



HAL
open science

Un environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif pour les revues de conception basées sur les modèles

Victor Romero

► **To cite this version:**

Victor Romero. Un environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif pour les revues de conception basées sur les modèles. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALI098 . tel-04048678

HAL Id: tel-04048678

<https://theses.hal.science/tel-04048678>

Submitted on 28 Mar 2023

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production

Spécialité : GI : Génie Industriel : conception et production

Unité de recherche : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble

Un environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif pour les revues de conception basées sur les modèles

An immersive, interactive and collaborative virtual environment for model-based design reviews

Présentée par :

Victor ROMERO

Direction de thèse :

Frédéric NOEL
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

Romain PINQUIE
Grenoble INP Laboratoire G-SCOP

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Olivia PENAS
INGENIEUR DE RECHERCHE, Supméca

Georges DUMONT
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENS de Rennes

Thèse soutenue publiquement le **15 décembre 2022**, devant le jury composé de :

Frédéric NOEL
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP

Directeur de thèse

Olivia PENAS
INGENIEUR DE RECHERCHE, Supméca

Rapporteuse

Georges DUMONT
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENS de Rennes

Rapporteur

Pierre DAVID
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP

Examineur

Frédéric MERIENNE
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM

Président

Invités :

Hugo Falgarone
INGENIEUR, SkyReal

Romain PINQUIE
Maître de conférences, Grenoble INP



REMERCIEMENTS

Si je présente dans ce manuscrit les résultats de mes trois dernières années de recherche, il est nécessaire de tout de suite préciser que c'est le fruit d'un travail collectif, et que de très nombreuses personnes sont impliquées de plus ou moins près.

Tout d'abord, je tiens à remercier le jury de cette thèse, à commencer par Olivia Penas et Georges Dumont, les rapporteurs, pour leurs retours nombreux et constructifs qui ont permis d'améliorer la qualité du manuscrit et d'aiguiller la présentation des travaux lors de la soutenance. Merci également à Frédéric Mérienne, qui a présidé la soutenance, mais qui m'a aussi accompagné à plusieurs reprises ces trois dernières années lors des différents CSI qui ont jalonné la thèse. Ces moments de discussions m'ont beaucoup aidé à synthétiser ce qui avait été fait, et à mettre en évidence ce qui restait à faire. Pour des raisons similaires, merci Pierre, non seulement d'avoir fait partie de mon CSI, mais également pour tous les « à côté », que ce soit pour les cours d'ingénierie système, pour les discussions autour d'un café, et le soutien moral sur la fin ! Enfin, merci à Hugo Falgarone de s'être déplacé pour assister à la soutenance, en espérant sincèrement que les travaux pourront donner des idées de développement industriel par la suite.

Ensuite, je voudrais remercier mon encadrement, merci Frédéric, merci Romain. D'abord parce que en termes de direction de recherche, vous avez su trouver les moyens de nous orienter vers les résultats les plus aboutis que nous pouvions espérer je pense, avec du recul. Ensuite, parce que personnellement, vous avez cru en moi à un moment vraiment difficile, et que vous vous êtes battus pour que je puisse démarrer cette thèse, et pour cela je ne vous remercierais jamais assez.

Je dois ensuite un remerciement plus global au laboratoire G-SCOP. D'abord à l'équipe CC, je pense en particulier à Patrick, qui m'a beaucoup aidé techniquement, mais aussi à Camilo, Noha, Bruno, Andreas, pour toutes les discussions qu'on a pu avoir. Malgré les moments perdus à discuter de choses sans rapports avec nos travaux, merci quand même à David et Léandre, avec qui ça a été un plaisir de partager mon bureau.

D'une manière plus générale, et surtout plus personnelle, merci à tous les collègues du labo d'être là, tous les jours, de faire des blagues, de rigoler, parfois même de boire des bières... J'ai passé trois années incroyables, et c'est en très grande partie grâce à l'ambiance du laboratoire ! J'ai très peur d'en oublier et ça va être un peu décousu, mais merci Maud, Bartier, Lucie, Gricha, Cléopée, Hugo, Barzo, Cédric, Astor, Florian, pour tous ces bons moments, que ce soit à la cafet, au bar, au bloc... Un très grand merci particulièrement à Pascal, et Siao-Leu, pour leur immense soutien ces derniers mois. Bien-sûr, merci Margaux, pour nos « mercredis du GI », pour nos repas, pour nos soirées de couvre-feu... Pour tout. Merci aussi Nico, pour tout ce que tu m'as fait découvrir. Enfin merci Cléa, je n'ai pas assez de mots.

Même si c'est de plus loin, je tiens à remercier des copains qui sont là depuis bientôt 10 ans maintenant, et sur qui je sais que je peux toujours compter. Merci Manon, Lucas, Cook, Boubou, Gabriel, Fanny, Pauline. Merci Claire, merci Victor, vous êtes toujours là, au soutien, merci.

Enfin, je veux remercier mon soutien numéro un, ma famille. Merci Agathe, Nils et Zoé, parce que vous êtes supers, merci Papa, merci Maman, d'être toujours là, quoi qu'il arrive, merci.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|-------------|--|----|
| CHAPITRE 1. | Des revues de conception Basées sur des Modèles..... | 7 |
| 1.1 | Une Conception basée sur des modèles | 7 |
| 1.1.1 | D'une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles.... | 8 |
| 1.1.2 | De nouvelles méthodes de conception centrées sur les modèles..... | 8 |
| 1.1.3 | De nouveaux enjeux..... | 11 |
| 1.2 | De nouveaux enjeux en revues de conception | 13 |
| 1.3 | Structure du manuscrit..... | 14 |
| CHAPITRE 2. | Des revues de conceptions basées sur les modèles..... | 15 |
| 2.1 | Un Processus ponctué par des Revues de Conception | 15 |
| 2.1.1 | Les objectifs et les activités d'une revue de conception..... | 16 |
| 2.1.2 | Des limites importantes | 17 |
| 2.2 | Les revues MBSE dans la pratique..... | 18 |
| 2.2.1 | Méthodologie | 19 |
| 2.2.2 | Résultats | 20 |
| 2.3 | De nouvelles revues de conception | 28 |
| 2.3.1 | Les sciences des données au service de l'ingénierie système basée sur les modèles .. | 28 |
| 2.3.2 | Les logiciels de simulation au service de la vérification | 30 |
| 2.3.3 | L'utilisation d'outils immersifs | 31 |
| 2.3.4 | Les technologies pour des revues immersives | 33 |
| 2.3.5 | Des limites encore importantes | 35 |
| 2.4 | Synthèse de la revue de littérature | 35 |
| 2.4.1 | Questions et Hypothèses de recherche | 36 |
| 2.4.2 | Positionnement de notre recherche dans la littérature | 37 |
| 2.5 | Validation de nos travaux..... | 37 |
| CHAPITRE 3. | Spécification d'un environnement virtuel immersif interactif et collaboratif pour les revues de conception basées sur des modèles..... | 40 |
| 3.1 | Les tâches élémentaires d'une revue de conception..... | 40 |
| 3.1.1 | Comprendre le système conçu et maîtriser la cohérence des modèles | 41 |
| 3.1.2 | Réaliser des tâches de vérification au plus tôt..... | 45 |
| 3.2 | Des besoins et de possibles solutions | 49 |
| CHAPITRE 4. | Un environnement virtuel immersif interactif et collaboratif pour les revues MBSE | 51 |
| 4.1 | Les revues de conception immersives dans la littérature | 52 |
| 4.1.1 | Des réunions immersives | 52 |
| 4.1.2 | Revue immersives d'architectures logicielles | 53 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 4.1.3 | Des revues de modèles 3D | 55 |
| 4.2 | Compréhension et Maitrise de la cohérence en revue MBSE..... | 57 |
| 4.2.1 | Architecture de l'environnement..... | 57 |
| 4.2.2 | Scénario d'utilisation de l'environnement | 58 |
| 4.2.3 | Conclusions..... | 60 |
| 4.3 | Proposition d'un cas d'étude sur lequel utiliser notre environnement..... | 60 |
| 4.3.1 | Revue de conception d'un télescope..... | 60 |
| 4.3.2 | Modèle d'architecture..... | 61 |
| 4.3.3 | Modèle CAO..... | 64 |
| 4.3.4 | Modèle de comportement | 64 |
| 4.3.5 | Des modèles interdépendants | 65 |
| 4.4 | Un démonstrateur fonctionnel pour les revues de conception immersives et interactives | 66 |
| 4.4.1 | La base de données | 66 |
| 4.4.2 | Les métaphores visuelles..... | 68 |
| 4.4.3 | Les interactions..... | 70 |
| 4.4.4 | La structure..... | 73 |
| 4.4.5 | Les limites du démonstrateur fonctionnel | 75 |
| 4.5 | Une expérimentation pour évaluer des environnements..... | 75 |
| 4.5.1 | Validation de nouveaux outils | 75 |
| 4.5.2 | Proposition d'un protocole expérimental | 77 |
| 4.5.3 | Réalisation, et analyse des résultats | 82 |
| 4.5.4 | Discussion | 88 |
| 4.6 | Synthèse | 89 |
| CHAPITRE 5. | Un processus outillé de vérification assisté par ordinateur | 91 |
| 5.1 | La vérification d'après la Property Model Methodology | 91 |
| 5.2 | Proposition d'un processus de vérification assistée par ordinateur..... | 94 |
| 5.2.1 | La vérification dans le processus de conception | 94 |
| 5.2.2 | La co-simulation d'un modèle de solution et d'un modèle de spécification | 96 |
| 5.2.3 | Une visualisation immersive du comportement | 97 |
| 5.2.4 | L'humain dans la boucle de simulation | 100 |
| 5.2.5 | De véritables composants dans la simulation | 101 |
| 5.2.6 | Synthèse | 102 |
| 5.3 | Un cas d'étude pour appuyer notre proposition | 102 |
| 5.4 | Vers une augmentation progressive du réalisme..... | 104 |
| 5.4.1 | Implémentation de la PMM | 105 |
| 5.4.2 | Un environnement virtuel pour visualiser le comportement | 105 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 5.4.3 | Implémentation d'interactions avec le système virtuel..... | 106 |
| 5.4.4 | Intégration de composants physiques | 109 |
| 5.5 | Validation de la proposition et discussions..... | 110 |
| CHAPITRE 6. | Que retenir ? | 114 |
| 6.1 | Des outils de visualisation immersive et interactive pour les activités de l'ingénierie système basée sur les modèles | 114 |
| 6.2 | L'utilisation de technologies de visualisation immersive et interactive peut-elle améliorer la qualité de la prise de décision lors de MBSE ? | 115 |
| 6.3 | Vers quelles pistes d'amélioration ? | 116 |

CHAPITRE 1. DES REVUES DE CONCEPTION BASEES SUR DES MODELES

Les activités de conception telles qu’elles étaient pratiquées il y a quelques années ne sont aujourd’hui plus viables face à la complexité toujours croissante des systèmes que nous concevons. Les méthodes et les outils de l’ingénieur ont considérablement évolué avec la quantité croissante de données produites et l’objectif de limiter les coûts et délais de conception. Dans ce chapitre, nous observerons les activités de conception telles que pratiquées aujourd’hui et comment elles évoluent avec l’utilisation intensive des modèles.

- 1.1 Une Conception basée sur des modèles 7
 - 1.1.1 D’une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles.... 8
 - 1.1.2 De nouvelles méthodes de conception centrées sur les modèles 8
 - 1.1.3 De nouveaux enjeux 11
- 1.2 De nouveaux enjeux en revues de conception 13
- 1.3 Structure du manuscrit..... 14

1.1 UNE CONCEPTION BASEE SUR DES MODELES

Lors des dernières décennies, sont apparues de nouvelles méthodes de conception se basant sur des modèles plutôt que sur des documents (INCOSE et al., 2015, sec. 9.2.1). Les modèles pour la conception de systèmes techniques sont des objets intermédiaires numériques qui représentent le système en cours de conception et dont le formalisme peut faciliter l’interopérabilité (Figure 1), améliorant ainsi la capacité des différents acteurs à échanger leurs vues métiers (Maurandy et al., 2012). Malgré ce passage aux modèles, visant entre autres à faciliter le maintien en cohérence des multiples vues, la quantité d’informations générées par la conception de systèmes de plus en plus complexes est telle que maintenir la cohérence des modèles devient à son tour un défi (Bayer, 2018).

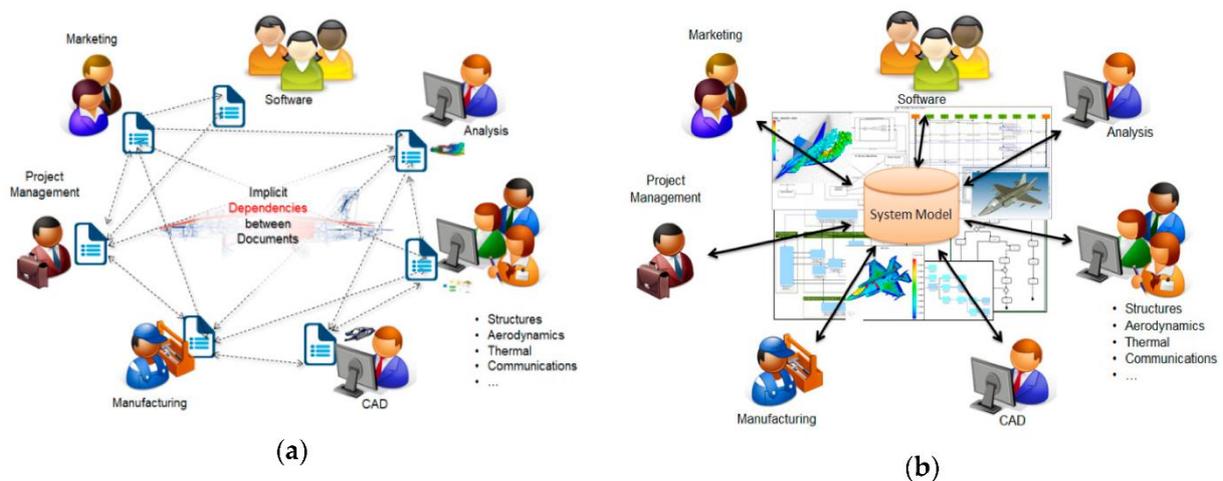


Figure 1 : Passage d'une ingénierie basée sur des documents (a) à une ingénierie basée sur les modèles (b)

1.1.1 D'une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles

Lors de la conception d'un système, un grand nombre de représentations intermédiaires sont produites par les différentes parties prenantes pour décrire le produit (exigences, géométrie 3D, comportement, calculs de structure, mais aussi des analyses de marchés, des études de coûts, etc.). Ces informations sont stockées dans ce qu'il convient d'appeler des objets intermédiaires (Vinck & Laureillard, 1996), qui peuvent, dans les faits, prendre de très nombreuses formes, allant du dessin à main levée réalisé lors de réunions à des prototypes physiques en passant par des maquettes en pâte à modeler (Vinck, 2011). Ces objets sont dits intermédiaires car ils servent de moyen de communication entre les acteurs d'un projet et sont donc primordiaux pour une collaboration efficace des parties prenantes (J.-F. Boujut & Laureillard, 2002). Lorsque ces objets sont sous la forme de documents, il est difficile de les maintenir à jour, de les synchroniser, ou encore d'évaluer leur qualité, c'est-à-dire leur complétude (est-ce que le document décrit bien l'intégralité du système étudié ?), exactitude (est-ce que la description de ce que l'on veut représenter du système est correcte ?), ou cohérence (est-ce que les données décrites dans ce document sont bien en adéquation avec celles décrites dans d'autres documents, décrivant le système dans des vues différentes ?) (INCOSE et al., 2015, sec. 9.2.1). Ces difficultés rendent alors la collaboration moins efficace. Pour ces raisons, une conception basée sur des modèles plutôt que sur des documents semble plus pertinente. Ainsi il est facile à réutiliser, à échanger, modifier, etc.. Toujours d'après l'International Council on Systems Engineering (INCOSE), l'utilisation de modèles permet d'améliorer la communication entre les parties prenantes d'un projet, de faciliter la gestion de la complexité du système conçu, d'améliorer sa qualité et de faciliter la capture des connaissances et leur réutilisation (INCOSE et al., 2015, sec. 9.2.1).

Par conséquent, de nouvelles démarches de conception, s'adaptant à cette utilisation intensive de modèles, voient le jour. On parle par exemple de Model-Based Systems Engineering (MBSE), terme introduit dès 1993 par Wymore (2018), dans un ouvrage réédité depuis et que l'INCOSE définit par :

"Model-based systems engineering (MBSE) is the formalized application of modeling to support system requirements, design, analysis, verification and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases" (Systems Engineering Vision Working Group of the INCOSE, 2007)

1.1.2 De nouvelles méthodes de conception centrées sur les modèles

Si le nom de MBSE est certainement le plus répandu, d'autres appellations existent, comme le MCE (Model-Centric Engineering), le MBE (Model-Based Engineering), le IMCSE (Integrative Model Centric Systems Engineering), le MDD (Model-Driven Development) etc., qui ont pour point commun de baser la définition et la gestion d'un système (de sa conception à sa fin de vie) sur l'utilisation de modèles. Dans ce but, de nouveaux langages de modélisation ont été développés, en particulier Systems Modeling Language (SysML¹) (Friedenthal et al., 2012), adopté par l'Object Management Group² (OMG) en 2006, permettant de modéliser des aspects abstraits de systèmes (exigences, architecture, etc.). Il est à noter que SysML, une extension d'Unified Modeling Language³ (UML) adaptée à l'ingénierie système, est issu des démarches du Model-Based Engineering (Figure 2).

¹ <https://www.omg.sysml.org/index.htm> - Consultée le 09/06/2022

² <https://www.omg.org/> - Consultée le 09/06/2022

³ <https://www.uml.org/> - Consultée le 25/07/2022

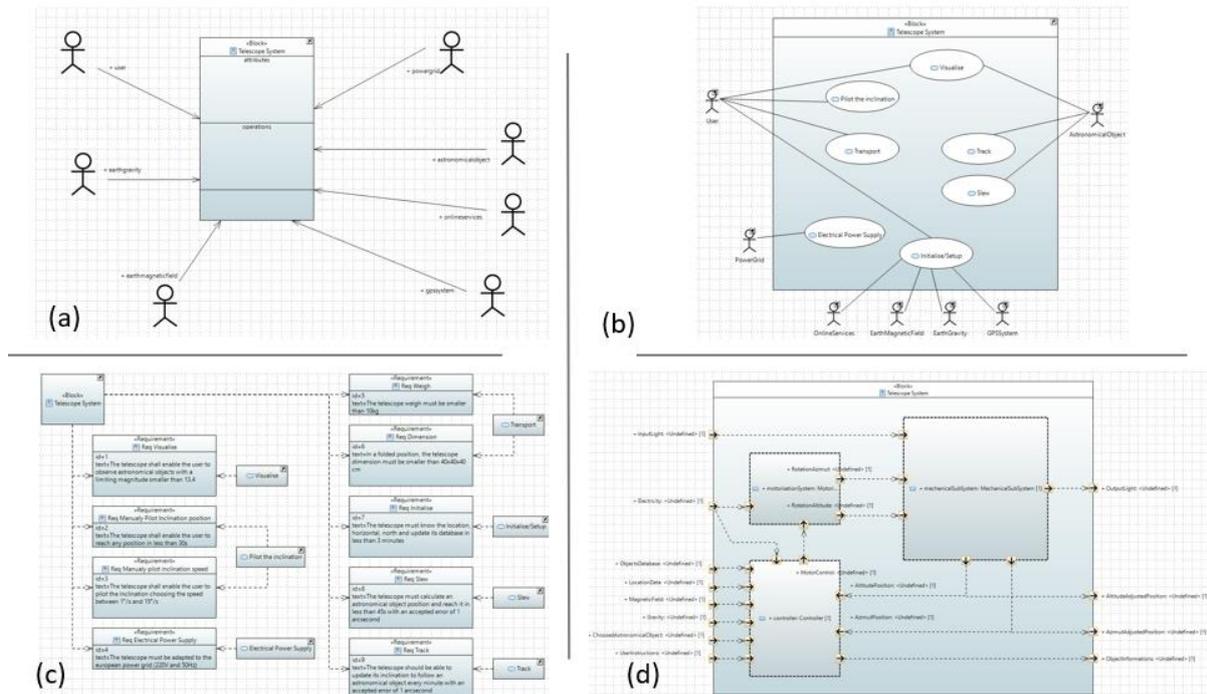


Figure 2 : Exemples de diagrammes SysML : Block Definition Diagram (a), Use Case Diagram (b), Requirement Diagram (c), Internal Block Diagram (d).

De nombreuses méthodes de conception basées sur ce langage ont alors été mises au point (Hoffmann, 2011; INCOSE et al., 2015, sec. 9.4; Mhenni et al., 2014; Weilkens, 2015). Cependant, plusieurs études démontrent les limites du langage SysML (Herzog & Pandikow, 2005; Maurandy et al., 2012), en particulier le manque de méthode, c'est pourquoi les acteurs industriels comme Alstom (Góngora et al., 2015) et Valeo (Piques, 2014) personnalisent le langage en limitant le nombre de diagrammes et en structurant les activités à réaliser dans un processus de modélisation. D'autres proposent même des alternatives à SysML, comme le « Rational Unified Process » (RUP) et son plug-in « Method Composer⁴ », un logiciel supportant des méthodes d'ingénierie basée sur des modèles, ou Jet Propulsion Laboratory⁵ (JPL) qui utilise le « State Analysis » (Morris et al., 2006), ou encore Piaszczyk (2011) avec une méthode compatible avec le Department of Defense Architectural Framework (DoDAF⁶), un cadre d'architecture système pour le département de la défense américain. Dans ce papier, l'auteur précise bien que cette méthode peut être utilisée avec le langage SysML ou avec l'une de ses alternatives. Une étude en interne chez Thalès montre que la plupart des parties prenantes impliquées dans un projet de conception ne sont pas familières du concept « d'orienté objet » sur lequel est construit le langage UML et donc par extension le langage SysML (Roques, 2016), rendant son utilisation compliquée, et nuisant alors à la qualité de la compréhension et de la collaboration. Partant de ce constat, ils proposent, eux aussi, une méthode, ARCADIA et son Domain Specific Language comme une alternative à SysML. Cette méthode, supportée par le logiciel Capella⁷ (Voirin, 2018), propose de suivre un workflow qui permet de progressivement passer de l'expression du besoin à l'architecture d'un système.

