



HAL
open science

Réutilisation de modèles en ingénierie système et écoconception

Raphael Chenouard, Dalila Tamzalit, Arnaud Dieumegard

► **To cite this version:**

Raphael Chenouard, Dalila Tamzalit, Arnaud Dieumegard. Réutilisation de modèles en ingénierie système et écoconception. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04397915

HAL Id: hal-04397915

<https://hal.science/hal-04397915>

Submitted on 16 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Réutilisation de modèles en ingénierie système et écoconception

R. Chenouard ^{a,*}, D. Tamzalit ^a, A. Dieumegard ^b

^a Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

^b Obeo, 7 Boulevard Ampère - 44481 Carquefou, France

* e-mail : raphael.chenouard@ec-nantes.fr

1. INTRODUCTION

En ingénierie système (IS), le processus de développement est souvent basé sur le cycle en V. En s'appuyant sur ce schéma, diverses méthodes de conception ont été définies tout en se basant sur des modèles informatiques. Les travaux dans le domaine de l'ingénierie des modèles ont également permis de développer des méthodes de conception intégrées, basées sur des modèles (MBSE : *Model-Based Systems Engineering*), comme par exemple la méthode ARCADIA et la plateforme Capella [1]. Les approches MBSE permettent de faciliter les transitions entre les différentes phases de développement tout en assurant une meilleure traçabilité des données.

Dans le domaine de l'écoconception, les données relatives aux impacts environnementaux sont souvent évaluées tardivement dans le processus de développement d'un système. En effet, le niveau de détail nécessaire est alors un frein à une évaluation précoce de ces impacts avec une démarche d'analyse de cycle de vie (ACV). Cependant, les choix de conception effectués au plus tôt sont souvent déterminants pour la suite du processus de développement. En effet, les choix de principes d'architecture ou de technologie sont souvent effectués très tôt, alors que les composants du système ne sont pas encore entièrement déterminés. Dans le cadre d'un système complexe, les nombreux éléments modélisés, ainsi que les nombreuses évolutions de la définition du système rendent d'autant plus difficile l'intégration et le maintien de la cohérence de l'évaluation environnementale dans le processus de conception.

Dans le cadre d'une évaluation au plus tôt des impacts environnementaux, il n'est pas possible de définir exhaustivement les éléments nécessaires à une évaluation environnementale complète, car un certain nombre de choix de conception n'ont pas encore été faits. Dans la plupart des cas, des systèmes similaires ont déjà été conçus et évalués. En s'appuyant sur ces éléments existants, il est alors possible de construire des modèles d'évaluation environnementale s'appuyant sur ces précédents modèles pour faire de premiers calculs qui pourront être raffinés au fur et à mesure de l'avancement de la définition du système.

L'essor de la prise en compte des critères environnementaux dans les phases amonts de la conception d'un produit a donné lieu à divers travaux sur de nouvelles méthodes et cadre d'écoconception [2,3,4,5]. Depuis la norme ISO 15288 [6], l'ingénierie système intègre la prise en compte du cycle de vie du système, ce qui permet d'intégrer les démarches d'écoconception au processus d'IS [7]. Cependant, les environnements et les logiciels existants restent toujours hétérogènes quand on considère les outils d'IS et d'ACV [4,5].

Dans ce travail, nous avons exploré les possibilités de réutilisation de modèles dans un cadre d'évaluations environnementales précoces en ingénierie système. L'approche MBSE complétée par l'outillage produit durant le projet EcoPlex¹ a permis d'établir un pont entre l'outil d'ACV OpenLCA [1] et la plateforme Capella [8].

La section suivante décrit les principaux mécanismes de réutilisation de modèles identifiés. La section 3 décrit certains de ces mécanismes mis en œuvre dans l'outil produit durant le projet EcoPlex proposant une extension

¹ <https://www.ecoplex.fr/>

de la méthode Arcadia et de la plateforme Capella. La section 4 illustre l'approche sur le cas d'une cafetière électrique et la section 5 fait le bilan du travail réalisé et des défis restants.

