



HAL
open science

Gestion et réutilisation des données de simulation : vers une approche de vérification et validation des modèles

Anaïs Ottino, Julien Le Duigou, Thomas Vosgien, Nicolas Figay, Pascal Lardeur, Benoît Eynard

► To cite this version:

Anaïs Ottino, Julien Le Duigou, Thomas Vosgien, Nicolas Figay, Pascal Lardeur, et al.. Gestion et réutilisation des données de simulation : vers une approche de vérification et validation des modèles. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03444985

HAL Id: hal-03444985

<https://hal.science/hal-03444985>

Submitted on 23 Nov 2021

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.

Gestion et réutilisation des données de simulation : vers une approche de vérification et validation des modèles

**A. OTTINO^{a,b}, J. LE DUIGOU^a, T. VOSGIEN^b, N. FIGAY^c,
P. LARDEUR^a, B. EYNARD^a**

a. Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, UMR 7337 Roberval,
CS 60 319 – 60203 Compiègne Cedex – France

anais.ottino@utc.fr julien.le-duigou@utc.fr pascal.lardeur@utc.fr benoit.eynard@utc.fr

b. Université Paris-Saclay, Institut de Recherche Technologique SystemX, 8 avenue de la
Vauve – BP 30012 – 91120 Palaiseau – France

anais.ottino@irt-systemx.fr thomas.vosgien@irt-systemx.fr

c. Airbus Group Innovations, 12 rue Pasteur – 92150 Suresnes – France

nicolas.figay@airbus.com

Résumé

Dans l'industrie, le temps alloué au processus de simulation est souvent concentré sur la phase de prétraitement. Afin de diminuer le temps consacré à cette phase, il est important de réutiliser autant que possible les modèles numériques. Dans un contexte d'entreprise étendue et de gestion du cycle de vie des produits (PLM), ces modèles proviennent de différents partenaires et sont créés à partir d'outils généralement hétérogènes. Dans un but de réutilisation, il est essentiel de capitaliser les données et informations de simulation dans un format neutre, structuré, commun et standardisé. Basé sur une combinaison de l'approche de la gestion du cycle de vie des simulations (SLM) et de la méthodologie Vérification & Validation (V&V), ce travail de recherche propose une démarche favorable à la réutilisation des modèles de simulation numérique.

Abstract

In industry, the time allocated to the simulation process is often focused on the pre-treatment phase. Therefore, in order to optimize the modeling and simulation activities, the created numerical models need to be reused. According to extended enterprise and Product Lifecycle Management (PLM) approaches, the numerical models come from various partners and are created from heterogeneous tools. To reuse these numerical models, it is necessary to capitalize the simulation data in accordance with a common standardized and structured format. Based on a Simulation Lifecycle Management (SLM) approach and a Verification & Validation methodology, this paper proposes a framework and a process to enable the reuse of simulation models.

Mots clefs : Simulation Numérique, Vérification & Validation, Standardisation des données, Réutilisation, Gestion de Données de Simulation

1 Introduction

Dans l'industrie, les projets évoluent à travers de grands partenariats. Une grande quantité de données est alors créée par les différents partenaires tout au long du cycle de vie du produit [1]. Dans un tel contexte collaboratif, les données techniques doivent être traitées et gérées de la manière la plus cohérente afin d'être utilisées par les différents partenaires au travers des différentes activités [2]. Le projet « Standard & Interopérabilité PLM »¹ dans lequel s'inscrit ce travail de recherche, vise à développer une plateforme d'expérimentation *as a Service* dans le but de valider l'utilisation et les implémentations des standards PLM (*Product Lifecycle Management*) à partir de scénarios industriels. Pour être compétitives, les industries doivent pouvoir livrer rapidement et de façon continue de nouveaux produits innovants sur le marché. Dû à l'augmentation de la complexité des produits, elles ont de plus en plus recours à la simulation numérique pour prédire leur comportement et aider à la prise de décision dans le processus de conception [3]. Pour rivaliser face au marché mondial, les entreprises se focalisent sur de nouvelles approches telles que la gestion du cycle de vie des simulations et la conception pour les variantes de produit [4] afin d'atteindre la qualité des produits et la robustesse des processus plus rapidement.