⁴ <https://www.ibm.com/support/pages/rational-unified-process-rup-plug-ins-rational-method-composer-751> - Consultée le 09/06/2022

⁵ <https://www.jpl.nasa.gov/> - Consultée le 20/06/2022

⁶ <https://dodcio.defense.gov/library/dod-architecture-framework/> - Consultée le 20/06/2022

⁷ <https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html> - Consultée le 10/06/2022

Même si elles possèdent toutes des particularités, ces méthodes répondent à un même objectif : spécifier et concevoir un système. De manière générale, et comme le décrit l'INCOSE dans sa définition du MBSE, nous pouvons décomposer le processus de conception d'un système en quatre grandes activités itératives et récursives que sont la spécification des exigences, la validation des exigences, la conception d'une ou plusieurs solutions et la vérification de la solution face aux exigences.

La spécification des exigences

L'objectif de cette phase est de traduire les attentes des parties prenantes utilisatrices et réalisatrices en un ensemble d'exigences que le système doit satisfaire. La norme ISO/IEC/IEEE 15288, dans sa section 6.4.3.1, définit la spécification des exigences de la façon suivante :

“The purpose of the System Requirements Definition process is to transform the stakeholder, user-oriented view of desired capabilities into a technical view of a solution that meets the operational needs of the user.”

La spécification est la conclusion de l'analyse du besoin et la première étape de la conception. Son but est de formaliser les exigences de façon à pouvoir prouver de façon non-réfutable, lorsque le système sera livré, qu'il satisfait les attentes de l'ensemble des parties prenantes. C'est en partie pour cette analyse du besoin et la spécification que les outils, méthodes et langages présentés dans la section précédentes ont été conçus. La spécification d'un système d'intérêt est supportée par divers logiciels de gestion des exigences, tels que DOORS⁸ d'IBM, Polarion⁹ de Siemens ou encore Jama Software¹⁰, lesquels facilitent le développement mais surtout la gestion des exigences en collaboration.

La validation des exigences

Le fait que les exigences soient formalisées dans un modèle de spécification n'implique pas nécessairement que celles-ci traduisent en effet le besoin pour lequel le système est conçu. Une étape dite de « validation » des exigences est alors nécessaire. La norme ARP-4754A définit cette activité de la façon suivante :

“Validation includes the activities necessary to demonstrate that the item requirements are complete, correct and consistent with regard to the system needs and architecture.”

La validation de la spécification consiste donc à s'assurer que l'ensemble des exigences est complet et correct. En d'autres termes, avec cette activité, nous nous assurons de concevoir le bon produit. Le processus de conception est un processus itératif. Si lors de la validation des incohérences sont mises en lumière dans la façon dont sont définies les exigences, ces dernières sont modifiées, avant d'être une nouvelle fois soumise à une phase de validation. L'INCOSE distingue trois phases pour réaliser cette activité.

- La préparation de la validation, en identifiant une stratégie de validation, la liste des contraintes du système, en s'assurant que les ressources nécessaires soient disponibles.
- La validation, en établissant un protocole de validation et en le réalisant.
- La gestion des résultats, c'est-à-dire faire l'analyse des données enregistrées lors de la validation dans le but de dresser une liste de corrections à apporter, mettre à jour le protocole, garder une traçabilité etc.

⁸ <https://www.ibm.com/products/requirements-management> - Consultée le 08/07/2022

⁹ <https://polarion.plm.automation.siemens.com/> - Consultée le 03/10/2022

¹⁰ <https://www.jamasoftware.com/> - Consultée le 03/10/2022

La conception d'une ou plusieurs solutions

Dans cette phase de conception, l'objectif est de tendre, par itérations successives, à une solution qui finit par se matérialiser par un prototype fonctionnel du système conçu. Parmi les différentes activités impliquées dans ce processus, nous pouvons citer la conception d'une architecture, la conception détaillée, l'implémentation d'une ou de plusieurs solutions, etc. (INCOSE et al., 2015, Chapter 4). Lors de la conception détaillée, l'utilisation de modèles, créés dans des logiciels spécialisés, est déjà depuis quelques années devenue la norme. La géométrie d'un système est par exemple modélisée au moyen d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Il en est de même pour les simulations du comportement dynamique d'un système, les calculs de structure par éléments finis, etc.

La vérification de la solution face aux exigences

Enfin, une fois qu'une solution est proposée, il est nécessaire de s'assurer qu'elle satisfait bien aux exigences exprimées dans la spécification. La norme ISO/IEC/IEEE 15288, dans sa section 6.4.9.1, définit la vérification de la solution face aux exigences de la façon suivante :

“The purpose of the Verification process is to provide objective evidence that a system or system element fulfils its specified requirements and characteristics.”

Pour faire un parallèle avec la validation, cette fois, nous nous assurons de concevoir correctement le produit. Plusieurs techniques existent pour réaliser cette vérification (INCOSE et al., 2015, sec. 4.9.2.2) :

- L'inspection : Le produit est inspecté visuellement pour s'assurer que les formes, dimensions, etc., respectent les exigences.
- L'analyse : Mise en évidence, par des méthodes d'analyses (calculs, simulations, etc.), du respect des exigences.
- La démonstration : Sur un démonstrateur fonctionnel d'un système ou d'un sous-système, mise en évidence du respect des exigences par la mise en fonctionnement.
- Le test : Le plus souvent sur des sous-systèmes, vérification du respect des exigences par la mesure de grandeurs physiques lors du fonctionnement du système.

La mise en œuvre d'une démarche d'ingénierie système basée sur les modèles apporte divers avantages pour chacune de ces quatre activités. Par exemple, en phase de spécification, les modèles d'exigences plutôt que des énoncés textuels dans un document facilitent la réutilisation et la traçabilité (Suh, 2001). En phase de validation, la simulation de modèles de spécifications permet d'identifier des exigences conflictuelles (redondantes ou contradictoires) ou incorrectes (ambiguës, incomplètes, etc.) (Micouin, 2008). En phase de conception, en plus de tous les moyens de simulation maintenant routiniers, l'usage de modèles comme source unique de définition d'un système facilite la définition des interfaces et donc la collaboration entre les équipes (Madni & Sievers, 2018). Enfin, en phase de vérification, disposer de modèles de spécification et de modèles de conception a l'avantage non négligeable de pouvoir faire de la co-simulation pour détecter des erreurs de spécification ou de conception au plus tôt avant même les premiers prototypes (Micouin, 2014).

1.1.3 De nouveaux enjeux

Avec l'arrivée de systèmes de plus en plus complexes, une conception basée sur des modèles plutôt que sur des documents paraît plus appropriée. Cependant, si ce changement de paradigme permet en effet de résoudre un certain nombre de difficultés, notamment en ce qui concerne la gestion des données, il implique d'autres problèmes qui affectent encore la collaboration entre les différentes parties prenantes. Ces verrous viennent tout d'abord de la quantité toujours croissante de modèles

conçus pour représenter le système. De plus, si ces modèles sont effectivement plus fins et plus synthétiques que des documents textuels par exemple, ils sont également peu compréhensibles par un observateur extérieur non-initié au langage préféré pour la modélisation. Enfin, ces modèles ne représentent qu'une vue partielle du système, sans liens explicites entre des modèles appartenant à des vues différentes, rendant le maintien de la cohérence multivue très compliqué. C'est pour cela que certaines études ont tenté de proposer des modèles produits comme l'ontologie Functional, Behaviour, Structure (Gero, 1990) sans que personne n'arrive à définir "le" modèle idéal, aucun n'étant adopté ni par la communauté scientifique, ni par les industriels.

Gérer de grands jeux de données

Les grands jeux de données produites lors de la conception d'un système sont l'une des raisons du passage à l'utilisation de modèles. Cependant, si les modèles ont effectivement permis de faciliter la gestion des données, toutes les limites n'ont pas été dépassées, d'autant plus que le nombre de données produites continue d'augmenter avec la complexité des systèmes conçus. Ainsi, des données se retrouvent éparpillées dans de nombreux modèles différents, et si la recherche d'informations dans un unique modèle est simplifiée par les modèles par rapport aux documents (INCOSE et al., 2015), nous répétons les mêmes erreurs. En effet, il est toujours compliqué de créer des liens d'interdépendance entre certaines données contenues dans les modèles et de gérer ces liens (Bayer, 2018).

Des vues métiers très spécifiques

Les modèles permettent de représenter une grande quantité d'informations qui décrivent le système conçu dans la vue d'un métier en particulier. Ces représentations peuvent prendre une forme iconique – c'est-à-dire qu'elle possède des caractéristiques communes avec le système conçu, comme un modèle 3D qui représente sa géométrie – ou symbolique – c'est-à-dire qu'elle codifie, à l'aide de symboles, des informations qui ne partagent pas de caractéristiques avec sa représentation, comme un diagramme d'architecture réalisé en SysML (Peirce, 1958). Boujut & Hisaciklilar (2012) observent alors qu'en situation de conception, les représentations iconiques sont bien plus faciles à comprendre, quelle que soit l'origine de l'observateur. Ainsi, les modèles 3D ou encore les animations résultant de la simulation du comportement d'un système sont des informations facilement partageables aux diverses parties prenantes car facile à interpréter.

Cependant, tous les aspects d'un système ne sont pas représentables sous une forme iconique comme les exigences. Dans ce cas, l'utilisation de modèles n'apporte des avantages qu'au sein d'un même métier. Pour comprendre le modèle, il est alors nécessaire d'interpréter les symboles utilisés pour encoder les informations, ce qui facilite la collaboration entre experts mais exclut les autres parties prenantes comme les fonctions transverses. Par exemple, SysML facilite la communication au sein de la R&D mais est souvent un obstacle à la collaboration avec les autres fonctions de l'entreprise (qualité, opérations, achats, marketing, etc.) alors même que l'ingénierie système avec SysML comme langage pivot se veut être une démarche d'ingénierie intégrée.

Une gestion de la cohérence toujours compliquée

L'un des problèmes identifiés avec la pratique d'une ingénierie basée sur des documents est le maintien de la cohérence entre les différentes vues métiers et l'introduction des modèles n'a toujours pas permis de résoudre ce problème. D'abord, leur prolifération ainsi que leur complexité, compliquent la traçabilité des informations contenues dans des modèles qui reposent sur des langages et des logiciels variés. Si nous avons présenté quelques méthodes et outils pour concevoir avec des modèles plutôt que des documents, aucune d'entre elles ne propose une solution englobant tous les

aspects de la conception sans éprouver le besoin d'interopérer des méthodes et logiciels dont l'expertise est complémentaire. C'est donc aux acteurs des projets de conception que revient la tâche de faire le lien entre les modèles, afin de s'assurer qu'ils décrivent effectivement le même système. Pour essayer de palier à cette limite, diverses solutions visent à intégrer des langages et des logiciels dédiés à la modélisation de vues spécifiques dans un environnement unique. Par exemple, Paredis (2010) propose SysML4Modelica pour intégrer SysML en Modelica. Cette solution permet de garantir la cohérence entre ce qui est défini dans les diagrammes d'architecture et ce qui est modélisé pour simuler le comportement du système. Dassault Systèmes, dans sa 3DEXPERIENCE¹¹, permet de suivre un processus Requirements Functional Logical Physical (RFLP)(Kleiner & Kramer, 2013), lequel représente, dans le même environnement, un modèle d'exigence, d'architecture, de comportement et CAO. Dans les faits, les liens entre les modèles ne sont pas toujours complets mais ils ont le mérite d'être stockés et exploitables dans un seul logiciel. Cependant, les offres logicielles intégrées ne couvrent pas toutes les activités ou pas avec les mêmes capacités que les solutions spécifiques. Il est par exemple fréquent que des ingénieurs hydrauliciens préfèrent utiliser LMS Amesim plutôt que Dymola qui a été intégré dans la couche logique de la 3DEXPERIENCE.

Pour conclure, si l'utilisation de modèles pour numériser les différentes vues d'un système facilite l'échange, la mise à jour et la cohérence des données, de nombreuses difficultés persistent. La représentation dans des vues métiers très fines, mais par conséquent difficilement compréhensibles pour un observateur extérieur, les langages spécifiques aux environnements de modélisation ou encore le nombre toujours plus important de données produites pour la conception de système sont encore des freins à une collaboration efficace entre les différentes parties prenantes. Ces limites ressortent particulièrement lors de l'organisation de revues de conception, pendant lesquelles les acteurs du développement de nouveau produit se réunissent pour évaluer la qualité des modèles conçus et prendre des décisions informées et avisées.

1.2 DE NOUVEAUX ENJEUX EN REVUES DE CONCEPTION

Au cours du développement d'un nouveau produit, les différentes parties prenantes doivent régulièrement se réunir pour discuter des avancées du projet, s'assurer que ce qui est conçu jusque-là correspond au besoin exprimé par les exigences, ou encore prendre des décisions comme faire des choix entre plusieurs solutions possibles.

Pour cette activité en particulier, les acteurs du projet, lesquels travaillent tous sur des vues différentes du système conçu, sont amenés à échanger sur leurs travaux, communiquer leurs difficultés, comprendre l'implication de leur contribution dans l'ensemble du projet. Si avec l'utilisation de documents nous connaissons déjà les limites en termes d'échanges entre les parties prenantes et de gestion des données, nous pouvons nous demander ce que l'introduction d'une ingénierie centrée sur les modèles implique dans cette activités, d'autant que les revues de conception basées sur des modèles ne sont que très peu étudiées dans la littérature, avec un unique article les évoquant (Bayer, 2018). Dans cette publication, l'auteur se pose la question de l'utilisation de modèles en général dans la conception en faisant un état des lieux qui compare, sur un projet de la NASA, l'utilisation prévue des modèles et la pratique dans les faits. Ainsi, il constate que lors de revues de conception impliquant un large panel de parties prenantes, notamment les fonctions décisionnelles, ce ne sont pas des modèles qui sont présentés mais des diapositives PowerPoint qui incluent des captures des modèles lesquelles racontent une histoire, sans profiter des avantages que peut offrir l'utilisation des modèles.

¹¹ <https://www.3ds.com/> - Consultée le 20/06/2022

Ce retour en arrière met en évidence la difficulté à utiliser les modèles pour la communication au-delà du domaine spécifique pour lequel ils sont prévus et s'ils semblent tout à fait adaptés à un ou plusieurs métiers en particulier, il est difficile de les utiliser pour toucher un public plus large, certainement pour des raisons similaires à celles listées précédemment en section 1.1.3 (prolifération de modèles, apprentissage de langages de modélisation spécifiques, prise en main et interopérabilité des nombreux logiciels de modélisation, etc.).

Nous sommes toutefois convaincus que l'utilisation de modèles est bénéfique pour la conception et qu'elle peut être la norme dans le futur. Pour cela, il faut que l'ensemble des activités, dont les revues de conception font partie, profite de l'utilisation intensive de modèles. Ce sont à ces revues de conceptions basées sur les modèles que s'intéresse cette thèse en particulier. Elles seront appelées revues MBSE dans la suite de ce manuscrit. Nous souhaitons apporter des réponses à la très large question de recherche :

COMMENT EST-IL POSSIBLE D'AMELIORER L'EFFICACITE DES REVUES MBSE ?

1.3 STRUCTURE DU MANUSCRIT

Pour apporter des éléments de réponse à la question de recherche précédente, le chapitre 2 de ce manuscrit raffine la question de recherche qui, en l'état, est trop large pour que l'on puisse vérifier une ou plusieurs solutions hypothétiques. Cela repose sur un état de l'art tant académique qu'industriel, mais aussi sur une enquête menée auprès des intéressés pour, d'une part, mieux comprendre les pratiques de revue MBSE et, d'autre part, compléter l'absence de référence bibliographique qui décrit ces pratiques. Ce chapitre montre notamment que l'utilisation de technologies de visualisation et d'interaction immersives peut être un élément de réponse hypothétique à notre question de recherche. Ensuite, le chapitre 3 détaille l'analyse des fonctions attendues par les environnements virtuels proposés pour supporter des activités de revue de conception. Le chapitre 4 présente, d'une part, un démonstrateur fonctionnel d'un environnement virtuel visant à améliorer la compréhension multivue d'une définition centrée sur les modèles et, d'autre part, une validation expérimentale de celui-ci. Le chapitre 5, lui, propose un processus outillé pour la vérification, qui s'appuie sur l'utilisation d'un deuxième environnement virtuel. Enfin, nous concluons sur les apports de cette thèse par rapport à l'état de l'art des connaissances et des technologies, ainsi que sur les portes qu'elle ouvre sur de futures recherches.

CHAPITRE 2. DES REVUES DE CONCEPTIONS BASEES SUR LES MODELES

Avec le passage d'une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles, de nombreuses pratiques doivent évoluer. Les activités de la conception sont fortement impactées par ce changement de paradigme, et les revues de conception n'y échappent pas. Ce chapitre se concentre sur cette activité. Dans un premier temps, on s'intéresse à la définition d'une revue de conception et pourquoi elles jalonnent le processus de conception. La littérature sur le domaine des revues MBSE étant très pauvre, celle-ci est complétée par une enquête menée auprès d'une soixantaine d'individus pour mieux comprendre leurs pratiques actuelles et les nouveaux défis. Une troisième section s'intéresse aux nouveaux outils pour l'analyse de la grande quantité de données produites lors de la conception ou pour l'amélioration de la visualisation de ces données. Enfin, dans une synthèse de ce chapitre, les limites qui persistent encore malgré l'introduction de ces outils, et une question de recherche raffinée sont introduites.

Ce chapitre est un état de l'art général des différents concepts qui seront abordés et utilisés dans cette thèse. Par la suite, les chapitres 4 et 5 feront l'objet d'un état de l'art plus spécifique à chacune des problématiques et propositions.

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Un Processus ponctué par des Revues de Conception | 15 |
| 2.1.1 | Les objectifs et les activités d'une revue de conception | 16 |
| 2.1.2 | Des limites importantes | 17 |
| 2.2 | Les revues MBSE dans la pratique..... | 18 |
| 2.2.1 | Méthodologie | 19 |
| 2.2.2 | Résultats | 20 |
| 2.3 | De nouvelles revues de conception | 28 |
| 2.3.1 | Les sciences des données au service de l'ingénierie système basée sur les modèles .. | 28 |
| 2.3.2 | Les logiciels de simulation au service de la vérification | 30 |
| 2.3.3 | L'utilisation d'outils immersifs | 31 |
| 2.3.4 | Les technologies pour des revues immersives | 33 |
| 2.3.5 | Des limites encore importantes | 35 |
| 2.4 | Synthèse de la revue de littérature | 35 |
| 2.4.1 | Questions et Hypothèses de recherche | 36 |
| 2.4.2 | Positionnement de notre recherche dans la littérature | 37 |
| 2.5 | Validation de nos travaux..... | 37 |

2.1 UN PROCESSUS PONCTUE PAR DES REVUES DE CONCEPTION

La conception d'un système est un processus ponctué de revues pendant lesquelles les acteurs du projet doivent échanger et comprendre leurs points de vue pour prendre des décisions avisées. Elles peuvent prendre des formes variées qui dépendent de l'objectif de la revue. Aujourd'hui, elles

prennent le plus souvent la forme de réunions dans lesquelles des diapositives au format PowerPoint, préparées en amont, sont la source de nombreuses limites dans une démarche de Model-Based Systems Engineering (MBSE).

2.1.1 Les objectifs et les activités d'une revue de conception

Une revue de conception est habituellement une réunion pendant laquelle les différents acteurs du projet de conception analysent et évaluent de façon collaborative les solutions à un problème (Huet et al., 2007; Wolfartsberger, 2019). Ils doivent donc échanger, et synchroniser les différentes données produites par chacun et s'assurer que toutes représentent effectivement une solution qui respecte l'ensemble des contraintes fixées à la fois par l'utilisateur final et par les enjeux de l'entreprise. Si dans les faits la revue semble primordiale pour le bon déroulement de la conception d'un système, son fonctionnement précis n'est que très peu étudié dans la littérature. Dans leur article, Gericke et al. (2020) expliquent :

“Sharing understanding from practice can be difficult since publishing purely descriptive papers can be a challenge as reviewers demand methods or multiple case studies.”

Ainsi, depuis 2010, à notre connaissance, un seul article purement descriptif centré sur la revue de conception a été publié (Chen et al., 2019). Dans cet article, les auteurs étudient les revues de modèles CAO grâce à un sondage auprès d'ingénieurs en conception de produit. Il faut tout de même noter que les modèles CAO ne sont qu'un des nombreux modèles produits lors de la conception d'un système, mais ce qui ressort de cet article peut donner des pistes pour comprendre les revues de conception en général. Ainsi, les auteurs découpent le développement d'un produit en trois grandes phases :

- La phase préliminaire, c'est-à-dire avant que les modèles CAO commencent à exister, phase pendant laquelle les ingénieurs se concentrent surtout sur la créativité.
- La phase de conception détaillée, lors de laquelle les modèles CAO sont conçus, revus, et corrigés à chaque itération.
- La phase de mise en production, pendant laquelle le produit conçu et détaillé dans les modèles CAO lors de la phase précédente est fabriqué effectivement.

L'objectif des auteurs est alors de comprendre, lors de ces trois phases, comment sont organisées ces réunions (en présentiel, à distance, synchrone ou asynchrone), quels sont ses buts, quels outils sont utilisés, et quels sont les rôles des participants à la revue de conception. La Figure 3 est un extrait des résultats présentés dans l'article. Les auteurs notent une différence dans l'organisation des revues lors des différentes phases de la conception, avec beaucoup plus de présentiel dans les premières phases, et de plus en plus de revues asynchrones au fil de l'avancée du projet. Les revues asynchrones ne se déroulent pas nécessairement à un instant précis comme une réunion mais plutôt comme un échange de mails, ou une « issue » sur un système de gestion des versions comme Git. L'objectif principal évolue également même si certains sont permanents, comme la communication.