2. MECANISMES DE REUTILISATION DE MODELES

D'un point de vue générique, un modèle au sens de l'ingénierie des modèles, n'est qu'un graphe dont la structure et la sémantique sont définis par un métamodèle [9]. Réutiliser un modèle ou une partie de modèle dans un nouveau modèle est donc l'intégration d'un (sous-)graphe dans un autre. Cependant, le contexte de MBSE et l'écoconception apportent une sémantique plus riche qui permet de considérer des scénarios spécifiques de réutilisation. Nous en considérons principalement trois : la définition d'un nouveau système utilisant des éléments préexistants, l'évolution d'un système existant et la définition d'un système proche d'un système existant. En plus de gérer l'intégration des éléments d'un modèle, le principal enjeu est d'accorder les données environnementales avec ces scénarios de réutilisation de parties de modèles. Dans le cadre du développement d'un nouveau système, ces trois scénarios de réutilisation de modèles sont souvent appelés de manière croisée.

2.1. Réutilisation de composants existants

Une partie de l'activité de conception d'un système complexe revient à sélectionner des composants existants pour les intégrer dans une architecture globale, les autres composants étant dimensionnés spécifiquement. Dans une démarche ACV, les données environnementales sont définies en lien avec une unité fonctionnelle donnant le périmètre du cycle de vie considéré. Les principales caractéristiques de ces données ACV sont la durée de vie prévue du système, les modalités d'extraction et de fabrication, les modalités d'usage et celles de fin de vie pour toutes les ressources mobilisées ou tous les flux entrants ou sortants.

Dans une approche systémique, chaque composant est aussi considéré comme un système avec la même modélisation possible que pour le système de plus haut niveau. Ainsi, nous faisons l'hypothèse, pour les composants existants, d'avoir une définition sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Dans le cadre de l'intégration d'un composant dans une architecture système, les modalités d'usage doivent être contextualisées avec celles du système. La durée de vie du composant peut être impactée et peut nécessiter des étapes de maintenance ou un remplacement. Cela offre également des pistes de réflexion quant au réemploi ou au reconditionnement de certains composants dont la durée de vie prévue est supérieure au système. Le scénario de fin de vie se retrouve également impacté et nécessite la définition de ce processus additionnel du point de vue ACV comme du point de vue modélisation système. La prise en compte de ces adaptations pour le modèle ACV et les données environnementales résultantes n'est possible

que si une certaine traçabilité est maintenue et que leur définition est la plus générique possible.

2.2. Évolution d'un système

L'évolution d'un système existant revient à reconsidérer une partie de ces éléments pour s'adapter à un besoin ou un contexte qui a changé. L'impact sur le modèle du système et l'ACV peuvent nécessiter les adaptations suivantes selon le type du changement :

- Évolution des fonctions du système : ajout ou modification d'un ou plusieurs composants. La démarche est alors la même que dans la sous-section 2.1. Ce type d'évolution est fréquent lors d'une mise à jour de fonctionnalité (ex : mise en conformité avec une nouvelle réglementation).
- Modification de la durée ou de la fréquence d'usage : l'ensemble des éléments doivent être mis en cohérence avec cette nouvelle temporalité. Comme dans la sous-section 2.1 les étapes de maintenances et de fin de vie peuvent être impactées.
- Modifications locales à une étape du cycle de vie (fabrication ou fin de vie). Dans ce cas, la traçabilité sur les données environnementales des composants impliqués permet de délimiter les répercussions à opérer sur cette même étape. Par exemple, si un système préalablement mis en déchetterie suit maintenant une filière de recyclage, il faut répercuter ces nouveaux processus de fin de vie pour les composants. La difficulté à ce niveau est d'avoir connaissance des processus de fin possible pour les composants dans un tel scénario de fin de vie. En effet, cela nécessite une modélisation générique des composants pour qu'ils soient réutilisables dans une variété de contextes différents.

2.3. Nouveau système proche

La définition d'un nouveau système proche est souvent le scénario utilisé pour la définition initiale d'un système. Par exemple, la définition d'un nouveau véhicule automobile n'est pas fait ex-nihilo et elle s'appuie sur le savoir-faire et les expériences passées de l'équipe de développement qui réutilise et adapte une partie des modèles des véhicules précédemment développés. Ainsi, ce scénario alterne l'évolution d'un système existant avec la réutilisation de composants pré-définis.