Ce contexte renforce la nécessité de faire évoluer les systèmes de gestion de données de simulation. La *National Agency for Finite Element Methods and Standards* (NAFEMS) définit la gestion du cycle de vie des simulations (ou *Simulation Lifecycle Management – SLM*) comme le « *management of the intellectual property associated with simulation tools, data, and processes as related to product or process development* ». Idéalement, un système SLM doit inclure quatre domaines fonctionnels pour être efficace : la collaboration, la gestion de données de simulation, l'aide à la prise de décision et l'intégration et l'automatisation des processus [5].

Le processus de modélisation et de simulation numérique est composé classiquement de trois grandes étapes : l'étape de prétraitement, l'étape de calcul et l'étape de post-traitement. Le temps alloué à ce processus est fortement tributaire de la phase de prétraitement, c'est-à-dire, de la création du modèle numérique. La perte d'information durant l'acquisition des données d'entrée du processus, les transformations géométriques nécessaires afin d'adapter le modèle CAO pour le calcul et les modèles de simulation déjà créés qui ne sont pas ré-exploités font partie des lacunes du processus de simulation dans un environnement collaboratif [6]. Dans certains secteurs de l'industrie, les équipes de simulation sont généralement isolées par domaine métier et communiquent peu ou de façon artisanale. Cependant, l'optimisation globale d'un produit doit résulter d'un compromis multidisciplinaire et multi-physique. Il y a donc une réelle nécessité d'échange multidisciplinaire au cours du processus de développement du produit pour gérer l'influence de chaque discipline impliquée.

Notre étude se positionne dans un contexte industriel où le développement d'un nouveau produit se fait au sein d'une entreprise étendue. Ce principe organisationnel permet à l'entreprise initiatrice de coopérer au travers d'alliances et de partenariats dans le but de réaliser des activités dont elle ne maîtrise pas l'ensemble des compétences et/ou ne possède pas les ressources nécessaires en interne. Dans ce contexte, il y a trois types de réutilisation des modèles de simulation possible : dans le même département de simulation, dans un autre département de simulation et dans une entreprise partenaire. Ces trois types de réutilisation impliquent un échange de données de simulation intra-domaine et/ou inter-domaine physique.

La réutilisation des modèles permettrait de rendre plus efficace le processus de simulation faisant communiquer différents départements de simulation généralement isolés. Elle faciliterait par exemple,

¹ <http://www.irt-systemx.fr/project/sip/>

dans le domaine de l'automobile, l'analyse rapide de l'impact de l'optimisation d'une voiture en crash sur son comportement aérodynamique. En se basant sur l'utilisation d'un gestionnaire de données de simulation efficace, la réutilisation des modèles permettrait également d'améliorer le processus de modélisation et de simulation. Dans le but d'accélérer le processus de développement des produits, l'industrie automobile, notamment, conçoit ses nouveaux produits par familles avec une hiérarchie d'assemblages et de pièces pouvant être communes. Par conséquent, les variantes des produits ont des modèles de simulation en commun qu'il serait intéressant de ré-exploiter autant que possible.

L'objectif de cet article est de proposer un processus métier s'appuyant sur plusieurs approches existantes pour mettre en place la réutilisation des modèles numériques dans un contexte collaboratif et multipartenaire. L'étude tend à montrer comment la combinaison d'une approche SLM et d'une méthodologie V&V assure un environnement favorable à la réutilisation des modèles de simulation.