Rappelons que cette thèse s'intéresse aux revues MBSE. Dans l'article présenté dans cette section, l'objet d'étude sont les revues de modèles 3D. Il existe alors probablement des différences dans les objectifs, l'organisation des revues ou encore les différentes parties prenantes impliquées lors d'une revue MBSE qui ne se limite pas à la géométrie, mais il donne déjà une idée de ce qu'elles peuvent être.

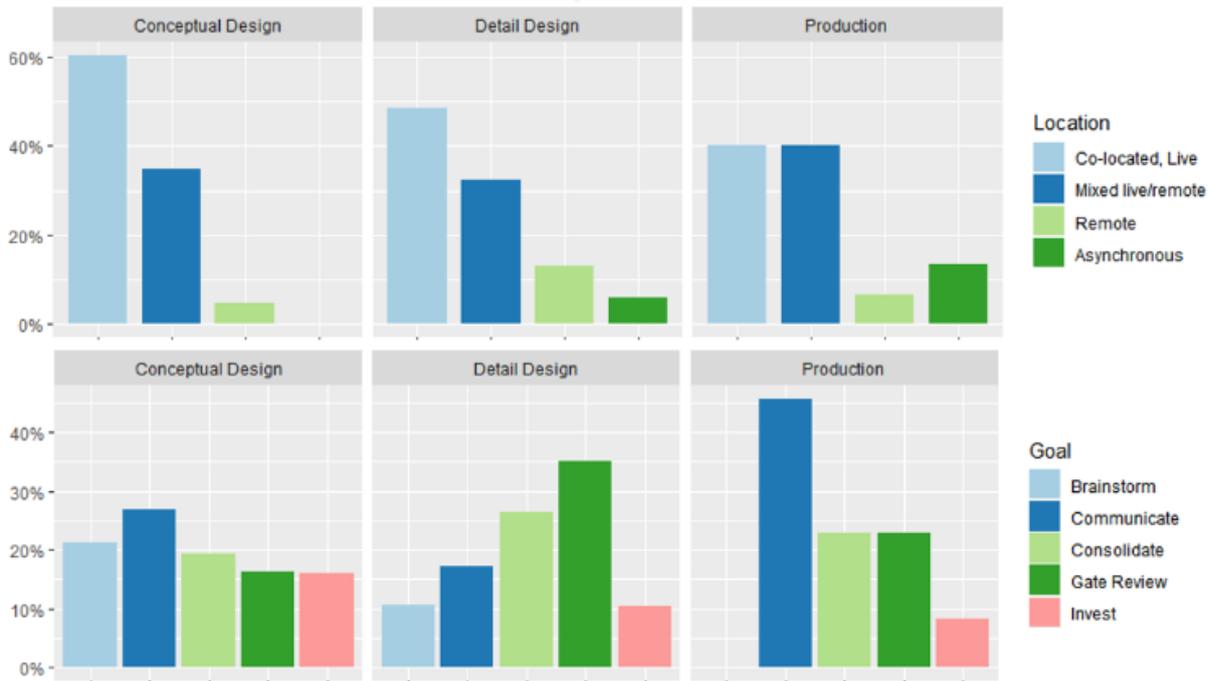


Figure 3 : Extrait des résultats de Chen et al. (2019)

Ainsi, à l'aide de cet article et de notre expérience personnelle, nous pouvons dresser une liste non-exhaustive d'activités menées lors de revues MBSE :

- Arbitrer des alternatives : comparaison de solutions candidates à un problème sur la base de critères de décision.
- Créer de nouvelles idées : surtout lors de la phase amont d'un projet de conception, les parties prenantes peuvent se réunir pour échanger et faire émerger de nouvelles idées.
- Comprendre le système conçu : les parties prenante cherchent à comprendre comment est conçu le système dans d'autres vues métiers.
- Comprendre et analyser l'impact d'une modification : comprendre comment se propage une modification dans les représentations intermédiaires du système et les conséquences qui en résultent (Brahma & Wynn, 2021).
- Réaliser des activités de validation et vérification (V&V) : s'assurer dans le cas de la validation que les exigences définissent bien le problème auquel le système doit répondre, et dans le cas de la vérification que la solution satisfait aux exigences (INCOSE et al., 2015; Micouin, 2014).
- Capturer des justifications : capturer les échanges, les arguments et les décisions prises lors des revues, ce qui aujourd'hui se fait surtout sous la forme de compte rendu de réunion (Huet et al., 2007).

2.1.2 Des limites importantes

Dans la littérature récente, depuis 2010, à notre connaissance, seul un article mentionne les revues MBSE (Bayer, 2018), sans en être le sujet principal. L'auteur expose différentes limites du MBSE qu'il rencontre au JPL¹² de la NASA dans le cadre du projet Europa Clipper (Bayer et al., 2015, 2017). A propos des revues de conception, il explique qu'aujourd'hui, si pour des réunions n'impliquant que des spécialistes les modèles sont bien utilisés, ce n'est plus du tout le cas lors des principales revues de

¹² <https://www.jpl.nasa.gov/> - Visitée le 11/05/2022

conception nécessitant la participation des décideurs de plus haut niveau. Il explique alors que des éléments provenant des modèles sont scénarisés dans des diapositives pour raconter une histoire :

*“Also, although all three major gate reviews so far (MCR, SRR/MDR, FS PDR) were still hand-crafted powerpoint slide decks that tell a story, there were fundamental differences in the preparation: much more content came directly from the system model, and there were no major surprises in any of the review preparation phases.”
(Bayer, 2018)*

Cette manière de faire implique également des difficultés de compréhension entre les parties prenantes, alors même que la communication est a priori l’une des activités principales en revues de conception (Chen et al., 2019).

Pour rentrer un peu plus dans le détail, les revues de conception servent différents objectifs, que ce soit par exemple la compréhension du système, la validation des modèles ou encore la vérification de la définition d’un système. Dans ce dernier cas, c’est la spécification des exigences qui limite la qualité de la prise de décision. Dans son ouvrage, Suh (2001) décrit :

“Often designers find that the precise description of “what we want to achieve” is a difficult task. Many designers deliberately leave them implicit rather than explicit and then, start working on design solutions even before they have clearly defined their design goals. They measure their success by comparing their design with the implicit design goals they had in mind. They spend a great deal of time to improve and iterate the design until the design solution and “what they had in mind” converge, which is a time-consuming process at best.”

Il met ainsi en lumière que le manque d’une spécification explicite implique une perte de temps significative. Cette spécification n’est pourtant pas toujours réalisée avec l’effort nécessaire, les fonctions en aval du processus de développement se retrouvent alors avec des centaines de pages d’exigences dont la qualité ne permet pas une conception, validation et vérification rigoureuse.

Enfin, la capture des justifications dans des comptes rendu de réunion, elle aussi, possède des limites. En effet, Huet et al. (2007) montrent que des informations sont perdues en procédant de cette façon. Si les décisions sont bien capturées, le pourquoi de ces décisions ne l’est pas. Ces comptes rendus ne reflètent donc pas les échanges entre les parties prenantes, perdant ainsi de la connaissance, ce qui peut ralentir la conception dans les cas où des explications serait répétées de nombreuses fois.

Pour conclure, bien que les revues de conception soient une étape inévitable lors de la conception de systèmes, dans le cas d’une conception basée sur des modèles, elle est peu étudiée et documentée dans la littérature, et les pratiques actuelles semblent posséder diverses limites, qui nuisent à la bonne progression du projet autant en termes de temps que de qualité.

2.2 LES REVUES MBSE DANS LA PRATIQUE

La littérature sur les revues MBSE étant très pauvre, il est difficile d’identifier les pratiques des ingénieurs et de dégager des pistes de recherche concrètes pour améliorer une activité qui, de toute évidence, impose de se développer pour dépasser les limites identifiées dans les sections précédentes (Bayer, 2018). Ainsi, pour compléter l’état de l’art, nous réalisons une enquête qui se présente sous la forme d’un questionnaire diffusé auprès d’ingénieurs, tant dans le domaine académique que dans le privé, dans le but d’évaluer leurs pratiques de revues MBSE (Pinquié et al., 2022).

2.2.1 Méthodologie

Ce sondage se présente sous la forme d'un questionnaire en ligne, créé sur la plateforme Framiform, pour être largement diffusable. Il est composé de 4 questions démographiques pour comprendre qui sont les participants qui répondent à ce sondage, puis de 10 questions sur les pratiques et les nouveaux défis des revues MBSE. Toutes les questions sont en anglais et regroupées dans le Tableau 1. Le symbole « (o) » signifie que les sondés n'avait droit qu'à une seule réponse.

| | |
|-------------------|---|
| Démographie | 1. Which industry sectors are you working in? |
| | 2. Where are you located? (o) |
| | 3. What is your functional area? |
| | 4. What is your experience in using model-based design? (o) |
| Pratiques & Défis | 5. Do you use models in your design activity? |
| | 6. Do you mainly participate in design reviews? |
| | 7. How long last the design reviews you attend? (o) |
| | 8. Do you participate in (a)synchronous co-located or remote MBD reviews? |
| | 9. Do you (use) share models during design reviews? (o) |
| | 10. At which stage of the product development process did the model-based design review take place? |
| | 11. What goals have you addressed during model-based design reviews? |
| | 12. How do you share models during design reviews? |
| | 13. How do you deal with interdependencies among models during design reviews? |
| | 14. How do you capture decisions during design reviews? |
| | 15. Are you facing difficulties when trying to understand models shared during a design review? |

Tableau 1 : Récapitulatif des questions posées dans le sondage

Le but de ce questionnaire est d'identifier non seulement les pratiques actuelles des ingénieurs lors de leurs revues MBSE mais aussi les limites de ces pratiques.

Cette enquête est diffusée à des associations et groupes de travail dans lesquels nous sommes impliqués. La sélection de ceux-ci est dirigée par le besoin de toucher un public large, qui recense des experts et des non-experts en ingénierie système, de l'enseignement et la recherche publique et de l'industrie dans le privé, en France ou à l'étranger.

Les cibles incluent le groupe de travail MBSE de l'Association Française d'Ingénierie Système¹³ (AFIS), composé de 115 personnes, majoritairement des ingénieurs et des managers dans l'industrie mais aussi quelques chercheurs. Une autre communauté d'ingénierie système visée est celle du programme national ATLAS¹⁴, qui propose, entre autres, des projets pour promouvoir l'utilisation de l'ingénierie système dans l'industrie. Toujours dans le champ national, l'enquête est diffusée à la communauté académique en génie industriel S.mart¹⁵, laquelle complète bien les deux premières qui sont essentiellement composées d'industriels. Si ces communautés forment un ensemble assez hétérogène, elles sont composées majoritairement de Français. Dans le but de toucher un public

¹³ <https://www.afis.fr/> - Consultée le 11/05/2022

¹⁴ <https://atlas.afnet.fr/> - Consultée le 11/05/2022

¹⁵ <https://s-mart.fr/> - Consultée le 21/10/2022

également étranger, le questionnaire est adressé à la Design Society¹⁶, une association savante européenne, et le groupe de travail « Analysis & Design » de l'Object Management Group¹⁷ (OMG) qui constitue un public plutôt expert en ingénierie système. Enfin, pour élargir encore notre cible, l'enquête est relayée sur le réseau social professionnel LinkedIn.

Une fois collectées, les réponses à ce questionnaire, consultables en libre accès¹⁸, sont analysées dans le logiciel RStudio¹⁹. Le code R utilisé et les résultats de l'analyse, présentés dans la section suivante sont accessibles²⁰ sur le projet GitLab²¹.

2.2.2 Résultats

Cette section présente les résultats de l'analyse de l'enquête selon trois grandes motivations : qui sont les participants à l'enquête ? Quelles sont leurs habitudes de revues de conception, et ce, sans spécifiquement se demander ce qu'ils font des modèles ? Quelles sont leurs habitudes de revues MBSE ?

Qui sont les répondants ?

Dans un premier temps, une série de questions sert à identifier le profil des personnes qui ont répondu au sondage pour s'assurer que la population cible soit atteinte.

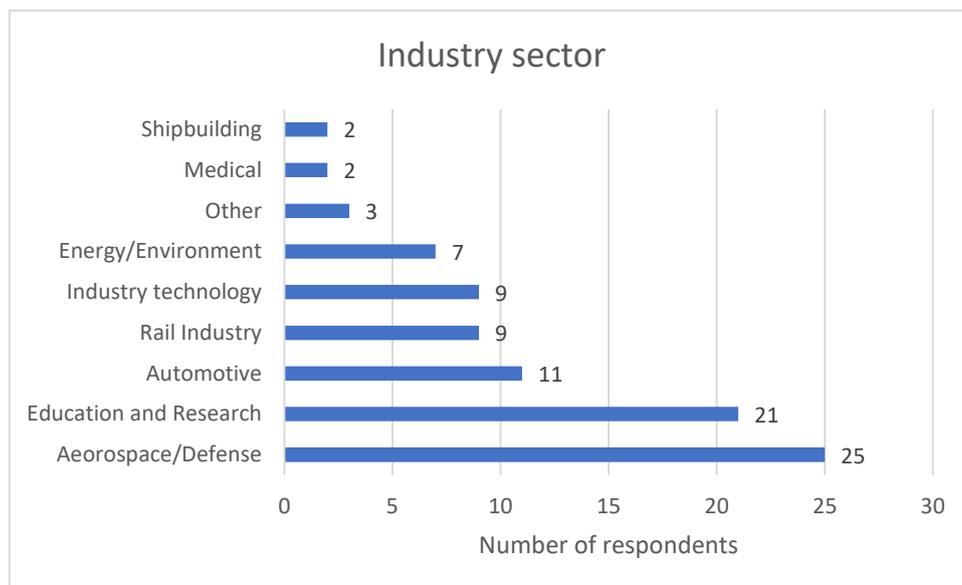


Figure 4 : Réponse à la question : Which industry sectors are you working in?

La Figure 4 indique que deux secteurs d'activité se dégagent tout particulièrement : L'éducation et la recherche, et l'aérospatial et la défense. Il était possible pour cette question de cocher plusieurs réponses. Cette dispersion est certainement due aux communautés sollicitées, l'AFIS par exemple est composée de nombreux d'ingénieurs dans l'aéronautique.

¹⁶ <https://www.designsociety.org/> - Consultée le 11/05/2022

¹⁷ <https://www.omg.org/> - Consultée le 11/05/2022

¹⁸ https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/pinquier/mbse_design_review_suvey/-/blob/master/Survey.xlsx - Consultée le 11/05/2022

¹⁹ <https://www.rstudio.com/> - Consultée le 11/05/2022

²⁰ https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/pinquier/mbse_design_review_suvey/-/blob/master/Analysis.R - Consultée le 11/05/2022

²¹ https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/pinquier/mbse_design_review_suvey - Consultée le 11/05/2022

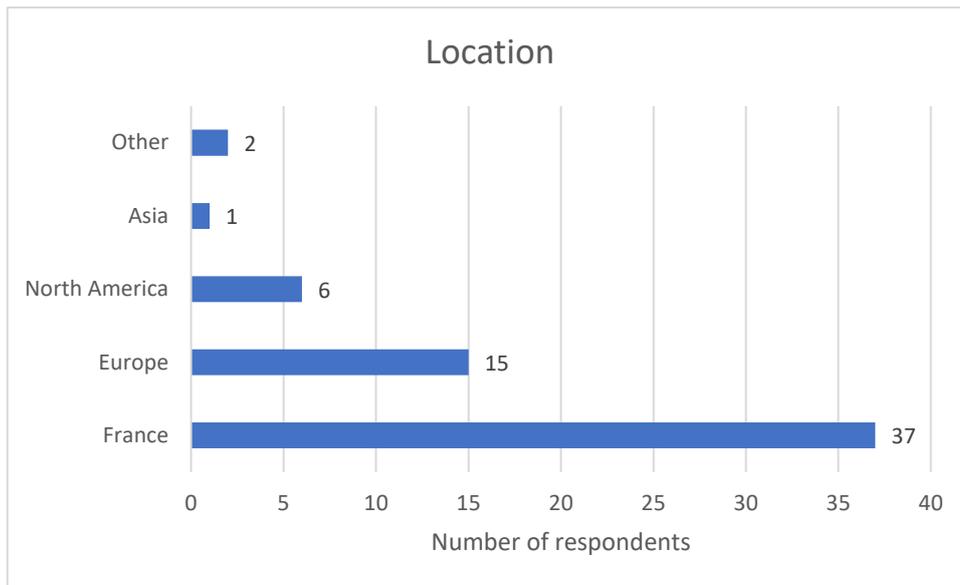


Figure 5 : Réponse à la question : Where are you located?

Les groupes de travaux et associations destinataires sont majoritairement français, un peu plus de la moitié des répondants sont donc français (Figure 5). Les deux réponses « Autre » sont des citoyens du Royaume-Uni.

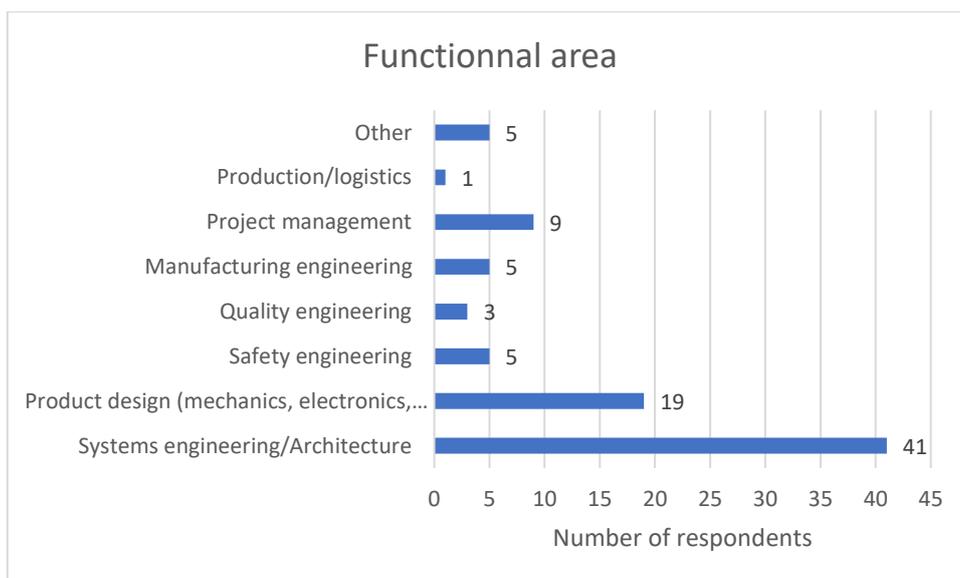


Figure 6 : Réponse à la question : What is your functional area?

Pour indiquer le domaine dans lequel les participants travaillent, il était à nouveau possible de donner plusieurs réponses (Figure 6) dans lesquelles notre proximité avec les communautés d'ingénierie système se reflète. Il est également possible de justifier cette répartition par le fait que l'une des caractéristiques de l'ingénierie système soit l'utilisation intensive de modèles et que c'est cette communauté qui se soit donc sentie la plus concernée par notre étude.

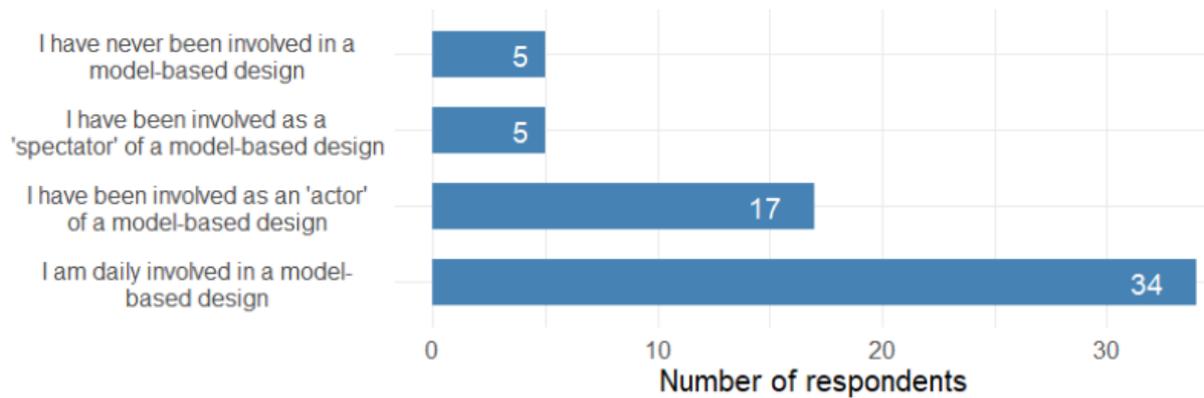


Figure 7 : Réponse à la question : What is your experience in using Model-Based Design?

Enfin, pour conclure sur le profil des participants, l'objectif était d'atteindre aussi bien des habitués de revues de conception que des novices. Dans la question posée pour la Figure 7, on distingue deux populations de taille quasi équivalente que l'on confrontera dans la suite de l'analyse des résultats:

- Les personnes pratiquant quotidiennement des revues MBSE, que nous qualifierons dans la suite « d'experts » (n=34).
- Les personnes qui ont déjà été acteurs de revues MBSE sans que cela semble être une habitude pour eux – les « autres » (n=27).

Quelles sont leurs pratiques en revue MBSE ?

Le but de notre étude est de comprendre quelles sont les pratiques des ingénieurs en revue MBSE. Etant donnée la diversité des profils des participants à ce genre de réunion, il semble pertinent de comprendre comment des experts et des non-experts se comportent face aux modèles sur lesquels ils s'appuient. C'est pour cette raison que, pour l'ensemble des questions suivantes, ces deux groupes sont séparés, afin d'éventuellement observer des différences de pratiques et des défis particuliers.

Nos premiers questionnements sont les mêmes que ceux auxquels Chen et al. (2019) répondent dans leur étude, mais dans un contexte différent qui va au-delà du modèle géométrique 3D. De plus, ici, l'objectif est justement de comprendre comment le passage d'une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles impacte les revues de conception.