3. PRINCIPES DE L'EXTENSION ECOPLEX

L'extension Ecoplex vise à permettre à l'architecte système de pouvoir faire au plus tôt des évaluations environnementales du système en cours de définition. Ainsi, la modélisation d'impacts environnementaux a été

intégrée au métamodèle de Capella par Obeo² pour permettre une interaction avec les logiciels ACV via le format standard ILCD (*International Life Cycle Data*). La Figure 1 montre l'organisation globale des flux d'information implémentés.

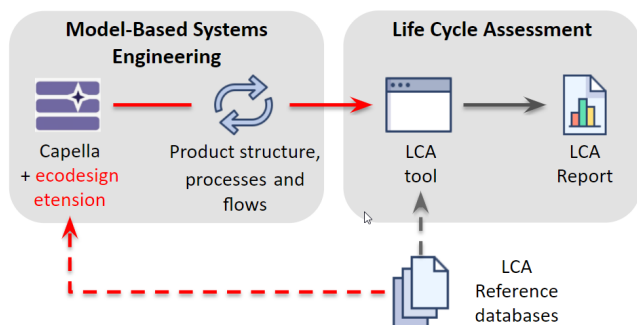


Figure 1 : Organisation de l'extension MBSE Ecoplex pour Capella

A l'aide de l'extension Ecoplex, la définition du système et de ses impacts environnementaux suit la méthode Arcadia, basée sur la définition du système selon les points de vue : besoins opérationnels, besoins systèmes, architecture logique et architecture physique.

3.1. Modélisation des cycles de vie

Les impacts environnementaux sont contextualisés dans des étapes du cycle de vie du système ou de ses composants. Ainsi, chaque élément du système comporte des descriptions de phase de cycle de vie qui sont elles-mêmes détaillées par des paramètres environnementaux. Ils peuvent être définis par des valeurs ou des formules. Le cycle de vie d'un système est structuré de manière générique en suivant l'ISO1404x. Il est défini formellement comme un diagramme d'état qui structure l'évolution du système et des sous-systèmes sur l'ensemble de leur cycle de vie, comme le montre la Figure 2. Cette figure illustre le cycle de vie créé par défaut lors de l'initialisation des données environnementales dans l'extension Ecoplex. Ce diagramme d'état est similaire à celui présent dans le langage UML et les états peuvent être décomposés pour décrire la dynamique d'évolution des états ou modes du système et de ses éléments.

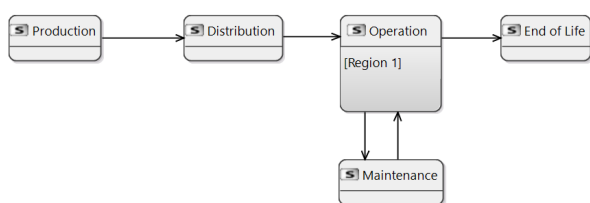


Figure 2 : Diagramme d'état générique de définition de cycle de vie

3.2. Modélisation et gestion des impacts environnementaux

Nous considérons que les impacts environnementaux sont directement associés à des étapes de cycle de vie. Tout élément de modèle peut se voir associer une étape du cycle de vie. Ainsi, les composants des nomenclatures logiques comme physiques peuvent se voir associer des impacts environnementaux de manière transitive en les définissant au niveau des étapes du cycle de vie de ces éléments. La Figure 3 présente un extrait du métamodèle de l'extension Ecoplex pour Capella.

Pour les phases de fabrication et de fin de vie, les paramètres environnementaux se basent sur des bilans massiques, comme pour les logiciels ACV. Du point de vue de la phase d'utilisation du système, l'enjeu principal est de définir la manière d'extraire et de regrouper les impacts environnementaux des éléments d'un système pour les exporter vers un logiciel d'ACV d'une manière générique. Ainsi, il faut définir au niveau global du système l'unité de groupement des impacts d'exploitation. Cette unité de groupement des impacts est à relier directement avec la définition de l'unité fonctionnelle qui quantifie la réalisation de la fonction principale du système. Par exemple, le nombre d'usages ou le temps d'usage peuvent quantifier génériquement la phase d'utilisation du système plutôt qu'une masse de matière consommée. Cela permet d'exprimer de manière plus souple l'agrégation à effectuer au niveau du système.