2 Approche SLM, V&V et standards d'échange de données

Comme présenté dans l'introduction, l'approche SLM implique la mise en œuvre de quatre domaines fonctionnels : la collaboration, la gestion de données de simulation, l'aide à la prise de décision et l'intégration et l'automatisation des processus. Ce travail a comme objectif l'amélioration de la gestion de données de simulation pour la réutilisation des modèles numériques. Dans cet objectif, la méthodologie V&V permet d'apporter un ensemble d'informations sur les modèles. L'aspect collaboration est également important dans ce contexte. Pour répondre à la problématique de développement d'un produit dans un contexte collaboratif et multipartenaire, il est nécessaire de baser les échanges de données de simulation et le modèle d'information qui en découle sur des standards internationaux. L'utilisation de standards internationaux est essentielle pour établir un « langage » non-ambiguë entre partenaires afin d'assurer la cohérence de la définition du produit tout au long de son cycle de vie [7]. Ce paragraphe présente dans une première partie les travaux de recherche faisant le lien entre la gestion de données de simulation et la méthodologie V&V. La deuxième partie est consacrée à la description de la méthodologie V&V en exploitant l'état de l'art. Enfin, la troisième partie introduit les standards existants pour échanger les données et informations de simulation.

2.1 Approche SLM et méthodologie V&V

De nombreux travaux de recherche ont démontré l'intérêt pour les entreprises d'adopter une approche harmonisée dans la gestion des données de simulation et la collaboration pour le développement des produits [8-12]. L'approche SLM est identifiée par [5] comme une composante de l'approche PLM. En raison de la singularité des données, du processus et de son cycle de vie, la simulation numérique nécessite sa propre approche.

Un état de l'art montre un ensemble de travaux traitant de la méthodologie Vérification et Validation (V&V) dans le cadre du développement du produit, de la gestion de données et de la collaboration dans le but d'améliorer le temps des processus, et la fiabilité du produit. Le cycle de vie d'une simulation est défini comme un ensemble de phases itératives et réversibles associées à une activité de V&V [13]. D'après l'auteur, la V&V n'est pas une étape ou une phase dans le cycle de vie mais une activité continue à travers le cycle de vie complet de simulation. Une approche basée sur la méthodologie V&V appliquée à la maquette numérique dans un cadre d'ingénierie système pour le projet « *International Thermonuclear Experimental Reactor* » (ITER) a été proposé par [14]. Le projet ITER a pour objectif de démontrer la faisabilité et l'exploitabilité d'un réacteur à fusion nucléaire. Les auteurs formalisent le processus de conception dans un contexte PLM/SLM associé au processus de V&V dans le but d'améliorer les coûts et la fiabilité du système de gestion à distance du réacteur

ITER. Leur étude utilise l'approche V&V pour l'ingénierie des systèmes complexes et met en évidence l'importance du PLM dans cette approche. Un ensemble de méthodes et techniques liées à la V&V de la conception dans le cycle de vie du produit a été proposé [15]. Leur analyse porte sur les définitions normalisées des notions associées à la méthodologie V&V dans le contexte de la conception. Ils donnent une classification des activités et processus depuis la conception préliminaire à l'étape de V&V dans la phase de production des produits.

2.2 La méthodologie V&V

Dans la collaboration et la réutilisation de modèles numériques, il est également nécessaire d'échanger les données et informations de simulation. Dans le cadre de cette réutilisation, le modèle étant créé par un autre individu que l'utilisateur, il est nécessaire pour celui-ci d'avoir des informations permettant de déterminer si la ré-exploitation du modèle est pertinente au regard de son scénario de simulation. La méthodologie V&V associée au processus de modélisation et de simulation numérique permet d'obtenir un ensemble d'informations appelées données V&V sur le modèle. En physique numérique, le système est dominé par des équations aux dérivées partielles pour la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. La méthodologie V&V s'applique de préférence à des modèles numériques s'appuyant sur des méthodes qui permettent de résoudre ces équations, comme par exemple la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis ou encore, la méthode des volumes finis. Pour introduire la méthodologie V&V, il est important de définir le modèle numérique. Un modèle numérique est une description à la fois mathématique et numérique d'un scénario de simulation spécifique qui inclut les données géométriques, les caractéristiques relatives aux matériaux, les informations sur les conditions limites et initiales [16].