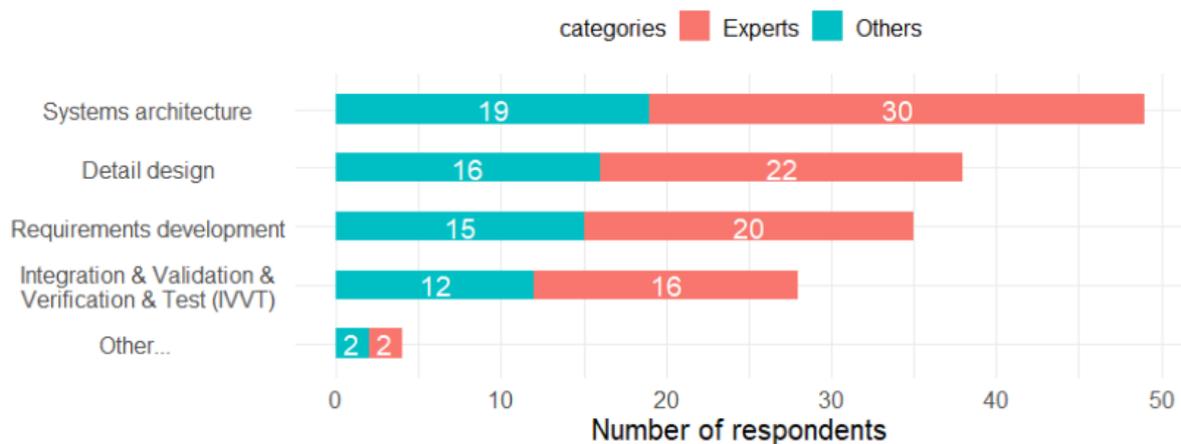


Figure 8 : Réponse à la question : At which stage of the development process did the MBD review occur?

D'après les réponses (Figure 8), si c'est surtout pendant la phase amont du projet, lors des choix cruciaux d'architecture du système que les revues ont lieu, elles jalonnent le processus de

développement d'un nouveau produit. Notons que dans les réponses « Autres », on retrouve deux fois cité une phase de développement de concept assimilable à la phase d'architecture. Enfin, nous n'observons aucune différence marquante de comportement entre des experts et des non-experts.

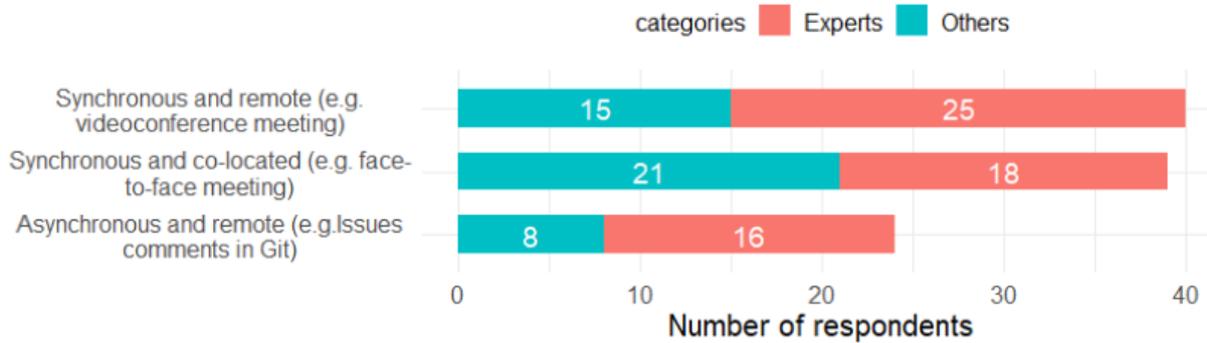


Figure 9 : Réponse à la question : Do you participate in (a) synchronous co-located or remote MBD reviews?

Une revue peut prendre différentes formes : distanciel, présentiel, synchrone ou asynchrone. Dans l'étude de Chen et al. (2019) les revues de modèles 3D en mode colocalisées diminuent au fur et à mesure de l'avancement d'un projet. Ici, l'objectif est d'élucider les exigences en termes de fonctions et modes de collaboration pour un environnement qui supporte les revues MBSE. La question (Figure 9) porte donc uniquement sur les modes possibles de revues MBSE. Ce qui ressort de l'enquête est la variété de modes utilisés pour ces réunions, lesquels peuvent aussi bien être synchrone qu'asynchrone et colocalisée ou à distance, bien que les modes « synchrones » et « à distance » sont privilégiés.

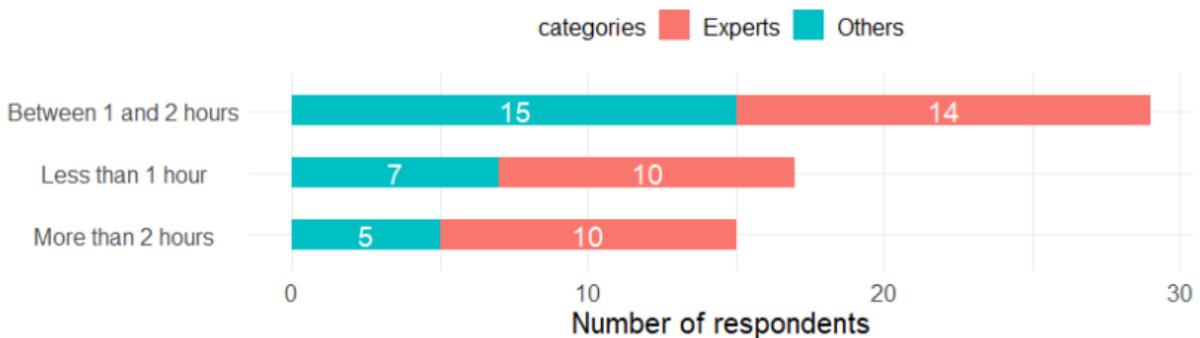


Figure 10 : Réponse à la question : How long are the design reviews you attend?

Un autre aspect important d'une revue est le temps qu'on lui accorde, lequel peut contraindre l'outillage qui la supporte. La Figure 10 montre qu'une majorité (n=46, soit plus de 75%) y passe moins de deux heures, mais aussi plus d'une heure (n=44, soit plus de 72%).

L'objectif de ces revues de conception peut être multiple et dépend bien entendu du moment auquel elle est organisée. Cependant, certaines activités semblent plus pratiquées que d'autres (Figure 11) :

- La validation des exigences (ce qui est en accord avec les 35 personnes qui indiquent que les revues de conception sont organisées pour la spécification des exigences (Figure 8)).
- La compréhension d'une solution de conception d'un système.
- La vérification d'un système (s'assurer qu'il répond correctement aux exigences qui lui ont été spécifiées).
- L'analyse de l'impact d'une modification.

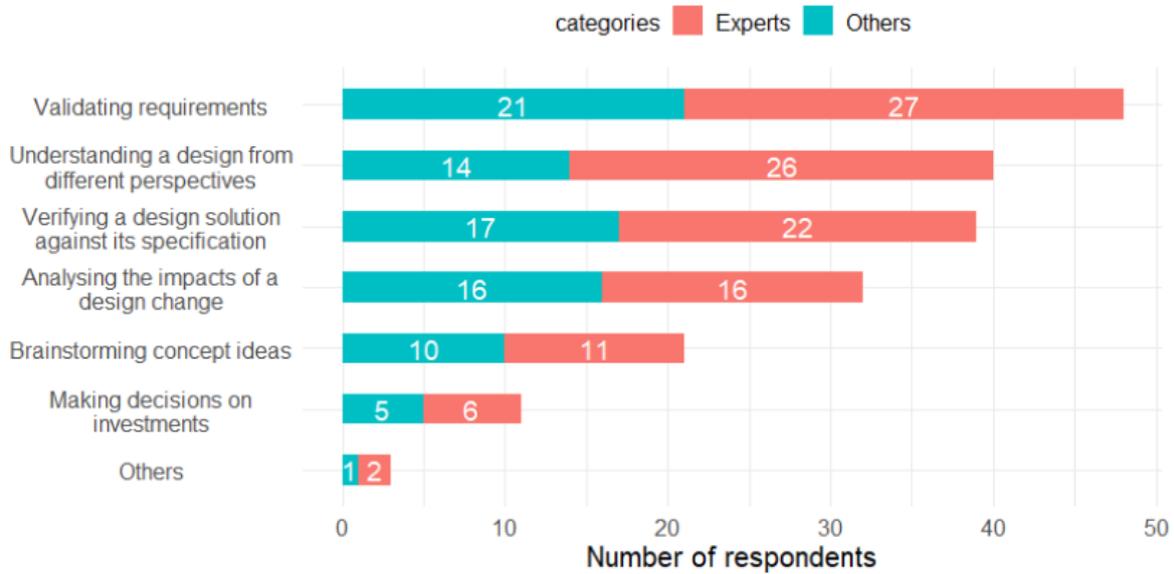


Figure 11 : Réponse à la question : Which goals do you address during MBD reviews?

Enfin, ces revues servent nécessairement à prendre des décisions, ce qui justifie la question de comment ces décisions sont capturées (Figure 12). Le principal moyen est, de loin, le compte rendu suivi de l'annotation textuelle des modèles. Ces deux méthodes proposent finalement un stockage des informations dans des documents plutôt que dans des modèles.

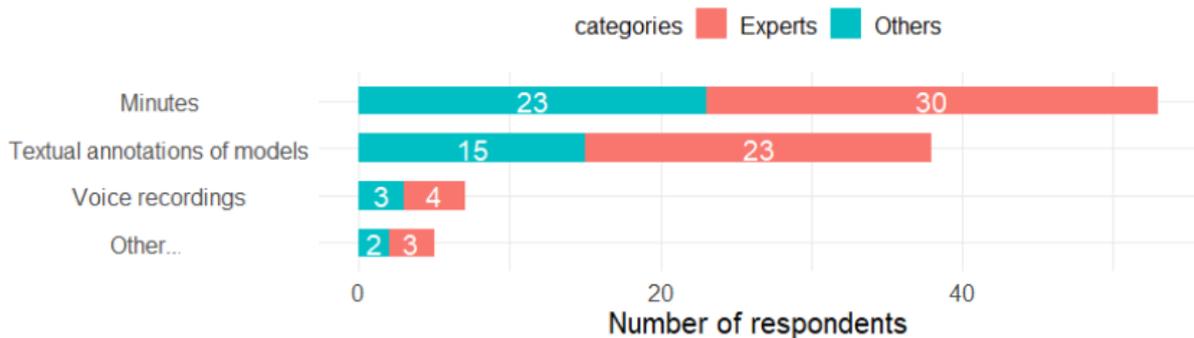


Figure 12 : Réponse à la question : How do you capture decisions during design reviews?

Cette section qui capture quelques pratiques des ingénieurs en revue MBSE montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les habitudes des experts et des non-experts. Nous pouvons résumer ces pratiques en disant qu'une revue MBSE :

- Peut avoir lieu tout au long du processus de conception (Figure 8).
- N'a pas de mode privilégié, et peut être tant synchrone qu'asynchrone, en présentiel qu'en distantiel (Figure 9). Il est toutefois envisageable que dans un futur proche, le distantiel soit de plus en plus privilégié et adapté, comme le suggère par exemple la NASA dans sa vision future du MBSE (Weiland, 2021).
- Dure entre 1 et 2 heures (Figure 10)
- Sert surtout à (Figure 11)
 - la validation des exigences.
 - la compréhension d'une solution de conception.
 - la vérification d'une solution face à ses exigences.
 - l'analyse d'impact d'une modification.

- Permet de prendre des décisions, résumées dans un compte rendu ou par des notes textuelles (Figure 12).

Autrement dit, malgré le changement de paradigme d’une ingénierie système basée sur les documents à une ingénierie système basée sur les modèles, il semblerait que les modèles en revue de conception soient rapidement détournés vers des pratiques héritées de l’approche centrée sur les documents, et ce, sans raison évidente. Les habitudes difficilement remises en question et des outils (langages, représentations, logiciels) MBSE peu adaptés aux activités de communication interdisciplinaires semblent néanmoins être deux facteurs influençant.

Quels modèles utilisent-ils, et comment ?

Après l’identification des profils et du contexte dans lequel les revues MBSE sont organisées, l’analyse vise à recenser les buts et les enjeux.

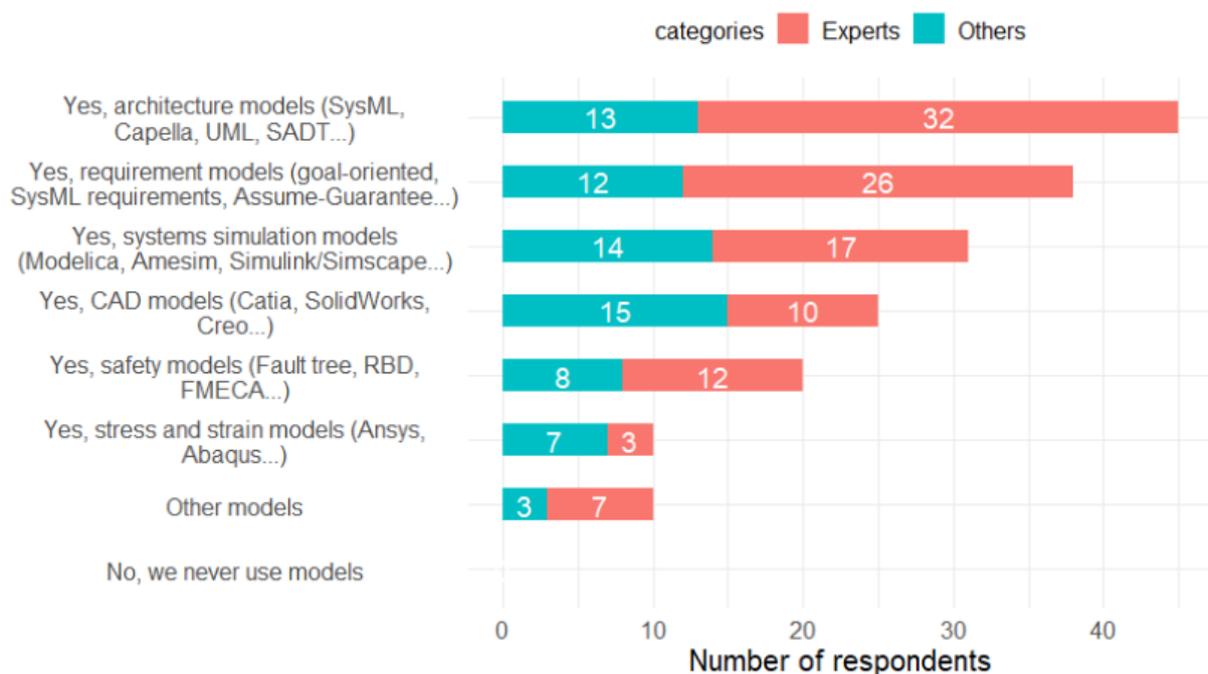


Figure 13 : Réponse à la question : Do you use models in your design activity?

Cette première question (Figure 13), sert à s’assurer que les répondants sont bien des utilisateurs de modèles dans leurs activités. Nous remarquons également que les modèles de conception détaillée (modèles de comportement, modèle de géométrie 3D) sont utilisés par autant d’experts que de non-experts en MBSE, tandis que les modèles d’architectures et d’exigences, eux, sont surtout utilisés par une communauté d’initiés à la conception basée sur les modèles. Enfin, si d’autres modèles sont utilisés, tels que ceux de sûreté de fonctionnement, calculs de structures par éléments finis, ou encore d’analyse de cycle de vie, de Material Flow Analysis (MFA), pour citer ceux qui ont été mentionnés dans le choix « Autres », ils le sont plus rarement, certains n’ayant été cités qu’une fois.

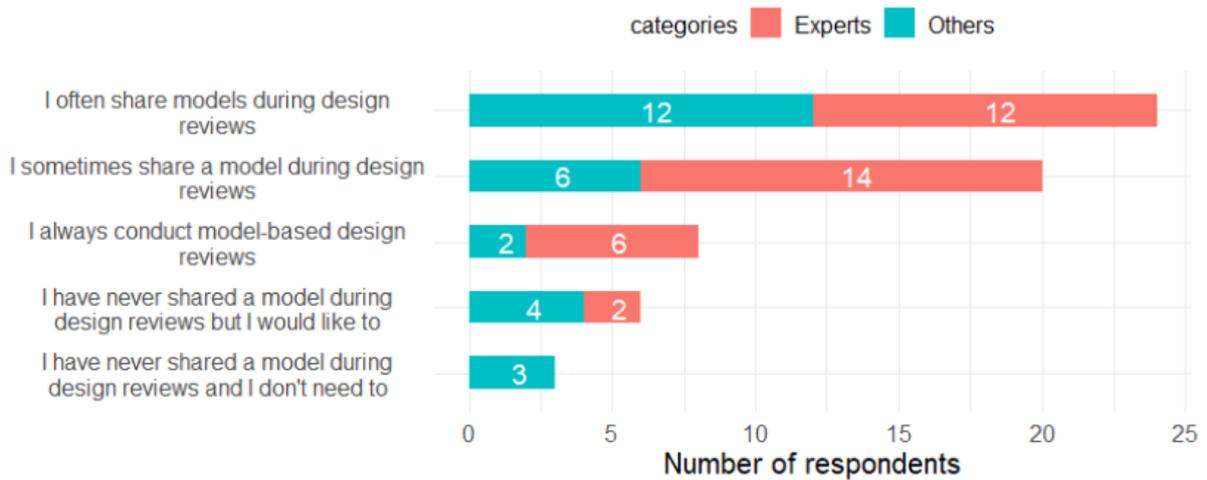


Figure 14 : Réponse à la question : Do you (use) share models during MBD reviews?

Si l'ensemble des répondants utilisent des modèles dans leurs activités, seuls 10% (n=8) d'entre eux les partagent de façon systématique avec les autres acteurs d'une revue de conception (Figure 14). Toutefois, 50% (n=32) en partagent fréquemment et si l'on étend la sélection à ceux qui le font à minima de temps en temps, ce chiffre atteint 82% (n=52).

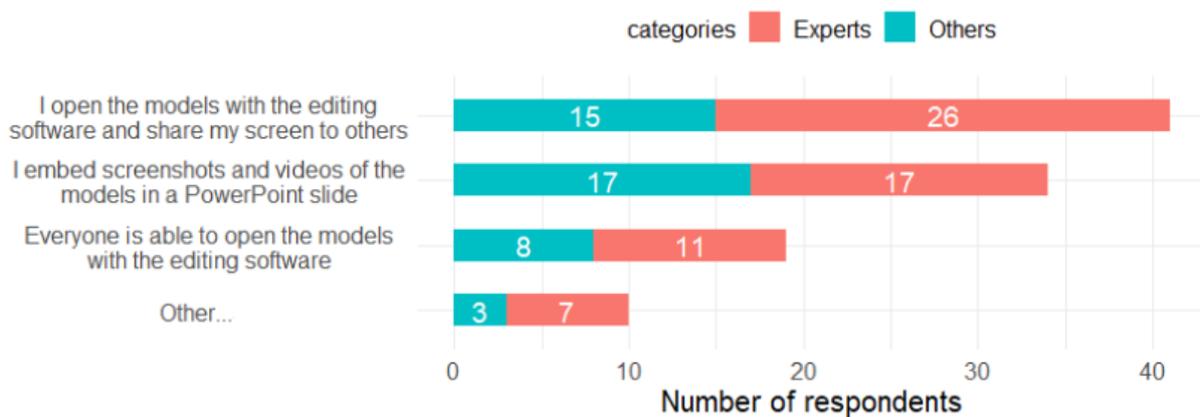


Figure 15 : Réponse à la question : How do you share models during MBD reviews?

Comme cela est ressorti de la littérature (section 2.1.2), les experts, maîtrisant le langage et le logiciel de modélisation, partagent plus facilement les modèles en les affichant directement dans le logiciel natif. Pour des revues plus adaptées à un public mixant des experts et non-experts, la solution privilégiée est la présentation PowerPoint avec des captures des modèles issues des logiciels natifs (Figure 15).

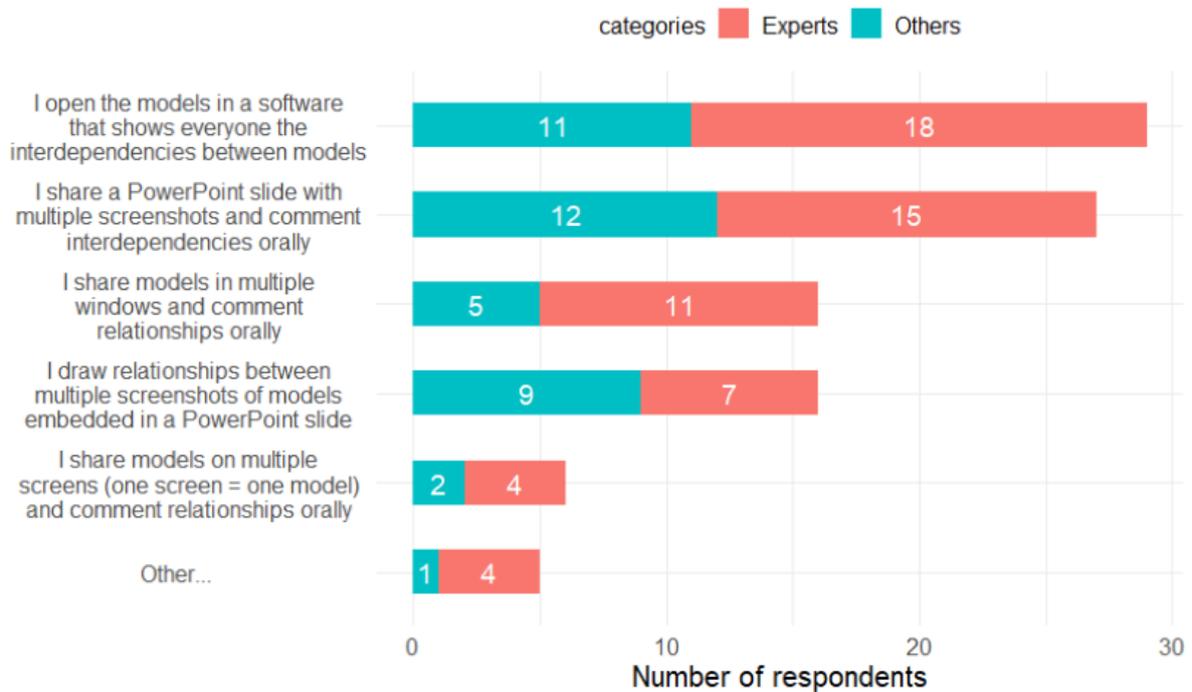


Figure 16 : Réponse à la question : How do deal with interdependencies among models during MBD reviews?