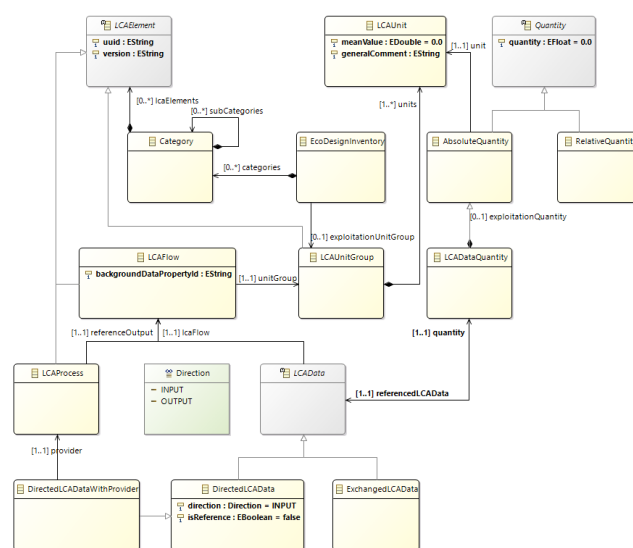


Figure 3 : Extrait du métamodèle de l'extension Ecoplex

3.3. Mécanismes de réutilisation de modèles

La plateforme Capella est basée sur les principes de l'ingénierie dirigée par les modèles (MDE : *Model Driven Engineering*) et propose un cadre de développement intégrant des mécanismes natifs de généricité et

² <https://www.obeosoft.com/fr/>

d'héritage dans la formalisation des modèles. Ainsi, il est possible de constituer des bibliothèques de composants qu'on peut importer lors de la définition d'un nouveau système.

La plateforme Capella facilite également la réutilisation de certaines parties de modèles en s'appuyant sur l'extension Kitalpha basée sur la définition de point de vues [10]. Cette extension intègre un mécanisme générique de copie de parties de modèles qui peuvent être ensuite répliquées dans d'autres contextes. Cela permet de définir des « macros » de réplification de modèles pour, par exemple, structurer la réutilisation des composants lors de leur intégration dans un système. La difficulté dans notre cas applicatif est d'identifier le périmètre des modifications à opérer pour intégrer de nouveaux composants. Nous nous sommes alors basés sur les mécanismes de réutilisation de la section 2, pour déterminer les types de lien à établir.

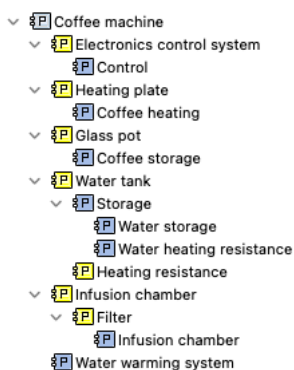


Figure 4 : Nomenclature simplifiée d'une machine à café modélisée dans Capella

4. CAS APPLICATIF

Pour illustrer simplement ce travail, nous avons pris l'exemple de la reconception d'une machine à café. Nous cherchons à évaluer plusieurs scénarios d'évolution et de réutilisation de modèles. Nous disposons d'un modèle existant de cafetière électrique traditionnelle, qui chauffe de l'eau pour qu'elle se condense dans un filtre contenant du café moulu pour finalement stocker le café obtenu dans un bol en verre. La nomenclature simplifiée est présentée en Figure 4, en se basant sur la structure du système défini dans Capella. Nous nous sommes basés sur les données environnementales présentées sur le site Ecolizer³. Le cycle de vie global est présenté sur la figure 5.

Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre une évolution du système, qui vise à changer le principe de solution associé à la fonction de maintien du café au chaud. Cela nécessite de remplacer le bol en verre par un thermos et de supprimer la plaque chauffante. Ces

modifications ont pu être mise en œuvre simplement, car les scénarios des étapes du cycle de vie, notamment la phase d'usage, n'ont pas été modifiés au niveau global.