La *Society for Computer Simulation (SCS) Technical Committee on Model Credibility* a proposé à la fin des années 70 une vision simplifiée du processus V&V dans le but de mettre en évidence les interactions entre les différentes phases d'évaluation [17]. La figure 1 présente une adaptation de ce processus proposé par Thacker et al. [16] et Oberkamp et al. [18] pour la V&V de modèles numériques.

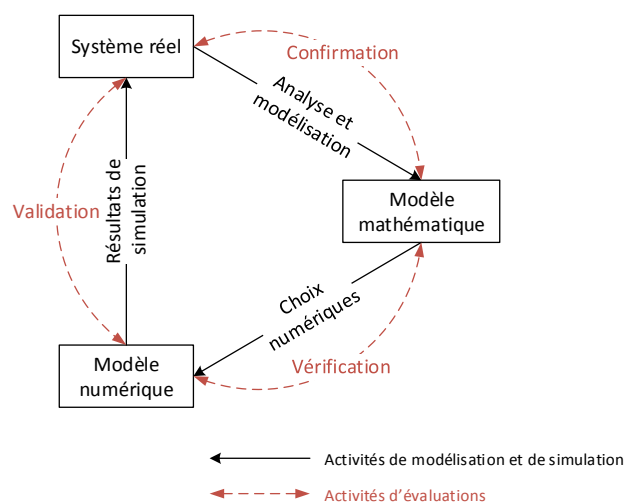


Figure 1. Vision simplifiée des phases du processus de Vérification et Validation des modèles adapté de Schlesinger [17] par Thacker et al. [16] et Oberkamp et al. [18]

Le système réel est le système physique à propos duquel une demande de simulation est faite sur un problème spécifique à résoudre. Le système réel est analysé et modélisé pour créer le modèle mathématique. Le modèle mathématique comprend les hypothèses physiques, les équations mathématiques, les données de modélisation physique (conditions limites, chargement, loi de comportement des matériaux). Le modèle numérique est l'implémentation du modèle mathématique associée à une approximation numérique et un critère de convergence [19].

Les deux grandes étapes d'évaluation qui interviennent dans le processus consistent à s'assurer de « résoudre les équations correctement » (phase de vérification) et de « résoudre les bonnes équations » (phase de validation) [20]. L'objectif de l'étape de vérification est de comparer une solution précise de référence du modèle mathématique avec la solution numérique obtenue grâce au modèle numérique. Le processus de vérification est concluant lorsque les solutions numériques et de référence convergent de façon satisfaisante. L'objectif de l'étape de validation est de comparer la solution du modèle numérique identifié au cours de la phase de vérification avec le système réel. Le processus de validation est concluant lorsque les différences entre les résultats expérimentaux sur le système réel et les résultats numériques sont considérées comme acceptables [19].

2.3 Les standards pour l'échange de données et d'informations en simulation numérique

Les standards sont utilisés pour préserver les informations et les données collectées au cours du développement du produit dans un environnement collaboratif. L'évaluation de l'interopérabilité des applications métier, couplée à une capacité de vérification-conforme au standard adéquat, devient un défi pour les industries manufacturières. Dans le domaine de la simulation numérique, il existe plusieurs standards pour l'échange de données, chacun spécialisé pour un besoin métier spécifique. Le standard *CFD General Notation System* (CGNS) couvre les données de mécanique des fluides [21]. L'objectif de CGNS est de faciliter l'échange de données entre applications et pérenniser l'archivage des données aérodynamiques. La norme *STEP-Thermal Analysis for Space* (STEP-TAS) [22] permet l'échange, le traitement et l'archivage à long terme des modèles et des résultats d'analyse thermique pour l'espace. Le standard ISO10303 STEP-AP209 édition 2 couvre la conception et l'analyse multidisciplinaire [23]. Il traite à la fois les aspects géométriques ainsi que l'analyse par éléments finis et la dynamique des fluides. L'ISO10303 STEP-AP209 est un protocole d'application de la famille ISO10303 STEP [24]. La norme ISO10303 STEP est un ensemble de protocoles d'application qui couvrent la représentation et l'échange de données du produit nécessaires à sa description tout le long de son cycle de vie.