Pour étudier l'impact d'une modification, ou encore pour s'assurer de la cohérence entre les modèles ou tout simplement pour comprendre un système dans son ensemble, il est important de comprendre les liens entre les modèles édités dans des langages et logiciels de modélisation distincts. Lorsque nous posons la question du partage de ces liens en revue de conception (Figure 16), les répondants prétendent majoritairement utiliser des logiciels qui permettent de visualiser directement ces liens. Ce résultat est plutôt inattendu, car il existe au mieux des logiciels de gestion de cycle de vie qui montrent des liens entre des documents dans une base de données. Les quelques solutions comme Open Services for Lifecycle Collaboration (OSLC²²) pour créer des liens entre des données contenues dans les modèles sont encore très confidentielles. N'ayant pas anticipé ce résultat, nous n'avons pas demandé aux répondants de préciser le logiciel en particulier, ce qui ne nous permet pas de lever le doute sur cette réponse. De façon plus prévisible, la deuxième méthode de partage des liens sont des discussions orales autour de captures d'écran préparées, ou encore, surtout pour des échanges entre experts, des partages d'écran du logiciel natif.

Après avoir fait le tour des pratiques actuelles, la dernière question de ce sondage cherche à identifier les difficultés, si elles existent, que les répondants rencontrent lors du partage des modèles en revues de conception (Figure 17). Tout d'abord, seuls 22% (n=13) des répondants affirment ne jamais rencontrer de problèmes. Ensuite, en plus des difficultés déjà identifiées dans le chapitre 1 (liens implicites, grand nombre de modèles, informations perdues dans des captures d'écran, langages spécifiques), certains complètent cette liste : problèmes de sémantique dans les langages métiers, large audience avec une compréhension des modèles très variée, rejet de l'utilisation de modèles par certaines parties prenantes, ou encore le niveau d'abstraction de certains modèles.

²² <https://open-services.net/> - Consultée le 07/10/2022

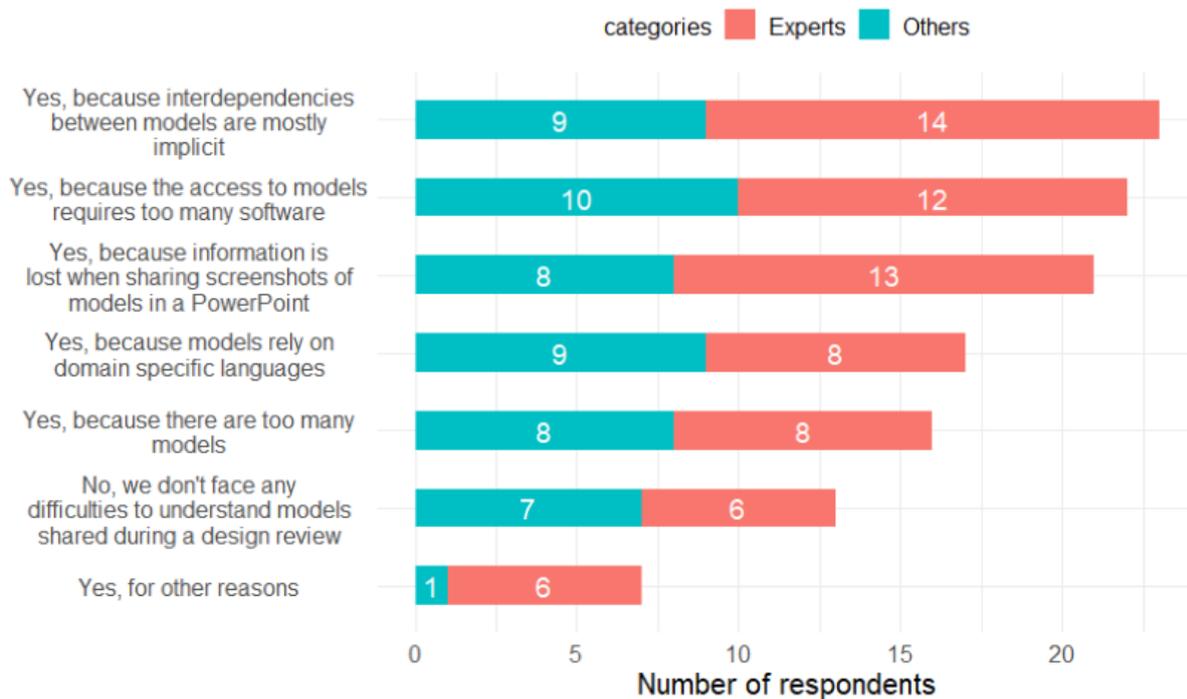


Figure 17 : Réponse à la question : Do you face difficulties with models shared during MBD reviews?

Ce qu'il faut en retenir

Les réponses aux questions posées dans ce sondage permettent de mieux comprendre ce qu'est une revue MBSE mais aussi de soulever plusieurs limites aux pratiques actuelles. D'abord, les modèles eux-mêmes sont à la source de deux difficultés. Premièrement, leur communication via le partage d'écran ou dans une présentation type PowerPoint engendre la perte d'informations contenues dans les logiciels natifs. Deuxièmement, plusieurs répondants ont soulevé la difficulté à comprendre les modèles de par leur langage spécifique notamment. Le problème vient également des liens implicites entre les modèles qui matérialisent des vues différentes sur le système en cours de développement.

2.3 DE NOUVELLES REVUES DE CONCEPTION

Pour faire face aux problèmes que posent les revues de conception telles qu'elles sont réalisées aujourd'hui, de nouveaux concepts et technologies sont apparus. A l'instar de la visualisation analytique apparue dans le début des années 2000 (Thomas & Cook, 2006), et de la science de l'analyse de grands jeux de données, ces outils se classent dans deux catégories :

- Les outils se concentrant sur les données elles-mêmes. L'objectif est alors d'organiser les données de façon à les rendre plus exploitables, de faire des requêtes précises pour ne faire afficher que des informations pertinentes, etc. Ces outils entrent dans la partie « Analytics ».
- Les outils se concentrant sur la visualisation, en faisant afficher les informations de façon plus intuitive, plus complète, etc. pour que leur exploitation soit facilitée. Ces outils entrent dans la partie « Visual ».

2.3.1 Les sciences des données au service de l'ingénierie système basée sur les modèles

Les sciences des données peuvent être appliquées à plusieurs activités de conception, comme la gestion des « digital thread » et l'analyse des impacts de modifications.

Gestion de Digital Thread

La conception de systèmes de plus en plus complexes, même avec l'utilisation de modèles, engendre la production d'un très grand nombre de données. Les « Digital Thread » sont des « fils numériques » qui tracent les données et leurs interdépendances tout au long du cycle de vie d'un système (T. Hedberg et al., 2016; T. D. Hedberg Jr. et al., 2019). De nombreuses études essayent de proposer des applications de gestions des fils numériques (Bajaj et al., 2017; Bajaj & Hedberg, 2018). Les auteurs présentent leur prototype logiciel, le « System Lifecycle Handler », un environnement dont le but est de regrouper les données de conception provenant de différents métiers, de faire le lien entre ces données, et de les exploiter avec de simples requêtes sur la base de données.

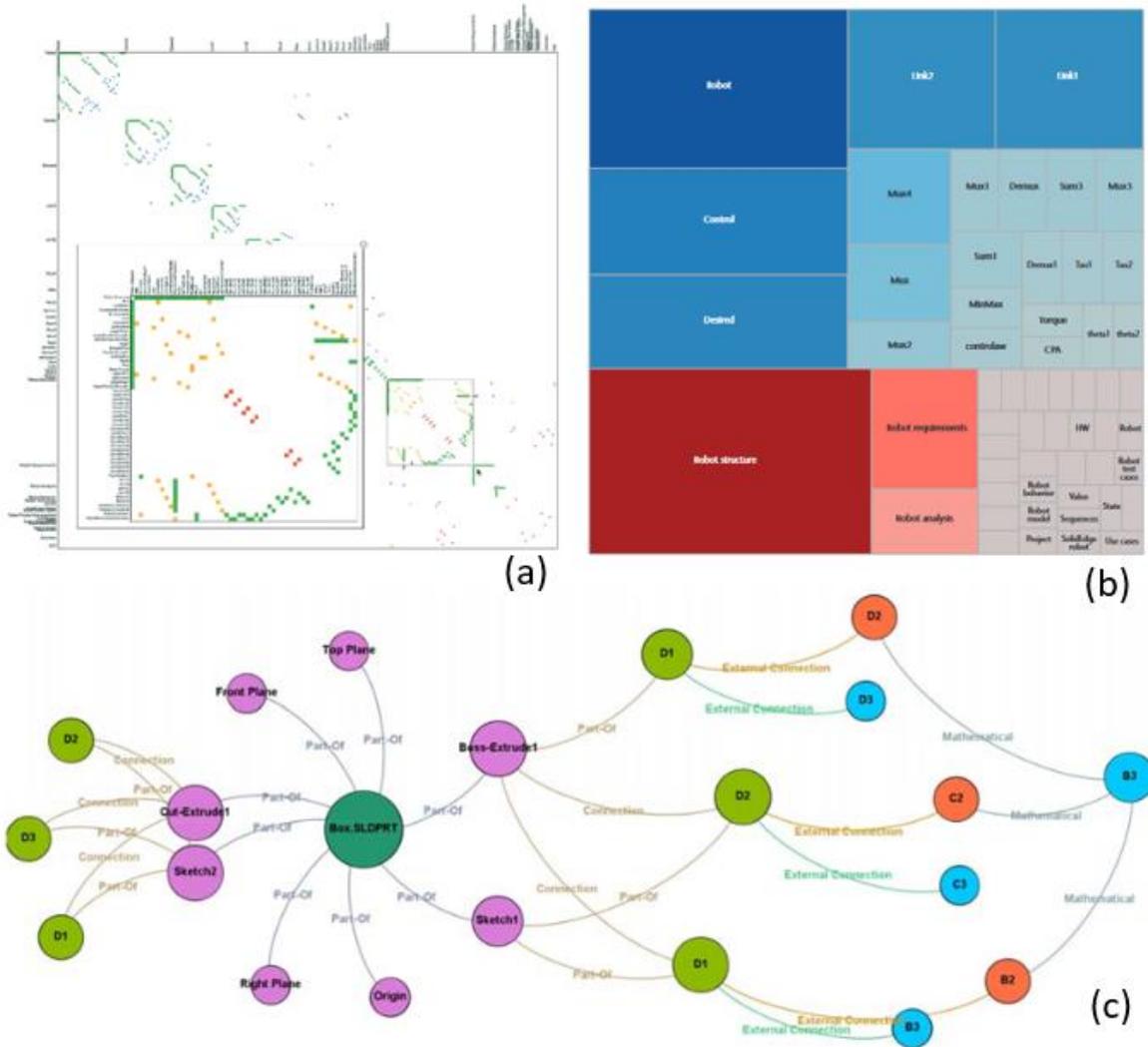


Figure 18 : Affichage des données de conception et de leurs liens sous forme de matrice (a), de carte à case (b) extraits de Basole et al. (2015) ou de graphe (c), extrait de Johansson et al. (2018).

Cette problématique n'est pas si récente, et depuis que nous représentons les éléments d'une conception sous la forme de modèles, la question de leur synchronisation et de leur partage dans le but de collaborer se pose. Par exemple, en 2008 déjà, Noël et al. (2008) proposent un environnement pour stocker et comparer des données provenant d'un modèle CAO et d'un modèle FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur). Encore plus ancien, Noël et Brissaud, en 2003, proposent déjà un moyen de collecter et stocker les données relatives à la conception, uniquement centré sur le modèle CAO cette fois-ci (Noel & Brissaud, 2003). Plus tard, Vu-Thi et al. (2011) réutilisent cet environnement mais

ajoutent une couche avec la possibilité de faire des réunions sur un tableau blanc virtuel et de stocker les données contenues dans ces tableaux.

Du côté de l'ingénierie basée sur les modèles, Rhodes & Ross (2016) introduisent le terme Interactive Model-Centric Systems Engineering (IMCSE). Leur objectif est de proposer, à terme, des moyens de traiter les données produites lors de la conception d'un système avec les techniques de la visualisation analytique. Basole et al. (2015) proposent par exemple de stocker les données produites dans des bases de données qu'ils visualisent ensuite sous différentes formes, que ce soit dans des graphes, des matrices en couleurs ou encore sous la forme de carte à cases (Figure 18, a et b). C'est également pour exploiter les capacités des bases de données orientées graphe que Johansson et al. (2018) proposent de stocker les données produites lors de la conception de modèles CAO dans de telles bases de données (Figure 18, c). Ils expliquent qu'il devient alors possible d'appliquer des algorithmes permettant de filtrer et donc retrouver et exploiter les données pertinentes, bien qu'ils soient conscients que cela représente un changement trop important pour que de telles méthodes soient appliquées directement dans l'industrie.

Analyses de l'impact de modification

Comprendre les impacts d'une modification est également l'une des activités menées en revue de conception. Les causes de ces modifications peuvent être multiples (Brahma & Wynn, 2021) : changement dans les besoins d'un client, problèmes rencontrés avec les conceptions antérieures, émergence de nouvelles technologies, problèmes rencontrés lors d'un test, violations d'exigences ou de compatibilité spatiale, etc. (Brahma & Wynn, 2021). Il est néanmoins impossible de complètement empêcher les causes de ces changements, et il est alors important de maîtriser leurs impacts (Eckert et al., 2004). Dans ce dernier article, les auteurs identifient des sources de difficultés de gestion (des représentations différentes, un manque de communication, entre autres) et donnent des préconisations, telles qu'une communication adaptée pour que chaque partie prenante comprenne le système conçu, ou encore une identification claire des modifications, et de leurs impacts, via une définition précise des liens entre les différentes parties d'un système conçu.

Pour comprendre comment se propage une modification, l'analyse d'une Design Structure Matrix (DSM), laquelle stocke les dépendances entre les composants, permet d'identifier les éléments fortement couplés dont la modification aurait de nombreux impacts (Hassannezhad et al., 2021; Sarica & Luo, 2019). Il est également possible de visualiser cette propagation avec ces mêmes matrices DSM (Brahma & Wynn, 2021; Sarica & Luo, 2019; Wynn et al., 2014). Certains essaient de visualiser ces données et surtout leurs liens avec des graphes (Keller et al., 2005). Même si les auteurs n'arrivent pas à démontrer qu'une de leurs solutions est mieux que les autres, ils concluent que l'utilisation de méthodes plus intuitives de visualisation est plus pertinente et permet de mieux comprendre les impacts d'une modification que l'utilisation d'une matrice DSM. Quelle que soit la méthode, il est nécessaire pour la mettre en place d'avoir une base de données qui stocke le lien entre les éléments de la conception, ce que propose les digital threads.

2.3.2 Les logiciels de simulation au service de la vérification

D'après l'enquête présentée en section 2.2, l'une des activités les plus pratiquées en revue de conception est celle de vérification d'une solution face à ses exigences. Comme vu dans la section précédente, la base de ces activités est une spécification vérifiable objectivement, des exigences formellement falsifiables dénuées d'ambiguïté. Micouin (2008) propose le concept de Property-Based Requirement (PBR), une façon de formaliser les exigences en les décrivant par des opérations mathématiques, lesquelles permettent une validation et vérification rationnelle qui se démarque des approches subjectives (relecture par des pairs, argumentation informelle en réunion, etc.). Il propose

ensuite d'articuler tous ces fondamentaux dans la Property Model Methodology, PMM (Micouin, 2014). Cette méthode propose de co-simuler un modèle de conception et un modèle de spécification, qui regroupe les exigences fonctionnelles. L'activité de vérification du processus de PMM propose de co-simuler un modèle de spécification qui supervise un modèle de conception, tous deux stimulés par un modèle de scénario opérationnel (Figure 19).

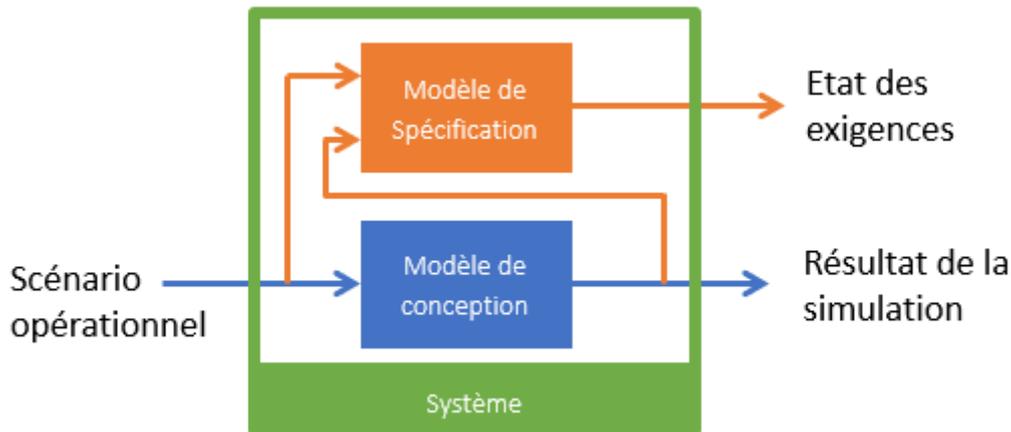


Figure 19 : Co-Simulation d'un modèle de conception et d'un modèle de spécification (Micouin, 2014)

Un prérequis à la vérification est la construction et la validation d'un modèle de spécification. Un modèle de conception peut alors être vérifié. Ce dernier est une simulation dynamique discrète, continue ou hybride, par les outils informatiques du comportement du système. Le modèle de spécification permet alors de s'assurer que ce comportement respecte en effet les exigences fonctionnelles. Cette méthode a été mise en place avec succès dans plusieurs langages de simulation, que ce soit avec MATLAB Simulink (Micouin et al., 2018), Modelica (Pinquié et al., 2016) ou VHDL (Micouin, 2013).

2.3.3 L'utilisation d'outils immersifs

Si l'utilisation des sciences de données est l'une des solutions pour améliorer les revues de conception, ce n'est pas la seule. Pour refaire le parallèle avec la visualisation analytique, l'autre possibilité pour étudier des données, ici relatives à la conception d'un système, est de les visualiser. Aujourd'hui, visualiser les modèles se résume le plus souvent à passer en revue des slides du type PowerPoint dans le cadre de revues de conception. Lorsque la revue concerne des experts qui se concentrent sur un unique modèle, les logiciels métiers peuvent être au centre de la revue. Dans ces deux cas, le partage des informations et de la connaissance se fait au moyen d'un support 2D, via un partage d'écran par exemple.

Comme évoqué en section 2.1.2, cette façon de visualiser les données engendre des pertes d'informations et des difficultés de compréhension qui dégradent la qualité de la collaboration entre les différentes parties prenantes. Ainsi, des publications proposent l'utilisation de nouveaux outils de visualisation immersive pour voir et interagir avec les modèles, ou les données de façon plus générale, et ce, que ce soit pour des domaines divers, pour des réunions, ou des revues de CAO.

Des exemples d'utilisation de technologies immersives dans de nombreux domaines

L'ingénierie n'est pas le seul domaine de recherche pour lequel l'utilisation de la réalité virtuelle est étudiée. De manière générale, elle est envisagée pour supporter les activités qui nécessitent d'explorer de grands jeux de données, car elle présente l'avantage d'une visualisation possédant une dimension supplémentaire que l'écran d'un ordinateur (McIntire & Liggett, 2014; Ware & Mitchell, 2008). Elle améliore également la représentation spatiale (McIntire & Liggett, 2014; Satter & Butler, 2015), ce qui peut avoir des avantages dans les applications centrées utilisateur. Ainsi, des études tendent à montrer que l'utilisation de technologies immersives facilite la fouille de données dans des domaines très variés, tels que la géographie (Bennett et al., 2014) le médical (Mirhosseini et al., 2014), la météorologie (Helbig et al., 2014) ou l'ergonomie (Michalos et al., 2018). Enfin, la littérature sur la visualisation de graphes en réalité virtuelle est très fournie, et les publications tendent à montrer que les technologies immersives permettent, là aussi, une meilleure compréhension de la structure (Drogemuller et al., 2020; Heidrich et al., 2021). Ce dernier point est particulièrement intéressant, car les graphes sont des objets qui permettent de stocker des données très diverses, et notamment des données d'ingénierie (Bajaj et al., 2017), en explicitant également leurs liens.

Depuis les années 2000, la recherche s'est également intéressée à la visualisation immersive d'une architecture logicielle en imaginant de nouvelles métaphores de visualisation pour les diagrammes UML (Teyseyre & Campo, 2009). Parmi les métaphores proposées, nous pouvons trouver des visualisations sous forme de villes (Oberhauser & Lecon, 2017) ou encore d'îles (Schreiber et al., 2019) (Figure 20 à gauche) qui représentent des classes ou des fonctions, des systèmes solaires (Oberhauser & Lecon, 2017) ou des systèmes géocentrique (Averbukh et al., 2019) (Figure 20, à droite), où des planètes représentent les classes et fonctions. Notons que ces deux métaphores prennent en réalité la forme de graphes.