Name	Quantity	Unit	Exploitation Qua	Exploitation	State	Norm. Abs. Exp.
☞ Coffee machine			1200.0	d		1200.0
☞ Production						
→ Acrylonitrile-Butadiene-St...	1.0	kg			Production (Coffee mach...	
→ Corrugated board boxes, p...	0.3	kg			Production (Coffee mach...	
→ Polystyrene expandable gr...	0.01	kg			Production (Coffee mach...	
☞ Distribution						
→ Container ship ocean, tech...	8000.0	kg SWU			Distribution (Coffee mac...	
→ Small lorry transport, Euro...	50.0	kg SWU			Distribution (Coffee mac...	
☞ Operation			90.0 %			1080.0
☞ Make coffee						1080.0
→ Electricity Mix, consum...	365.0	kWh			Make coffee (Coffee mac...	1080.0
☞ Clean filter						1080.0

Figure 5 : Définition du cycle de vie au niveau global système

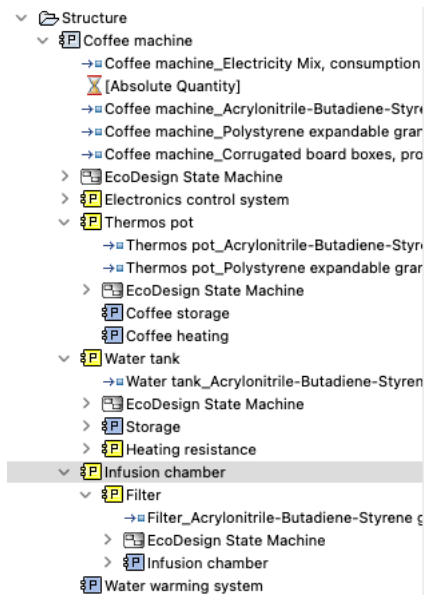


Figure 6 : Nouvelle architecture intégrant les impacts environnementaux

Nous avons voulu étudier la réutilisation de ce modèle dans le cadre d'une seconde évolution : définir une machine à café dont le filtre est réutilisable et non-plus jetable. D'un point de vue de l'architecture physique du système, Il faut donc remplacer le composant filtre existant par un filtre permanent lavable et réutilisable. Du point de vue de l'ACV, il faut remplacer le cycle de vie additionnelle sur les filtres consommés par des impacts environnementaux du filtre réutilisable, en les intégrant à chaque étape du cycle de vie. Dans ce cas particulier, cela nécessite de bien prendre en compte la modification de la formule pour calculer l'agrégation des impacts liés au filtre, qui sont maintenant calculés pour une durée d'usage plutôt qu'en nombre de filtres consommés. On passe ainsi d'un consommable à un élément interne du système. Cette modification plus complexe, n'a pu être généralisée en opération automatique, mais elle a pu être réalisée à la main. La figure 6 montre la nouvelle

³ <https://www.ecolizer.be/design/9506/fiche> (Accès au 12/12/2022)

nomenclature intégrant les impacts environnementaux à chaque niveau système.

Une fois ces modifications effectuées, l'export de l'ensemble des données environnementales peut être effectué au format ILCD, ce qui génère une archive au format zip qu'il faut importer, par exemple dans OpenLCA pour mener une évaluation des impacts sur l'ensemble du cycle de vie qui a été généré depuis la description faite dans Capella. La figure 7 montre le résultat obtenu dans OpenLCA pour ce scénario de cycle de vie pour la machine à café.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté plusieurs mécanismes de réutilisation de modèles pour des données environnementales dans un environnement d'ingénierie système. Une partie de ces mécanismes sont intégrés à l'extension Ecoplex qui permet de développer de nouveau système en suivant la méthode Arcadia intégrée à l'environnement Capella. Ecoplex permet de lier au plus tôt les éléments de description d'un système avec des étapes de cycle de vie auxquels il est possible d'attacher des paramètres environnementaux. Ces derniers sont alors exportables vers des logiciels d'ACV.