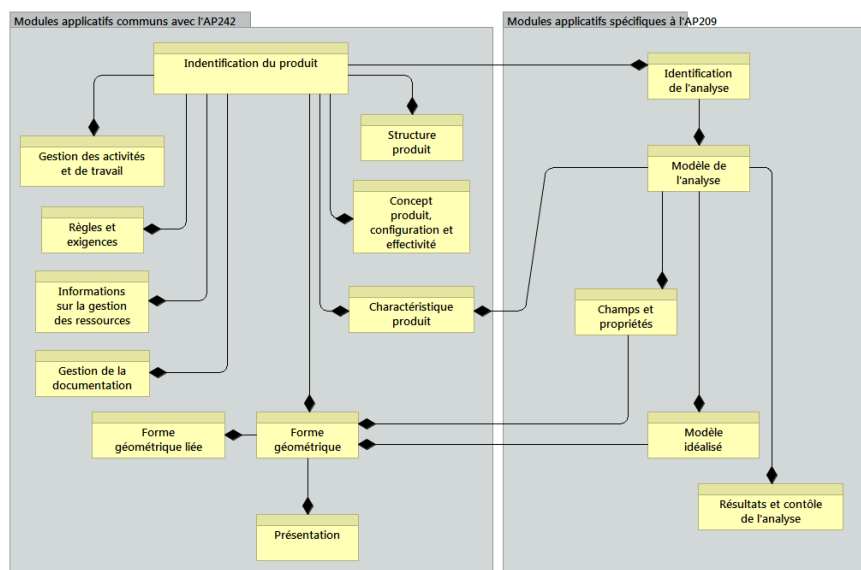


Figure 2. Modélisation de la couverture fonctionnelle de la norme ISO10303 STEP-AP209 édition 2 adaptée de [25]

La figure 2 illustre la couverture fonctionnelle de la norme ISO10303 STEP-AP209. La partie gauche identifie les modules d'application en commun avec le protocole d'application ISO10303 STEP-AP242 [26] qui s'intéresse à la gestion des modèles 3D d'ingénierie. La partie droite identifie les modules d'application spécifiques au protocole d'application 209. L'utilisation de la norme ISO10303 STEP-AP209 s'insère dans l'approche SLM mais n'est actuellement pas suffisante pour représenter et échanger les données V&V. Il existe des guides de bonnes pratiques pour mettre en place un processus V&V : l'ARP 755A [27] dans le domaine de l'aéronautique et l'ASME V V 10 [28] dans le domaine de la mécanique des solides. Des standards ont également été développés dans différents domaines. Le standard 1012 développé par IEEE SA couvre les processus V&V dans le domaine de l'ingénierie logicielle dans le but de développer, maintenir et réutiliser des systèmes, software, et hardware [29]. Le standard V V 20 développé par l'ASME couvre le domaine de la mécanique des fluides. Il quantifie le degré de précision d'un modèle en comparant la solution numérique et les données expérimentales pour une variable à un point de validation donné [30]. Le standard ISO10303 STEP-AP233 pour l'ingénierie système inclut également un ensemble de modules dédiés à la gestion des besoins et exigences et à leur vérification et validation [31].

Compte tenu des éléments d'états de l'art et des standards existants, la figure 3 montre les données et informations de simulation qui doivent être gérées tout au long du cycle de vie des simulations.