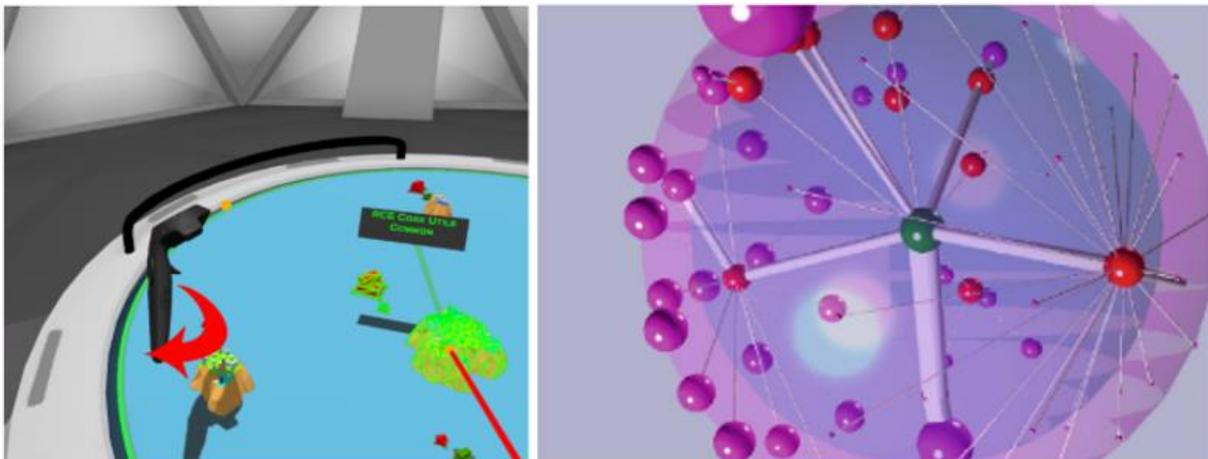


Figure 20 : Visualisation d'architectures logicielles, extraites de Schreiber et al. (2019), à gauche, et de Averbuck et al. (2019) à droite.

Ce domaine s'approche un peu plus des activités d'architecture système, pour lesquelles les modèles sont souvent des digrammes SysML, un profil du langage UML. Toujours pour de la visualisation de diagrammes, Oberhauser et al. (2018) proposent également la visualisation immersive de diagrammes Business Process Model and Notation (BPMN), en reprenant les métaphores 2D transposées en 3 dimensions (Figure 21).

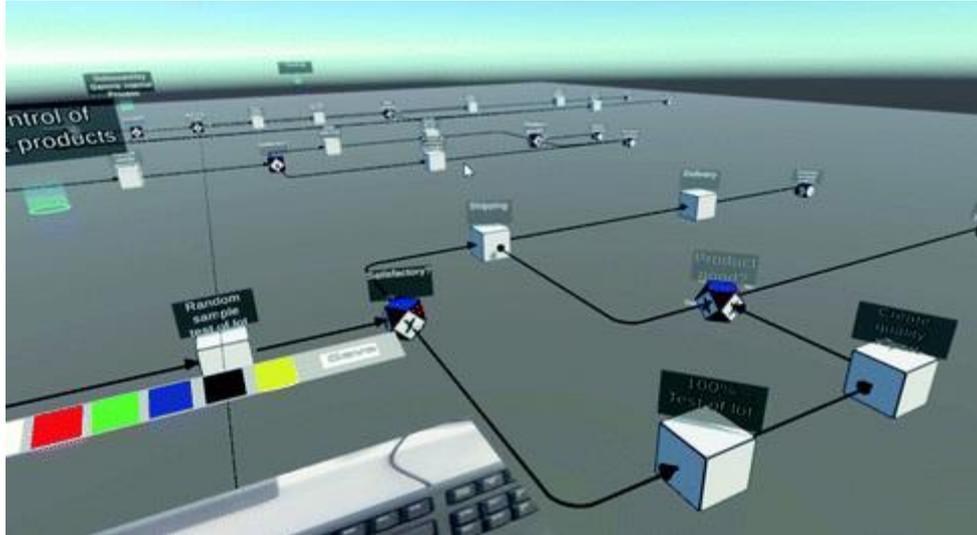


Figure 21 : Visualisation d'un processus de qualité dans l'environnement VR-BPMN de Oberhauser et al. (2018)

Des revues de conception immersives

Si les technologies immersives ne sont pas encore appliquées aux revues MBSE, elles sont en revanche largement utilisées pour les revues de modèles 3D, que ce soit en réalité augmentée (Verlinden et al., 2009), en réalité virtuelle dans un Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) (Aromaa et al., 2012; Martini et al., 2015) ou dans des casques (Adwernat et al., 2020; Freeman et al., 2016; Wolfartsberger, 2019). De manière générale, les applications possèdent des fonctions similaires parmi lesquelles :

- Se déplacer autour du modèle étudié
- Réaliser des captures d'écran
- Déplacer les modèles CAO
- Annoter en 3D

La plupart des publications se limitent à des démonstrateurs fonctionnels, mais quelques-unes démontrent expérimentalement l'utilité de leur environnement. Ainsi, les technologies immersives pour revues de modèles 3D permettent de :

- Améliorer la perception spatiale (Horvat et al., 2019).
- Augmenter le nombre d'erreurs détectées (Freeman et al., 2016; Satter & Butler, 2015; Wolfartsberger, 2019)
- Améliorer la communication entre les parties prenantes (Wolfartsberger, 2019)
- Diminuer le temps nécessaire pour détecter les erreurs (Freeman et al., 2016)
- Augmenter la confiance des utilisateurs dans leur choix (Freeman et al., 2016)
- Faciliter la navigation dans le modèle (Satter & Butler, 2015)

Enfin, il faut noter que l'utilisation de ces outils immersifs est vue comme un élément clef du bureau d'étude, notamment pour les activités de MBSE comme l'imaginent la NASA (Weiland, 2021) et l'INCOSE (INCOSE, 2021) dans leur vision à long terme.

2.3.4 Les technologies pour des revues immersives

Si la section précédente résume l'état de l'art académique de ce qui se fait en termes de revue de conception, il serait dommage de s'y limiter. En effet, de nombreuses solutions commerciales ont vu le jour ces dernières décennies, voire ces dernières années. On peut distinguer deux grandes catégories : celles pour des revues de CAO, et celles pour des réunions en réalité virtuelle.

Réunions immersives

Des applications logicielles permettent aujourd'hui de travailler en collaboration dans des environnements virtuels. De manière générale, les fonctionnalités qu'ils proposent sont les mêmes à quelques différences près.

IMMERSED²³ : Application sur Oculus, qui permet d'avoir un poste de travail en VR. En connectant son ordinateur et son clavier à l'application il est possible de travailler dans un environnement virtuel. Aucune métaphore particulière, l'application permet d'avoir un plus grand nombre d'écrans virtuels. Elle est également dotée d'un mode collaboratif qui permet de réaliser des réunions où l'interaction repose sur un partage d'écran.

MEETINVR²⁴ : Application pour des réunions collaboratives en réalité virtuelle, disponible pour une large gamme de casques. Elle permet d'installer une dizaine de participants dans des salles virtuelles diverses. Des outils de prise de note et de partage sont proposés (partage de modèles 3D, partage d'images, prise de notes en 3D, notes sur des post-it, etc.). Il existe aussi une salle « conférence » dans laquelle un intervenant peut parler jusqu'à 30 personnes. Elle permet un partage d'une présentation PowerPoint ou encore PDF. A noter quand même, MeetinVR propose aussi une solution réalité mixte via les caméras du casque de réalité virtuelle Varjo²⁵ qui permettent de filmer l'environnement réel dans lequel évolue le casque afin de le faire visualiser par l'utilisateur.

IGLOO VISION²⁶ : Il faut noter que les deux premières applications, lesquelles sont représentatives de ce que l'on peut aujourd'hui trouver sur le marché, ne proposent que des solutions en réalité virtuelle et éventuellement mixte. Ce sont des solutions grand public car elles ne s'adressent pas nécessairement à un public de professionnel, mais également à des particuliers plus susceptibles de s'acheter un casque de réalité virtuelle qu'un mur d'écran. Igloo Vision est une solution différente, car elle propose de remplacer l'intégralité des murs d'une salle de réunion par des écrans. Ainsi, il devient possible d'afficher des informations partout autour de la salle, en passant les écrans en mode stéréoscopique, pour s'immerger dans des environnements virtuels à la façon d'un CAVE. Un spectateur extérieur peut également rejoindre la réunion à distance via un casque de réalité virtuelle. A l'inverse des deux premières applications présentées, celle-ci vise un public professionnel.

Cette liste de logiciels est un bref aperçu des applications développées ces dernières années pour réaliser des revues immersives par les nombreux acteurs du marchés (Workrooms²⁷, Glue²⁸, Spatial²⁹, Mozilla Hubs³⁰, Bigscreen³¹, Engage³², etc.). Cependant, des fonctionnalités récurrentes se dégagent.

- Connexion à un ordinateur et partage d'écrans
- Discussions orales en temps réel
- Avatars représentant les participants
- Tableau blanc virtuel
- Réunions mixtes (participants en VR et d'autres pas)

²³ <https://immersed.com/> - Consultée le 30/03/2022

²⁴ <https://www.meetinvr.com/> - Consultée le 15/06/2021

²⁵ <https://varjo.com/> - Consultée le 11/04/2022

²⁶ <https://www.igloovision.com/> - Consultée le 11/04/2022

²⁷ <https://www.oculus.com/workrooms> - Consultée le 30/03/2022

²⁸ <https://glue.work/> - Consultée le 30/03/2022

²⁹ <https://spatial.io/> - Consultée le 30/03/2022

³⁰ <https://hubs.mozilla.com/> - Consultée le 01/04/2022

³¹ <https://www.bigscreenvr.com/> - Consultée le 01/04/2022

³² <https://engagevr.io/> - Consultée le 01/04/2022

- Personnalisation des salles de réunion
- Prise de notes (souvent sous la forme de post-it, parfois en 3D)
- Note vocale
- Enregistrement 3D (enregistrement d'une séquence ayant lieu dans l'environnement pour la réafficher à posteriori à d'autres personnes par exemple)

Revue de CAO

Comme vu dans la section 2.3.3, les technologies immersives permettent d'améliorer les revues de conception. Les éditeurs de logiciels proposent alors leurs propres solutions pour ces activités. Le plus souvent, ce sont les logiciels de CAO qui proposent des services pour permettre la visualisation des modèles en réalité virtuelle, comme SolidWorks et son extension eDrawings³³, la 3D Expérience de Dassault Système³⁴ ou encore PTC CREO³⁵ qui propose également de les visualiser en réalité augmentée.

Dans le domaine de l'ingénierie, SkyReal³⁶ propose également un environnement pour la revue de CAO, en allant même un peu plus loin. En effet, l'application permet d'animer des modèles, d'éditer des géométries 3D sauvegardées dans la CAO par la suite, et de préparer des opérations de maintenance ou d'assemblage/désassemblage avec l'aide de mannequins virtuels pour évaluer les risques de troubles musculosquelettiques.

2.3.5 Des limites encore importantes

Comme le synthétise la section 2.1.2, si l'ingénierie basée sur les modèles apporte a priori des avantages dans le développement et la gestion de systèmes, il reste encore des verrous importants notamment en ce qui concerne la collaboration entre les différentes parties prenantes. Ces limites se répercutent alors sur l'ensemble des activités du processus, comme lors des revues de conception, où le manque de compréhension entre les acteurs engendre des difficultés lors de la prise de décision. C'est pourquoi des solutions, basées sur les sciences des données ou les technologies de visualisation, fleurissent dans la littérature mais aussi sur le marché. Toutefois, même si des expérimentations semblent démontrer la pertinence de ces techniques et outils, ces solutions, elles aussi, restent limitées car elles se restreignent à des revues d'une seule vue, en grande majorité les modèles de géométrie 3D.

2.4 SYNTHÈSE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

Pour résumer, depuis plusieurs années, un changement de paradigme de conception s'opère, en passant d'une ingénierie basée sur des documents à une ingénierie basée sur des modèles. Dans ce nouveau contexte de conception, l'ensemble des données conçues le sont sous la forme de modèles qui sont plus faciles à maintenir, comprendre, réutiliser, ou échanger (INCOSE et al., 2015, sec. 9.2.1).

Si la représentation des données sous la forme de modèles présente des avantages, ce changement de paradigme implique également des adaptations pour les activités qui jalonnent le processus. Cette thèse s'intéresse en particulier aux revues MBSE. Plusieurs types de revues de conception existent,

³³ <https://www.javelin-tech.com/3d/fr/edrawings-professional/> - Consultée le 05/07/2022

³⁴ <https://www.3ds.com/> - Consultée le 05/07/2022

³⁵ <https://www.ptc.com/en/technologies/augmented-reality> - Consultée le 05/07/2022

³⁶ <https://sky-real.com/fr/> - Consultée le 06/07/2022

chacune avec ses objectifs : comprendre la définition d'un système, valider un livrable, prendre des décisions, etc.

Les modèles sont produits dans des langages très différents et dans des environnements de modélisation spécifiques qui ne proposent que des vues partielles de spécialistes. Il n'existe pas de vue holistique de la définition d'un système dans un environnement unique. Ces pratiques engendrent plusieurs difficultés. Il est par exemple difficile pour les non-initiés de comprendre les modèles des autres acteurs de la conception, diminuant alors l'efficacité, la précision de la validation et la prise de décision. Il est également difficile de comprendre les liens entre les différents modèles.

C'est pourquoi de nombreuses études cherchent à améliorer l'efficacité de ces revues de conception, et ce par trois moyens :

- Grâce aux sciences des données qui permettent de stocker, trier, réutiliser les données de conception. On en trouve divers exemples dans l'étude de l'impact d'une modification (Brahma & Wynn, 2021).
- Grâce à de nouveaux outils de visualisation, et en particulier des outils de visualisation immersive. Des recherches montrent l'apport de ces outils de visualisation pour les revues de modèles 3D (Wolfartsberger, 2019), et de plus en plus d'application pour réaliser des réunions immersives apparaissent sur le marché³⁶.
- Grâce à l'apport des logiciels de simulation qui supportent les activités de validation et de vérification au plus tôt, avec à la co-simulation d'un modèle de comportement et d'un modèle de spécification (Micouin, 2014) qui remplacent les argumentations subjectives lors de réunion ou de revues de documents.

Toutefois, quel que soit le moyen, ces études restent isolées :

- soit elles ne se concentrent pas spécialement sur les revues MBSE (par exemple pour les applications de réunion immersive, ou encore pour l'impact de modification),
- soit elles se concentrent que sur une seule vue correspondant au modèle CAO,
- soit elles se concentrent sur les moyens de simulation en délaissant la visualisation avancée nécessaire à bon niveau de réalisme.

2.4.1 Questions et Hypothèses de recherche

Les différentes publications passées en revue dans ce chapitre encouragent à faire l'hypothèse que l'utilisation de modèles dans la conception de systèmes ne va faire qu'augmenter dans les prochaines années et que les problématiques liées à leur utilisation dans certaines activités, en particulier pour les revues de conception, vont s'intensifier. De plus, la littérature semble montrer que les technologies de visualisation immersive et interactive apportent des avantages dans la compréhension et l'appréhension des données. Enfin, l'enquête présentée en section 2.2, qui complète la littérature sur les pratiques en revues MBSE, poussent à se poser deux questions de recherches distinctes, qui se concentrent chacune sur des objectifs de revues de conception différents :

L'UTILISATION DE TECHNOLOGIES DE VISUALISATION IMMERSIVE ET INTERACTIVE PERMET-ELLE DE FACILITER LA COMPREHENSION DE LA DEFINITION D'UN SYSTEME EN COURS DE CONCEPTION ET LE MAINTIEN DE LA COHERENCES ENTRE LES VUES MODELISEES ?

Et

**L'AUGMENTATION DU REALISME DES TESTS DE VERIFICATION DE SYSTEME
PERMET-ELLE D'AMELIORER L'EFFICACITE DE LA VERIFICATION ?**

Ce découpage entre ces questions de recherche est explicité dans le chapitre 3, puis le chapitre 4 propose un environnement virtuel immersif pour répondre à la première question, et le chapitre 5 propose un processus de vérification assisté par ordinateur, visant à répondre à la deuxième question.

Nous pouvons résumer les hypothèses de réponse de la façon suivante :

HYPOTHESE 1 : Visualiser et interagir avec une base de données contenant l'ensemble des modèles, dans un environnement multivue, permet d'en améliorer la compréhension.

Et

HYPOTHESE 2 : Dans le cadre de la vérification centrée utilisateur au plus tôt de systèmes, l'utilisation d'outils de visualisation immersive et interactive permet d'améliorer la qualité des tests et de jouer de meilleurs scénarios d'utilisation.

2.4.2 Positionnement de notre recherche dans la littérature

Si plusieurs groupes de travaux, la NASA ou l'INCOSE par exemple, expriment le sentiment que l'utilisation d'outils immersifs représente une tendance pour le futur de l'ingénierie système (INCOSE, 2021; Weiland, 2021), il n'existe pas encore de démonstration de leur utilité réelle et les recherches sur le sujet sont très rares.

Ainsi, au-delà d'apporter des réponses aux questions de recherche, ce travail pionnier en ingénierie système basée sur les modèles servira avant tout à :

1. confirmer ou non l'intérêt de la réalité virtuelle pour les revues, en particulier pour, d'une part, faciliter la compréhension de la définition multivue d'un système en cours de conception et, d'autre part, la vérification au plus tôt dans un continuum virtuel-réel,
2. spécifier et développer un prototype fonctionnel dont les conclusions issues des expérimentations serviront de base pour spécifier les environnements virtuels futurs en MBSE.

2.5 VALIDATION DE NOS TRAVAUX

Dans la suite de ce manuscrit, nous proposerons deux environnements pour les revues MBSE. La validation des deux propositions s'appuiera sur la méthode du carré de validation (Lewis et al., 2006).

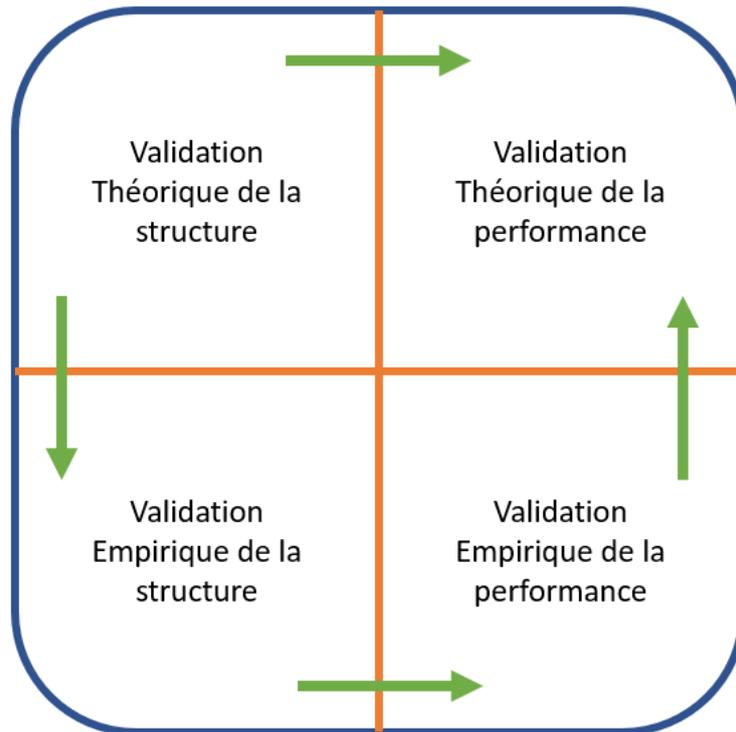


Figure 22 : "Validation Square" de Lewis et al. (2006)

Cette méthode de validation de nouvelles propositions pour l'ingénierie (Figure 22), propose de procéder en quatre étapes, qui structureront la suite de ce manuscrit :

1. VALIDATION THEORIQUE DE LA STRUCTURE

Dans un premier temps, il faudra montrer pourquoi les deux propositions sont fondées sur des connaissances antérieures approuvées par la communauté et que les éléments constitutifs des propositions sont théoriquement cohérents. La justification se basera sur la littérature de ce chapitre, mais aussi sur une décomposition logique des différents buts d'une revue de conception. Pour cela, nous distinguerons deux cas : les revues de conception dont le but est de faire une revue des modèles dans leur ensemble, donc les comprendre et les partager, et les revues de conception dont l'objectif est de vérifier au plus tôt que la conception satisfait aux exigences. Le chapitre 3 sert à valider cette étape.

2. VALIDATION EMPIRIQUE DE LA STRUCTURE

Une fois que les deux propositions seront théoriquement valides, il sera nécessaire de définir des problèmes à résoudre représentatifs des situations visées dans l'industrie et sur lesquels les deux propositions seront éprouvées lors de la validation empirique de la performance. L'exercice consiste donc à définir deux problèmes servant d'éprouvettes (sections 4.3 et 5.3).

3. VALIDATION EMPIRIQUE DE LA PERFORMANCE

Dans un troisième temps, il faudra démontrer que la mise en œuvre des deux propositions sur les problèmes éprouvettes est utile vis-à-vis des deux buts de revue de conception et que cette utilité est bien la conséquence des deux propositions. Pour cela, nous proposerons deux démonstrateurs fonctionnels – pour les revues MBSE au chapitre 4 et pour la vérification au chapitre 5 – pour montrer la possibilité d'implémenter les deux propositions. Les deux démonstrateurs seront mis en œuvre sur des cas d'application pour démontrer qu'ils sont utiles pour les deux buts visés. Enfin, une

expérimentation – avec mise en œuvre de la proposition et d’une proposition rivale – devra permettre de montrer que l’utilité vis-à-vis du but visé est bien la conséquence de la mise œuvre de la proposition.

4. VALIDATION THEORIQUE DE LA PERFORMANCE

La validation empirique de la performance se limite à une démonstration sur les problèmes éprouvettes. Pour garantir la généralité de l’utilité des deux propositions pour les deux buts visés au-delà des deux cas particuliers, la validation théorique de la performance reposera sur une induction :

1. La validation théorique de la structure démontre que les éléments constitutifs des deux propositions sont généralement acceptés et que ceux-ci sont logiquement articulés,
2. La validation empirique de la structure et de la performance démontre que la mise en œuvre des deux propositions sur les deux problèmes éprouvettes est utile vis-à-vis des deux buts de revue de conception et que cette utilité est bien la conséquence des deux propositions.

A partir de cette induction, il sera alors possible de revendiquer la généralité des deux propositions au-delà des deux problèmes éprouvettes via l’approbation des évidences circonstanciées apportées pour justifier l’utilité des deux propositions vis-à-vis des deux buts de revue de conception visés.