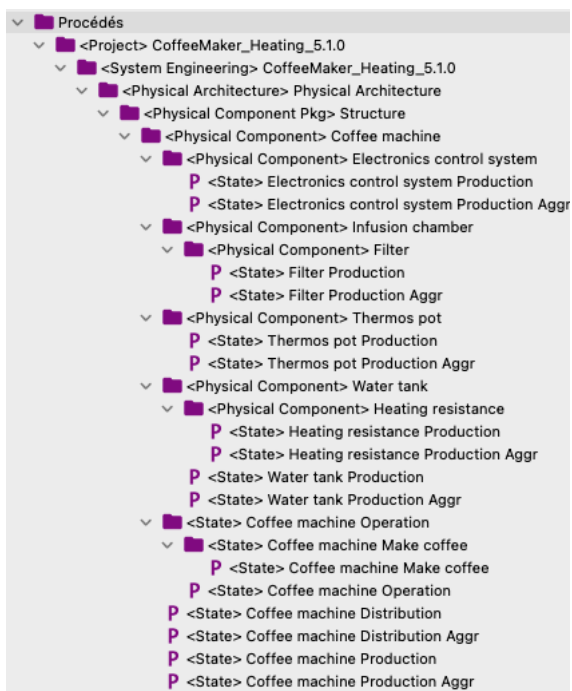


Figure 7 : Nomenclature de procédés dans OpenLCA générés à partir de Capella et Ecoplex

Plusieurs applications industrielles ont permis d'éprouver l'outilage développé et un exemple simplifié basé sur la conception d'une cafetière ont permis d'illustrer plusieurs scénarios de réutilisation de modèles.

Ce travail est une première tentative pour formaliser et généraliser les mécanismes de réutilisation pour des données environnementales dans un cadre d'ingénierie système. Plusieurs limites ont été rencontrées pour appliquer automatiquement des règles de réutilisation dans de nouveaux systèmes. C'est particulièrement le cas,

lorsque l'unité fonctionnelle évolue et que cela touche à la manière d'agréger les impacts environnementaux au niveau global.

Une autre piste reste encore à explorer sur la manière de définir des composants plus génériques quant à la définition des différentes alternatives connues pour chacune des étapes du cycle de vie. Actuellement, la philosophie des plateformes d'ingénierie système est de modéliser un système, pas un ensemble d'alternatives. La seule possibilité est d'utiliser le mécanisme d'héritage et de composants abstraits pour structurer des sortes de méta-composants.

REMERCIEMENTS

Ce travail s'est déroulé dans le projet Ecoplex financé par la région Pays de La Loire, la région Bretagne et BPIFrance. Ce projet a impliqué les partenaires suivants : CapGemini Engineering, Efinor Sea Cleaner, Manta Innovation, LS2N, Obeo et Stirling Design International.

REFERENCES

- [1] Di Noi, C., Ciroth, A., & Srocka, M. (2017). OpenLCA 1.7. *Comprehensive User Manual*, GreenDelta GmbH, Berlin, Germany.
- [2] Hunkeler, D., Vanakari, E. EcoDesign and LCA survey of current uses of environmental attributes in product and process development. *Int. J. LCA* 5, 145-151 (2000).
- [3] F. Francis, Environmentally conscious quality function deployment - A new approach for green manufacturing. *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications*, Beirut, Lebanon, 2009, pp. 340-343.
- [4] Rio, M., Reyes, T. and Roucoules. L. (2010). A framework for eco-design: An interface between LCA and design process. *International Journal of Engineering*. 9.
- [5] McAloone, T.C., Pigosso, D.C.A. (2018). Ecodesign Implementation and LCA. In: Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S. (eds) *Life Cycle Assessment*. Springer, Cham.
- [6] International Organization for Standardization. ISO/IEC 15288: 2002, *Systems Engineering--System Life Cycle Processes*, 2002.
- [7] Fet, A.M. and Keitsch, M. Systems engineering as a holistic approach to life cycledesigns. *Ocean Engineering* 62(2):1-9, 2013.
- [8] Roques, P. MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool. In: *8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*. 2016.
- [9] Bézivin, J. and Gerbe, O. Towards a precise definition of the OMG/MDA framework. *Proceedings 16th Annual International Conference on Automated Software Engineering (ASE 2001)*, 2001, pp. 273-280, doi: 10.1109/ASE.2001.989813.
- [10] Langlois, B., Exertier, D., & Zendagui, B. (2014, October). Development of modelling frameworks and viewpoints with Kitalpha. In *Proceedings of the 14th Workshop on Domain-Specific Modeling* (pp. 19-22).