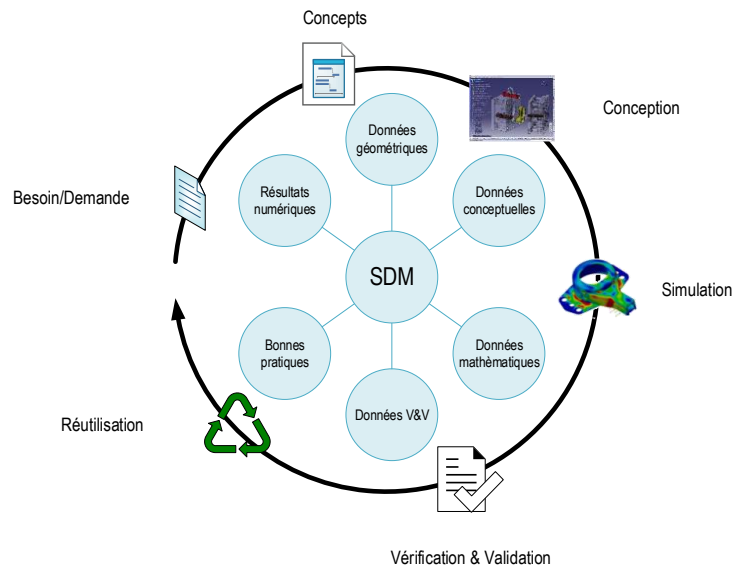


Figure 3. Cycle de vie des simulations et gestion de données et informations associées au modèle

3 Processus de réutilisation de modèle

La réutilisation d'un modèle de simulation est la sélection, l'adaptation et l'utilisation d'un modèle numérique pour un nouvel objectif. Au cours du processus de modélisation et de simulation, un ensemble d'activités est réalisé séquentiellement générant des modèles intermédiaires depuis le modèle extrait de la maquette numérique au modèle éléments finis, qui va être exploité par le logiciel de calcul pour produire les résultats attendus.

La figure 4 est une description du processus de simulation qui prend en compte la réutilisation possible des modèles. Les boîtes représentent les fonctions métiers et dans certains cas les objets métiers associés. Les flèches représentent les flux de données. Les boîtes colorées en rouge correspondent à des fonctions métiers liées à une activité d'évaluation. Le langage utilisé dans la figure 4 est un langage de modélisation d'architecture d'entreprise appelé ArchiMate [32].

En se basant sur l'existence d'un gestionnaire de données de simulation, l'analyse des besoins de simulation permet de définir des objectifs de simulation et les besoins de validation. L'étape de spécification, suite à l'analyse, sert à définir les hypothèses physiques, les équations mathématiques et les données physiques de modélisation. Cette première phase de définition et de spécification du problème de simulation permet d'établir un cahier des charges. Une activité de recherche de modèle existant permet de tester le SDM sur la possibilité de réutilisation d'un modèle déjà créé. Cette étape du processus est l'une des plus complexes à mettre en œuvre, car elle nécessite un SDM gérant et structurant des données et informations de simulations numériques.