Pour finir, nous expliciterons dans un dernier chapitre les apports de cette thèse, en faisant une synthèse des résultats de nos travaux ainsi qu’un retour sur nos contributions vis-à-vis de la littérature actuelle.

CHAPITRE 3. SPECIFICATION D'UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF INTERACTIF ET COLLABORATIF POUR LES REVUES DE CONCEPTION BASEES SUR DES MODELES

Les deux chapitres précédents montrent que l'utilisation de modèles semble plus appropriée pour stocker les informations de conception d'un système plutôt que des documents. Cependant, leur introduction génère de nouvelles difficultés pour certaines activités, en particulier les revues de conception. En effet, le plus souvent les modèles sont présentés et évalués par l'ensemble des parties prenantes sous la forme de présentations de type PowerPoint contenant des captures d'écran 2D inertes, ce qui est hors des principes du MBSE.

Pour répondre à ces difficultés, deux approches qui semblent appropriées se dégagent de la littérature. La première est l'exploitation d'outils de visualisation immersive et interactive, qui montrent des avantages pour appréhender des géométries complexes, des comportements, mais aussi pour fouiller ou exploiter des données. La seconde est l'utilisation de logiciels de simulation pour faciliter les activités de vérification, bien que les tests réalisés dans ces logiciels manquent de réalisme en termes de visualisation et d'interaction.

L'objectif de cette thèse est alors de proposer un environnement virtuel immersif pour les activités de revue de conception basée sur les modèles. Dans ce chapitre, cet environnement sera spécifié, en identifiant quelles sont les tâches que doivent réaliser les acteurs d'une telle revue. Dans les deux chapitres suivants, les solutions proposées seront présentées, détaillées et validées.

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Les tâches élémentaires d'une revue de conception..... | 40 |
| 3.1.1 | Comprendre le système conçu et maîtriser la cohérence des modèles | 41 |
| 3.1.2 | Réaliser des tâches de vérification au plus tôt..... | 45 |
| 3.2 | Des besoins et de possibles solutions | 49 |

3.1 LES TACHES ELEMENTAIRES D'UNE REVUE DE CONCEPTION

Le chapitre précédent dresse une liste, non-exhaustive, d'activités réalisées en revue de conception : compréhension du système, analyse d'impact d'une modification, validation et vérification, capture des justifications, etc. Ces activités restent toutefois des buts génériques pour lesquels il est difficile d'apporter une solution. Pour proposer les fonctions dont les acteurs d'une revue de conception ont besoin, il est nécessaire de décomposer ces activités.

Cette décomposition est explicitée ici par la fabrication d'un arbre dit « arbre des tâches » dont une version complète est disponible en dernière page de ce chapitre. La conception de cet arbre provient de la littérature mais également de notre expérience. Il ne faut pas le prendre pour un résultat définitif, il nous sert à faire et à justifier des choix dans la suite de cette recherche.

La Figure 23 détaille la décomposition de cet objectif fondamental – améliorer l'efficacité des revues de conception basées sur les modèles – en sous-objectifs. Il existe, au moins, trois moyens d'améliorer les revues de conception basées sur les modèles. Le premier consiste à faciliter une meilleure

compréhension de la définition multivue d'un système en cours de conception par la compréhension des données capturées dans les modèles. Cet objectif est motivé par la limite principale identifiée par la question 14 de l'enquête présentée dans le chapitre 2. Le deuxième est de maintenir la cohérence des données appartenant à des vues différentes. Enfin, un troisième moyen pour les revues MBSE est d'améliorer le processus de validation et vérification, en facilitant la détection d'erreurs de spécification et de conception au plus tôt.

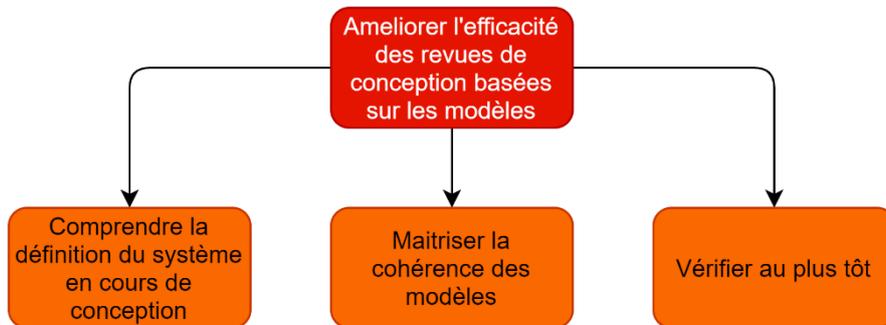


Figure 23 : Décomposition de l'objectif en trois sous-tâches principales

3.1.1 Comprendre le système conçu et maitriser la cohérence des modèles

Les deux premiers objectifs, à savoir « comprendre » et « maitriser la cohérence », sont proches l'un de l'autre, ils font partie d'un même processus Compréhension-Validation-Décisions. En effet, lors de la validation des différents modèles d'un projet, il faut être capable de s'assurer que ceux-ci représentent bien le même système selon des points de vue complémentaires. Ces deux objectifs ont donc des sous-objectifs communs, c'est pourquoi ils seront traités ensemble.

Nous noterons dans la suite :

OBJECTIF 1.1 : Améliorer la compréhension des modèles qui matérialisent la définition multivue d'un système en cours de conception dans une démarche d'ingénierie système basée sur les modèles.

Et :

OBJECTIF 1.2 : Faciliter le maintien en cohérence de la définition multivue d'un système en cours de conception dans une démarche d'ingénierie système basée sur les modèles.

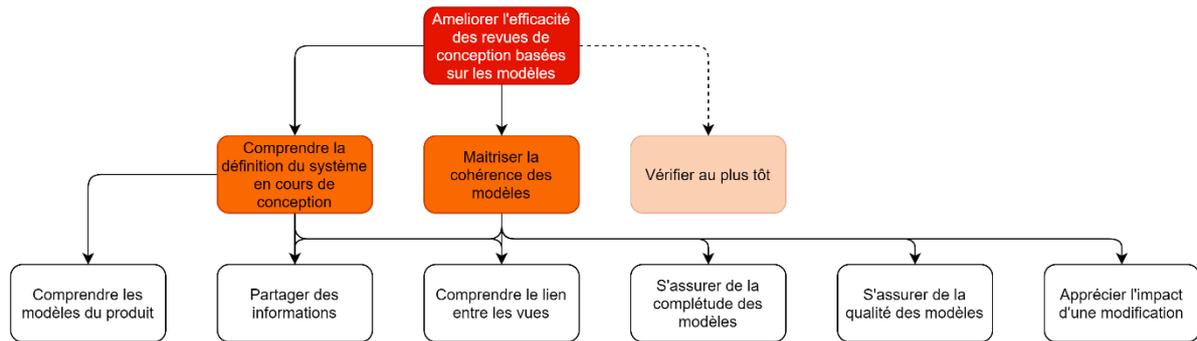


Figure 24 : Détail des objectifs "Comprendre le système" et "Maitriser la cohérence des modèles"

La Figure 24 illustre les sous-tâches de ces deux buts de revue de conception basés sur les modèles.

Nous estimons que deux sous-tâches sont communes à ces deux buts :

- « Partager des informations », d'une part, car c'est nécessaire pour comprendre ce que d'autres acteurs ont conçu et, d'autre part, pour s'assurer que deux modèles décrivent le même système d'un point de vue différent.
- « Comprendre le lien entre les vues », car c'est un moyen d'avoir une vue globale du projet, et donc voir et comprendre le contexte dans lequel s'inscrivent les données contenues dans les modèles. C'est aussi le moyen de s'assurer que ce lien est correct.

Pour la compréhension, il faut ajouter la sous-tâche de comprendre les modèles qui ont été produits pour représenter le système conçu, qui sera détaillée dans le paragraphe suivant.

La maîtrise de la cohérence, elle, nécessite trois autres sous-tâches :

- « S'assurer de la complétude des modèles », c'est-à-dire être certain qu'il ne manque pas d'éléments dans les modèles.
- « S'assurer de la qualité des modèles », c'est-à-dire être certain que les modèles, quelle que soit la vue métier, représentent bien le même système et qu'il n'y a pas de contradiction.
- « Apprécier l'impact d'une modification », qui consiste à propager une ou plusieurs modifications dans un réseau de données afin de mesurer les conséquences qui en découlent.

Comprendre les modèles

Cette section détaille la décomposition de la tâche de compréhension des modèles (Figure 25).

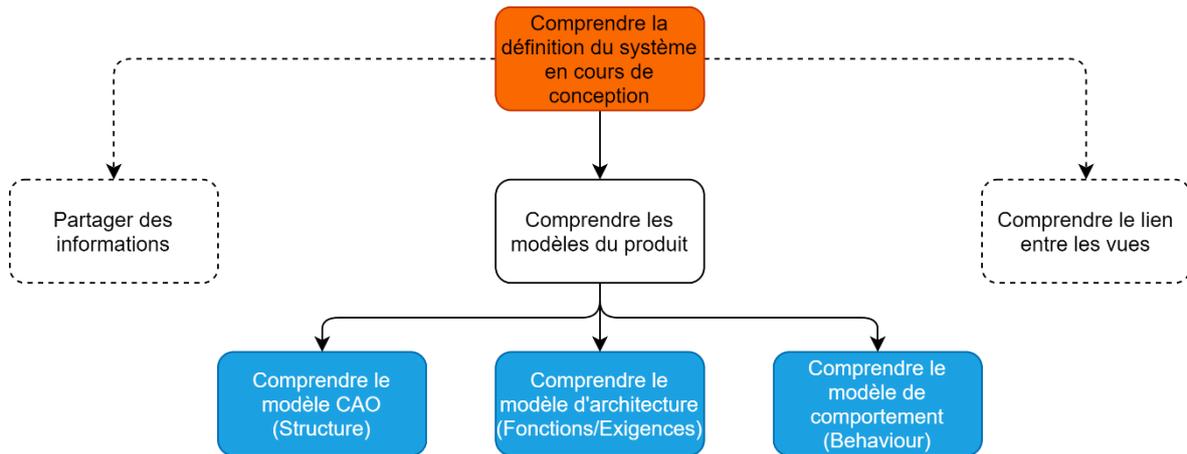


Figure 25 : Décomposition de la tâche "Comprendre les modèles produits"

Cette décomposition se base sur le cadre Fonction, Behaviour, Structure (FBS) théorisé par Gero (1990) et complété quelques années plus tard (Gero & Kannengiesser, 2004), lequel stipule qu'un système est défini par ses fonctions, son comportement et sa structure. Par conséquent, l'étude présentée ici considère que la compréhension d'un système repose sur un ensemble de modèles appartenant à ces trois vues :

- Le modèle d'architecture qui capture les parties prenantes, le besoin, les fonctions et exigences du système.
- Le modèle de géométrie 3D ou modèle CAO qui représente la structure du système.
- Le modèle qui décrit le comportement continu, discret ou hybride du système.

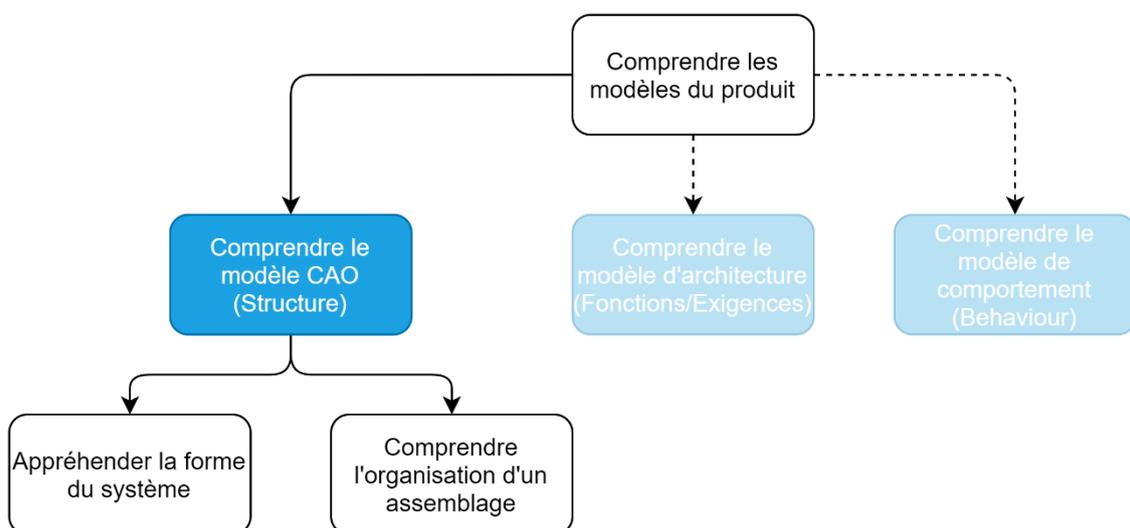


Figure 26 : Décomposition de la tâche "Comprendre le modèle CAO"

Les modèles CAO, par leur représentation iconique, sont très intuitifs et compréhensibles. Ils permettent de visualiser la géométrie du système en cours de conception, et la tâche principale est alors de comprendre comment il est conçu, de quoi il est composé, c'est-à-dire de comprendre les liens de composition (Figure 26).

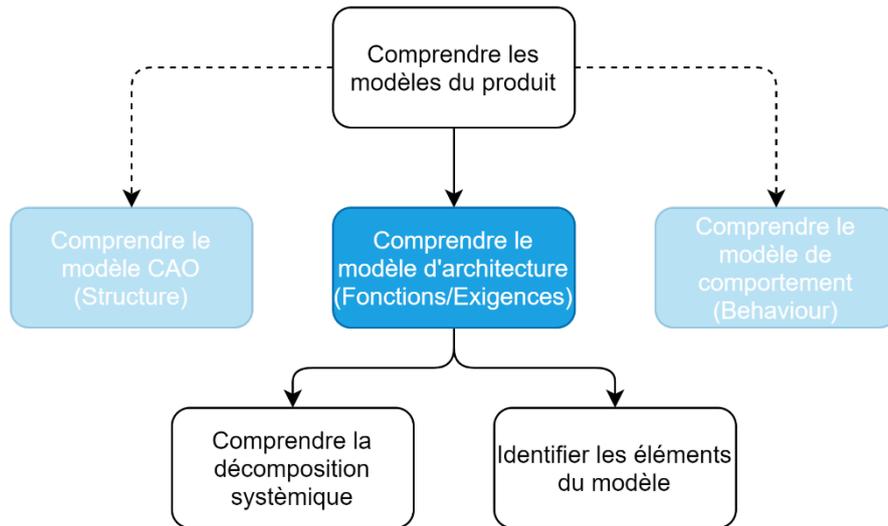


Figure 27 : Détail de la tâche "Comprendre le modèle d'architecture"

Le modèle d'architecture, lui, est moins intuitif car les données sont abstraites et encodées sous une forme symbolique, c'est-à-dire qu'elles sont décrites par des symboles qui ne partagent pas de caractéristiques ce qu'ils représentent (Peirce, 1958). Il décrit différents éléments du système (briques d'architecture, parties prenantes, fonctions, exigences) et il est important, pour comprendre l'architecture du système, de comprendre la façon dont sont liés tous ces éléments ainsi que leur décomposition systémique (Figure 27 gauche). De plus, ce modèle représente l'architecture du système. Il est donc nécessaire de comprendre comment s'organise cette architecture en comprenant la décomposition systémique (Figure 27 droite).

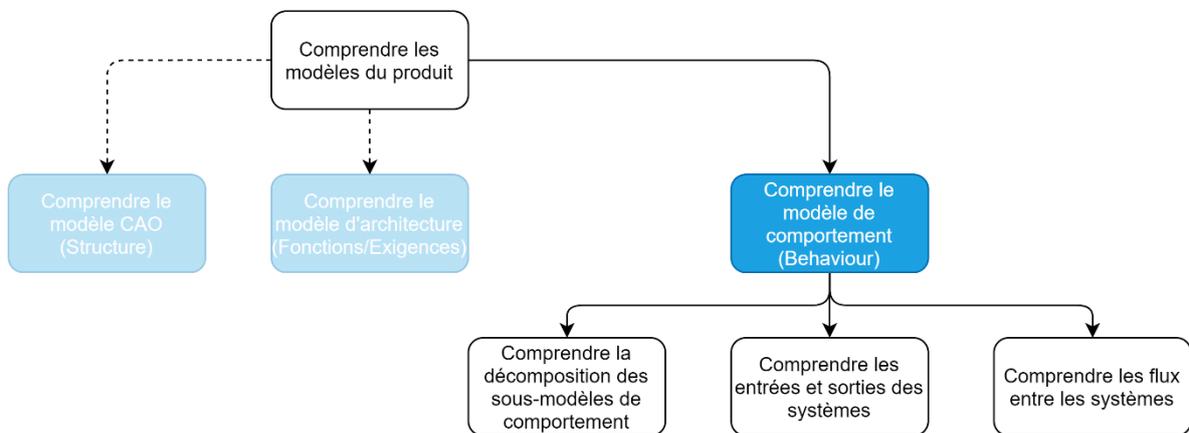


Figure 28 : Détail de la tâche "Comprendre le modèle de comportement"

Enfin, pour le modèle de comportement, il faut comprendre sa composition (sous composants et ports d'interface) et les flux qui transitent entre les éléments constitutifs (Figure 28). Il faudrait également comprendre les hypothèses de modélisation et les équations qui régissent le comportement de chacun des blocs logiques mais ici on s'arrêtera à l'architecture logique, c'est-à-dire à l'architecture qui se traduit par un schéma de blocs (Li et al., 2020).

Maitriser la cohérence

La description des tâches montre que la compréhension et l'identification des liens entre chacun des modèles est primordiale pour la compréhension du système dans son ensemble. De plus, comprendre ces liens permet d'assurer que les modèles qui matérialisent les vues représentent bien le même système. C'est en suivant cette idée que l'arbre en Figure 29 a été construit.

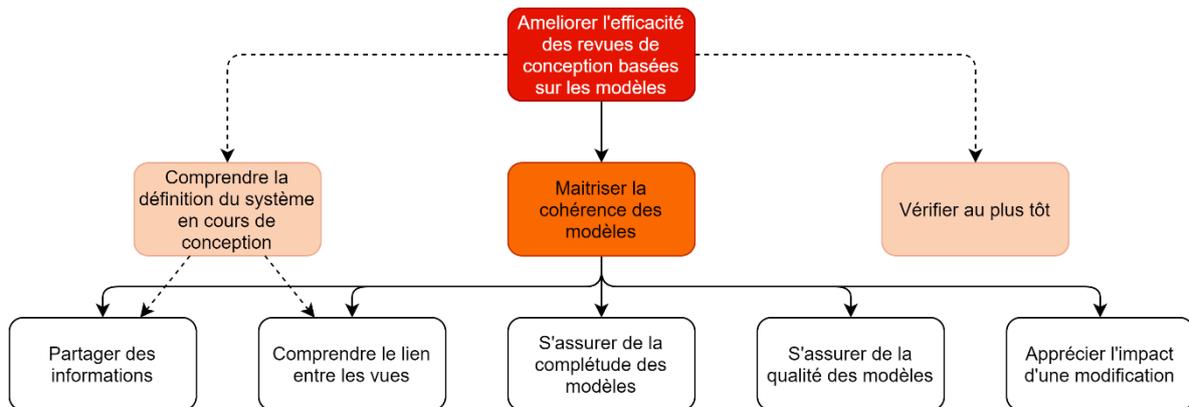


Figure 29 : Détail de la tâche "Maitriser la cohérence des modèles"

En plus des deux sous-tâches que l'objectif « maitriser la cohérence des modèles » partage avec celui de « comprendre la définition du système en cours de conception », trois tâches sont importantes pour s'assurer de la cohérence des modèles.

- S'assurer de la complétude des modèles, c'est-à-dire être certain que chaque élément de chaque modèle a un équivalent dans les modélisations d'autres vues métier. L'objectif est d'être certain que les représentations modélisent bien tous les aspects du système
- S'assurer de la qualité des modèles, c'est-à-dire être certain que les éléments censés être équivalents le sont effectivement.
- Apprécier l'impact d'une modification, c'est-à-dire comprendre comment se propage une modification à travers les différentes vues métiers, et les éléments de chaque modèle amenés à être modifiés.

Pour l'ensemble de ces sous-tâches, il est nécessaire que des liens entre les modèles soient tracés, explicites et exploitables.

Deux sous-objectifs, mais un seul environnement

L'enchaînement des tâches décrites entre la Figure 25 et la Figure 29, ainsi que celles décrites par la Figure 24 montrent le lien fort entre les tâches de compréhension du système en cours de conception et de maîtrise de la cohérence des modèles. C'est pourquoi dans la suite, les **OBJECTIFS 1.1** et **1.2** sont traités conjointement et nous proposons un seul et même environnement pour y répondre.

3.1.2 Réaliser des tâches de vérification au plus tôt

Comme décrit dans la Figure 30, à la compréhension des modèles et leur maintien en cohérence s'ajoute un troisième but de revue de conception : la validation et vérification au plus tôt.

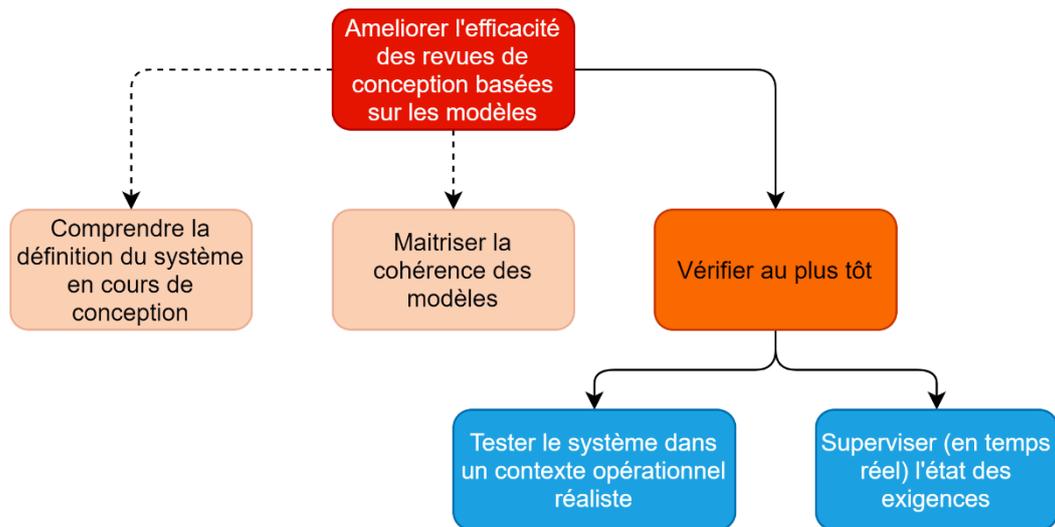


Figure 30 : Détail des tâches pour les revues de conceptions centrées sur la vérification

La vérification peut être définie comme suit :

Vérification : activité permettant de s'assurer que le système satisfait à sa spécification

Il sera noté :

OBJECTIF 2 : Améliorer l'efficacité de la vérification de système complexe pour détecter des défauts de conception au plus tôt.

