boudau, "Use of Patterns for Know-How Reuse in a Model-Based Systems Engineering Framework," in IEEE Systems Journal, vol. 14, no. 4, pp. 4765-4776, Dec. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2020.2975116
- [13] Bader, E. ; Vereno, D. and Neureiter, C. (2024). Facilitating User-Centric Model-Based Systems Engineering Using Generative AI. In Proceedings of the 12th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering - MBSE-AI Integration; ISBN 978-989-758-682-8; ISSN 2184-4348, SciTePress, pages 371-377. DOI: 10.5220/0012623200003645
- [14] Tikayat Ray, A., Cole, B. F., Pinon Fischer, O. J., Bhat, A. P., White, R. T., & Mavris, D. N. (2023). Agile Methodology for the Standardization of Engineering Requirements Using Large Language Models. Systems, 11(7), 352.
- [15] Darm, P., Marchetti, F., Garcia, G., Redondo, P. M., Riccardi, A., & Fernández, A. G. (2023, October). Leveraging language models semantic similarity capabilities to facilitate information reuse in system engineering. In 74th International Astronautical Congress.
- [16] Benjamin Kruse, Mark Blackburn, Collaborating with OpenMBEE as an Authoritative Source of Truth Environment, Procedia Computer Science, Volume 153, 2019, Pages 277-284, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.05.080>
- [17] Kozak, L., Bonjour, E., Mayer, F. and Micaëlli, J.-P. (2023), Challenges in Developing a Method to Support the Adoption of a Model-Based Systems Engineering Methodology. INSIGHT, 26: 15-17. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/inst.12463>
- [18] Morkevicius, A., Aleksandraviciene, A. and Krisciuniene, G. (2021), From UAF to SysML: Transitioning from System of Systems to Systems Architecture. INCOSE International Symposium, 31: 585-598. <https://doi-org.bases-doc.univ-lorraine.fr/10.1002/j.2334-5837.2021.00856.x>
- [19] C. Bacquet, P. Marangé, E. Bonjour, A. Kerbrat. Requirements structure for system requirements formal modelling, verification and validation. 18th IFAC Symposium on Information



Control Problems in Manufacturing, INCOM 2024, Aug 2024, Vienne,
Austria. ([10.1016/j.ifacol.2024.09.194](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.194))



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

CRAN UMR 7039

CAMPUS SCIENCES - BP 70239 - 54506 Vandœuvre-lès-Nancy - Cedex
Tél. : + 33 (0)383684419 - Fax : + 33 (0)383684437
E-mail : cran-secretariat@univ-lorraine.fr - Web : www.cran.univ-lorraine.fr