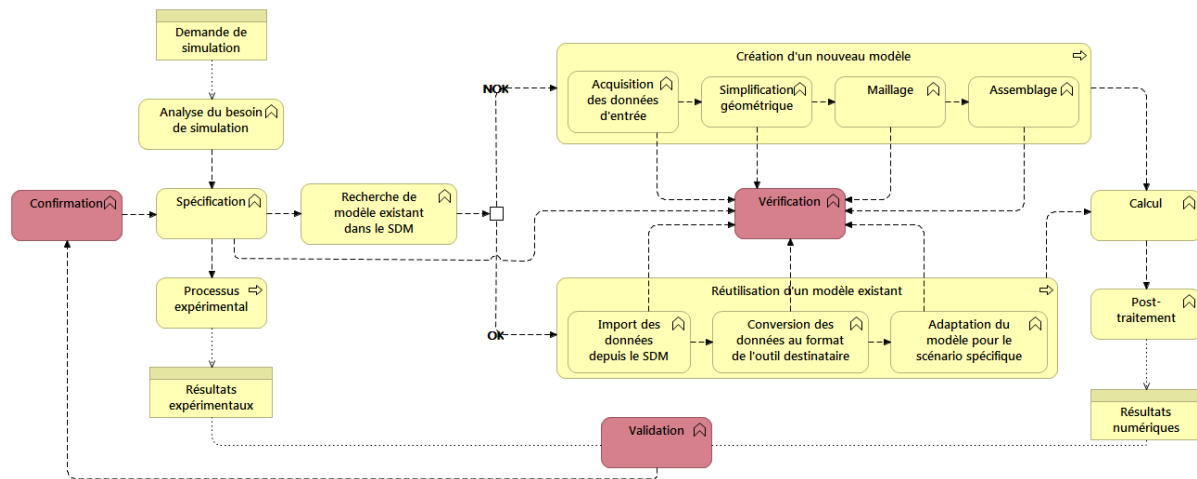


Figure 4. Processus de simulation intégrant la réutilisation des modèles

Suivant l'effectivité de la requête au travers du SDM, le processus se scinde en deux branches. La première branche correspond au processus de simulation classique où aucun modèle préalablement généré n'est pertinent, ce qui mène à la création d'un nouveau modèle. La seconde branche correspond au cas où un modèle identifié comme proche de la spécification est trouvé dans le SDM. Il faut alors l'exporter du gestionnaire de données de simulation, convertir au besoin le format des données et adapter le modèle au problème à résoudre. Chaque activité dans les deux branches du processus génère un modèle intermédiaire qui est soumis à une étape de vérification. L'activité de vérification est dépendante de l'activité métier. Les données de vérification permettent d'enrichir les informations des modèles et de rendre le processus de réutilisation plus efficace. Afin d'alimenter le SDM, chaque création de modèle intermédiaire tout au long du processus de la figure 4 doit être stockée et gérée en configuration. La validation du modèle s'obtient en comparant les résultats expérimentaux et les résultats numériques. A partir de cette comparaison, il est possible de confirmer les spécifications qui ont été faites au début du processus.

4 Conclusion

L'amélioration des systèmes de gestion de données de simulation pour intégrer la réutilisation des modèles en se basant sur les standards internationaux est un défi industriel qui permettra d'optimiser les processus de développement de produit. Cet article propose une démarche favorable à la réutilisation basée sur la combinaison d'une approche SLM et d'une méthodologie V&V en s'appuyant sur les normes et standards existants. Dans ce cadre, un processus de réutilisation des modèles a été proposé.

Dans de futurs travaux, cette démarche devra être approfondie. De plus il conviendra de mettre en pratique ce processus sur des pratiques industrielles et de tester la capacité des normes et standards identifiés pour les besoins de réutilisation.

Remerciements

Ce travail a été effectué sous la direction de l'Institut de Recherche Technologique SystemX et a ainsi bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'Avenir.

Références

- [1] C. Danjou, J. Le Duigou, B. Eynard, “Interopérabilité des systèmes PLM : un état de l’art sur la chaîne numérique conception/industrialisation”, dans JD/JN MACS, 2013.
- [2] T. Van Nguyen, F. Ferru, P. Guellec, B. Yannou, “Engineering data management for extended enterprise - Context of the european VIVACE project”, dans PLM-SP2, pp. 338–348, 2006.
- [3] CIMdata, “Simulation Lifecycle Management - More than data management for simulation”, Michigan, 2011.
- [4] H. a ElMaraghy, “Changing and evolving products and systems – Models and enablers”, dans Changeable and reconfigurable manufacturing systems, Ed. Springer London, pp. 25–45, 2009.
- [5] P. Lalor, “Simulation Lifecycle Management - Opens a new window on the future of product design and manufacturing”, Scotland, UK, 2007.
- [6] G. M. Mocko, S. J. Fenves, National Institute of Standards and Technology (U.S.), A survey of design – Analysis integration issues. Gaithersburg, Maryland: U.S. Dept. of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2003.
- [7] N. Figay, P. Ghodous, M. Khalfallah, M. Barhamgi, “Interoperability framework for dynamic manufacturing networks”, *Comput. Ind.*, vol. 63, no. 8, pp. 749–755, 2012.
- [8] S. Charles, “Gestion intégrée des données CAO et EF - Contribution à la liaison entre conception mécanique et calcul de structures”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, France, 2005.
- [9] T. Nguyen Van, “Ingénierie système appliquée à la gestion des données techniques en entreprise étendue : Application aux boucles de conception/simulation”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2006.
- [10] M. S. Shephard, M. W. Beall, R. M. O. Bara, B. E. Webster, “Toward simulation-based design”, *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 40, no. 12, pp. 1575–1598, 2004.
- [11] F. Delalondre, C. Smith, M. S. Shephard, “Collaborative software infrastructure for adaptive multiple model simulation”, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 199, no. 21–22, pp. 1352–1370, 2010.
- [12] I. Assouroko, P. Boutinaud, N. Troussier, B. Eynard, G. Ducellier, “Survey on standards for product data exchange and sharing: application in CAD/CAE interoperability”, *Int. J. Des. Innov. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 9–15, 2010.
- [13] O. Balci, “Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study”, dans *Simulation conference proceedings*, vol. 53, pp. 215 – 220, 1994.
- [14] R. Sibois, T. Määttä, M. Siuko, J. Mattila, “Early design verification of ITER remote handling systems using digital mock-ups within simulation lifecycle environment”, dans *25th symposium on fusion engineering (SOFE)*, 2013.
- [15] P. G. Maropoulos, D. Ceglarek, “Design verification and validation in product lifecycle”, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 2, pp. 740–759, 2010.
- [16] B. H. Thacker, S. W. Doebling, F. M. Hemez, M. C. Anderson, J. E. Pepin, E. A. Rodriguez, “Concepts of model verification and validation”, Los Alamos, 2004.
- [17] S. Schlesinger, “Terminology for model credibility”, *Simulation*, vol. 32, no. 3, pp. 103–104, 1979.
- [18] W. L. Oberkampf, T. G. Trucano, C. Hirsch, “Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics”, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 57, no. 5, pp. 345–384, 2004.
- [19] R. Scigliano, M. Scionti, P. Lardeur, “Verification, validation and variability for the vibration study of a car windscreen modeled by finite elements”, *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 47, no. 1, pp. 17–29, 2011.

- [20] P. J. Roache, *Verification and validation in computational science and engineering*. Hermosa, 1998.
- [21] AIAA, “R-101A - AIAA recommended practice for the CFD General Notation System - Standard interface data structures”, 2005.
- [22] A. Calvaire, H. P. de Koning, P. Huau, “STEP-TAS-177-AP - Application protocol: thermal analysis for space”, 1998.
- [23] ISO, “ISO 10303-209 - Application protocol: multidisciplinary analysis and design”, 2014.
- [24] M. J. Pratt, “Introduction to ISO 10303 - the STEP standard for product data exchange”, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 102–103, 2001.
- [25] K. A. Hunten, “Design and manufacture of composite material products”, dans *Interoperability for digital engineering systems*, FrancoAnge, pp. 61–66, 2014.
- [26] ISO, “ISO 10303-242 - Application protocol: managed model-based 3D engineering”, 2014.
- [27] SAE International, “Aerospace Recommended Practice (ARP) 4754A”, 2010.
- [28] ASME, “V V 10 - Guide for verification and validation in computational solid mechanics”, 2006.
- [29] IEEE SA, “1012 - IEEE standard for system and software verification and validation”, 2012.
- [30] ASME, “V V 20 - Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer”, 2009.
- [31] ISO, “ISO 10303-233 - Part 233: Application protocol: systems engineering”, 2012.
- [32] The Open Group, *ArchiMate 2.0 specification*. Van Haren Publishing, 2012.