Le manuel de l'INCOSE de 2015 décrit quatre techniques de vérification (INCOSE et al., 2015, sec. 4.9.2) :

- L'inspection : technique basée sur l'évaluation visuelle d'un système pour vérifier que les dimensions, couleurs, formes, etc. correspondent aux exigences.
- La démonstration : vérifier que le système respecte bien les exigences en l'observant en phase de fonctionnement. Aucune mesure n'est nécessaire pour cette technique.
- Le test : en instrumentant un système (ou un prototype) de capteurs, le test s'assure que les valeurs mesurées lorsque le système est en fonctionnement appartiennent aux domaines de performance spécifiés par les exigences.
- L'analyse : technique utilisant des moyens de calculs, analytiques ou numériques, pour prouver que le système, lorsqu'il sera en fonctionnement réel, respectera les exigences.

Pour les trois premières techniques, il est nécessaire que le système soit fabriqué, ce qui implique des coûts significatifs. La vérification par analyse, elle, permet de diminuer les coûts et de détecter des défauts de spécification et de conception au plus tôt. Néanmoins, pour des systèmes dynamiques, l'usage de la simulation nécessite de :

- Tester le système « en conditions réalistes » (Figure 30, gauche). Il est possible de profiter des avancées technologiques des logiciels de simulation de comportement et de celles des technologies de visualisation et interactions pour réaliser des tests virtuels au plus tôt.
- « Vérifier l'état des exigences en temps réel » (Figure 30, droite). L'objectif est d'être capable, lors des phases de tests virtuels en conditions réalistes, de savoir quelles exigences ont été testées et satisfaites ou non.

L'approche de vérification proposée dans la suite ne s'intéresse qu'aux exigences fonctionnelles du système. Des exigences non fonctionnelles comme des bilans de masses ou de dimensions sont vérifiables par l'approche proposée mais sans valeur ajoutée.

Représenter le système et son contexte opérationnel dans des conditions réalistes

Dans sa définition de la vérification par l'analyse, le manuel de l'INCOSE ajoute (INCOSE et al., 2015, sec. 4.9.2) :

« Principalement utilisée lorsqu'il n'est pas possible de tester dans des conditions réalistes ou lorsque ce n'est pas financièrement rentable. »

Dans le dictionnaire, la définition de réalisme est la suivante :

« Caractère de ce qui est une description objective de la réalité, qui ne masque rien de ses aspects les plus crus. » (Larousse, n.d.).

Aujourd'hui, avec des logiciels de simulation toujours plus performants, et de nouvelles technologies de visualisation et d'interaction, il est possible de vérifier, dans des conditions réalistes mais virtuelles, un système en cours de conception. Pour augmenter le niveau de réalisme d'un environnement virtuel, il est possible de :

- Augmenter le réalisme comportemental : avec les logiciels de simulation qui reproduisent avec fidélité les lois de la physique.
- Augmenter le réalisme dans la visualisation : les outils de visualisation immersive permettent d'apprécier plus précisément le comportement et la structure avec des indices visuels supplémentaires en trois dimensions et une vue à l'échelle 1.
- Augmenter le réalisme dans les interactions : les outils de visualisation immersive et les techniques d'interactions permettent des interactions naturelles avec le système, grâce à une vue à l'échelle et une capture de la position réelle du corps et en particulier des mains.

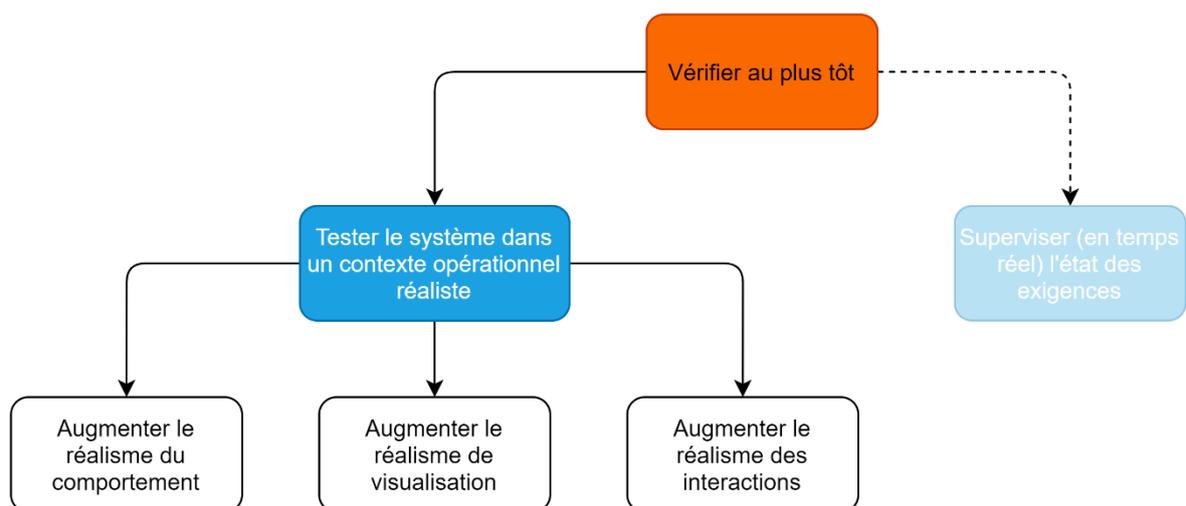


Figure 31 : Détail de la tâche "Tester le système en condition réaliste"

« Réalisme », une définition adaptée ?

Pour le réalisme du comportement, il est aisé d'appliquer la définition du dictionnaire, car c'est l'objectif même des logiciels de simulation que de simuler le comportement du système de façon à ce

qu'il soit fidèle aux lois de la nature qui régissent le comportement réel. C'est de fait l'enjeu de modélisation en ingénierie.

Toutefois, même si nous avons une bonne confiance dans les résultats prédits par ces logiciels, le comportement reste simulé, et donc seulement « réaliste » et pas « réel ». C'est pourquoi certains proposent de remplacer des blocs de simulation par des composants réels, testés ainsi sur banc d'essai. C'est ce qu'on appelle la simulation Hardware-In-the-Loop (HIL), dont Sarhadi propose un état de l'art (2015). Leur littérature montre que cette méthode présente de nombreux avantages, dont notamment ceux d'augmenter la confiance que l'on peut avoir dans une simulation et d'améliorer le processus de vérification. Karpenko (2009) par exemple utilise du HIL pour tester sur banc d'essai les actionneurs d'une aile d'avion, ou encore Martin (2011) qui démontre que l'utilisation du HIL est viable et améliore le réalisme du test.

Pour la visualisation et les interactions, la question est plus compliquée, car le réalisme est difficilement quantifiable. Des recherches essayent de trouver une nouvelle définition de ce que peut être le réalisme pour des environnements virtuels et en particulier pour de la réalité virtuelle. Deux nouveaux termes sont alors définis : l'immersion (Bowman & McMahan, 2007; Pausch et al., 1997; Robinett, 1992) et la présence (Lombard & Ditton, 1997).

Si l'immersion est une donnée qui dépend de la technologie (champ de vision, fréquence de rafraîchissement, vision stéréoscopique, etc.), la présence peut se traduire par le « sentiment d'être là », dans l'environnement. Cette variable dépend fortement de chaque individu, et elle est alors subjective. Des recherches visent alors à trouver un moyen de mesurer ce sentiment, par le biais de « questionnaires de présence », dont la dernière version mise à jour date de 2005 (Witmer et al., 2005). Ces questionnaires sont toutefois controversés et plusieurs recherches montrent leur inefficacité ou inutilité (Graf & Schwind, 2020; Slater, 2004). Pour objectiver l'évaluation du niveau de présence, il est possible de mesurer des variables physiologiques comme le rythme cardiaque ou le taux de transpiration.

Enfin, quelle que soit la définition utilisée, de très nombreuses études tendent à montrer que l'augmentation du niveau de réalisme engendre une amélioration d'une activité centrée sur l'utilisateur (Freeman et al., 2016; Horvat et al., 2019; McIntire & Liggett, 2014; Satter & Butler, 2015; Ware & Mitchell, 2008; Wolfartsberger, 2019) et encouragent à considérer les outils de visualisation immersive, et en particulier la réalité virtuelle, comme une potentielle solution pour améliorer le réalisme de visualisation et le réalisme des interactions.

Superviser l'état des exigences

L'autre objectif pour faciliter la vérification de systèmes est de pouvoir vérifier, en temps réel, l'état des exigences fonctionnelles.

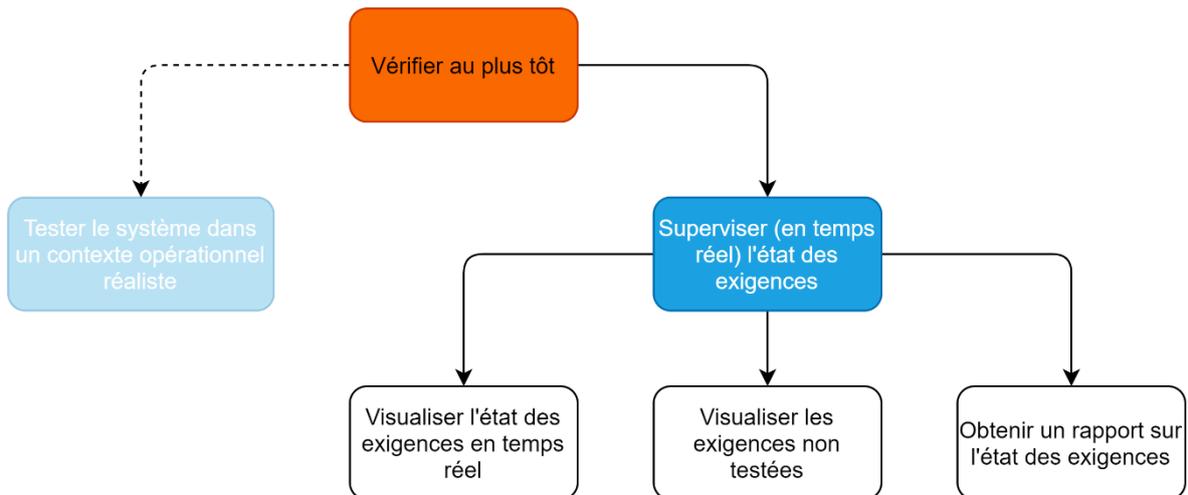


Figure 32 : Détail de l'objectif "Vérifier l'état des exigences"

Si des tests sont réalisés, c'est pour s'assurer que le système satisfait bien à sa spécification lors de son fonctionnement. Il faut donc être capable de connaître, en temps réel, l'état des exigences, pour savoir si elles sont bien satisfaites (Figure 32, gauche). Il est également nécessaire de s'assurer que l'ensemble des exigences couvertes par la spécification ont été testées (Figure 32, centre). Enfin, un rapport avec les exigences non-satisfaites doit être disponible pour orienter le travail des concepteurs à la suite de la revue de conception (Figure 32, droite).

3.2 DES BESOINS ET DE POSSIBLES SOLUTIONS

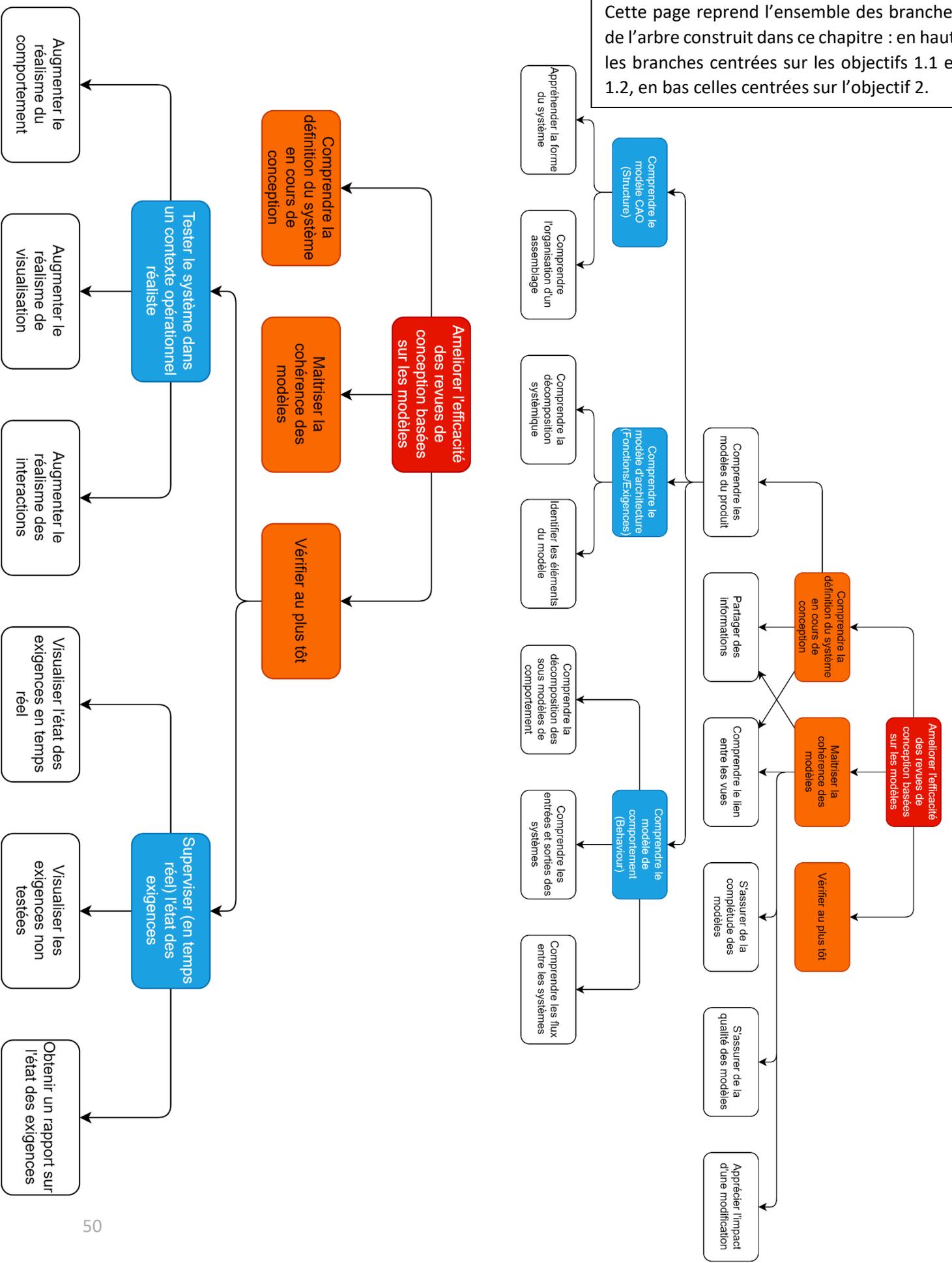
Ce chapitre propose une carte de tâches, discutables et amendables, réalisées en revue de conception centrée sur des modèles. C'est donc une spécification des services attendus par l'utilisateur.

Deux objectifs de revue se dégagent dans l'arbre des tâches et seront traités dans les chapitres suivants : 1) la compréhension et le maintien en cohérence d'une définition multivue d'un système en cours de conception, et 2) la vérification qu'une conception satisfait aux exigences. Dans la suite, ces deux objectifs sont traités séparément, et les travaux demandent alors deux validations différentes. Dans les deux cas, la première étape du carré de validation est franchie dans ce chapitre. En effet, après avoir montré, en s'appuyant sur une revue de la littérature, que les propositions étaient fondées sur des connaissances approuvées par la communauté, la décomposition en tâches proposée ici, montre que les éléments constitutifs de ces propositions sont cohérents.

Le chapitre 4 cherche à répondre aux objectifs 1.1 et 1.2 en proposant un environnement permettant d'améliorer la compréhension et le maintien en cohérence d'une définition multivue d'un système en cours de conception. Cet environnement sera validé par une expérimentation.

Le chapitre 5 s'intéresse à la vérification au plus tôt de systèmes, et un processus de vérification assistée par ordinateur pour lequel le réalisme de la simulation augmente progressivement est proposé.

Cette page reprend l'ensemble des branches de l'arbre construit dans ce chapitre : en haut, les branches centrées sur les objectifs 1.1 et 1.2, en bas celles centrées sur l'objectif 2.



CHAPITRE 4. UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF INTERACTIF ET COLLABORATIF POUR LES REVUES MBSE

Ce chapitre propose un environnement qui répond au besoin exprimé dans les chapitres 2 et 3. Dans un premier temps, une revue de la littérature recense les outils de visualisation immersive et interactive utilisés pour faire des revues de modèles 3D, des réunions, ou encore de la fouille de données. Ensuite, le cas d'étude utilisé pour illustrer les propositions de ce chapitre est introduit, avant de présenter l'environnement développé pour répondre aux différentes tâches énumérées dans le chapitre 3. Enfin, une expérimentation valide l'utilité de cet environnement. L'objectif de ce chapitre est de répondre à la troisième et à la quatrième phase du carré de validation pour ce type de revue de conception, c'est-à-dire de proposer un cas d'étude similaire aux cas rencontrés dans l'industrie, démontrer la faisabilité technique de l'environnement proposé dans le chapitre 3 puis valider son utilité par l'expérimentation.

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Les revues de conception immersives dans la littérature | 52 |
| 4.1.1 | Des réunions immersives | 52 |
| 4.1.2 | Revue immersive d'architectures logicielles | 53 |
| 4.1.3 | Des revues de modèles 3D | 55 |
| 4.2 | Compréhension et Maitrise de la cohérence en revue MBSE..... | 57 |
| 4.2.1 | Architecture de l'environnement..... | 57 |
| 4.2.2 | Scénario d'utilisation de l'environnement | 58 |
| 4.2.3 | Conclusions..... | 60 |
| 4.3 | Proposition d'un cas d'étude sur lequel utiliser notre environnement..... | 60 |
| 4.3.1 | Revue de conception d'un télescope..... | 60 |
| 4.3.2 | Modèle d'architecture..... | 61 |
| 4.3.3 | Modèle CAO..... | 64 |
| 4.3.4 | Modèle de comportement | 64 |
| 4.3.5 | Des modèles interdépendants | 65 |
| 4.4 | Un démonstrateur fonctionnel pour les revues de conception immersives et interactives | 66 |
| 4.4.1 | La base de données | 66 |
| 4.4.2 | Les métaphores visuelles..... | 68 |
| 4.4.3 | Les interactions..... | 70 |
| 4.4.4 | La structure..... | 73 |
| 4.4.5 | Les limites du démonstrateur fonctionnel | 75 |
| 4.5 | Une expérimentation pour évaluer des environnements..... | 75 |
| 4.5.1 | Validation de nouveaux outils | 75 |
| 4.5.2 | Proposition d'un protocole expérimental | 77 |

4.5.3 Réalisation, et analyse des résultats 82
 4.5.4 Discussion 88
 4.6 Synthèse 89

4.1 LES REVUES DE CONCEPTION IMMERSIVES DANS LA LITTÉRATURE

S’il n’existe dans la littérature aucun environnement qui permette de réaliser des revues MBSE, plusieurs solutions proposent des environnements virtuels pour réaliser des activités qui s’en rapprochent. Dans un premier temps, les applications développées, et déjà sur le marché, pour réaliser des réunions virtuelles seront explorées, avant de voir des applications plus concrètes pour explorer les données dans un grand nombre de domaines différents. Enfin, on s’intéresse aux revues de modèles 3D, qui sont les environnements qui ressemblent le plus à ce que nous proposons dans ce chapitre.

4.1.1 Des réunions immersives

Le cas d’application dans lequel le développement de l’utilisation de la réalité virtuelle est le plus avancé est celui des réunions. Aujourd’hui, des applications commerciales proposent une immersion dans une salle virtuelle entourées d’avatars avec la possibilité de communication orale, partage de présentations, éventuellement partage d’écran, parfois partage de modèles 3D comme des maquettes ou des schémas, annotations 3D ou 2D (Figure 33 et Figure 34).



Figure 33 : Illustration du logiciel Immersed

Ces nouvelles applications profitent de l’amélioration de la qualité du rendu, de l’accessibilité des casques de réalité virtuelle et de la généralisation du travail à distance. En effet, aujourd’hui, les casques de réalité sont de moins en moins chers pour une qualité de rendu visuel et d’interaction déjà satisfaisante, comme pour les Quest de Meta qui ont également l’avantage d’être très facilement transportables et utilisables dans n’importe quel milieu. De plus, la généralisation du télétravail, en

partie dû à la crise du COVID, a mis en évidence les limites importantes des réunions en visio-conférence, notamment en ce qui concerne la communication entre les parties prenantes et en particulier au niveau de la communication non-verbale. En environnement immersif, même si les avatars ne reflètent pas parfaitement les expressions des participants, il est tout de même possible de communiquer via des gestes de la tête ou encore des mains par exemple.



Figure 34 : Illustration du logiciel MeetinVR

Les limites

Bien que le passage de réunions en visio-conférence à des réunions en réalité virtuelle permet d'entrevoir une avancée en ce qui concerne la communication entre les participants, les applications telles qu'elles existent aujourd'hui possèdent encore de nombreuses limites. Seule la visualisation est différente, les fonctionnalités restent finalement les mêmes, et le partage des connaissances continue à passer par des présentations inertes en 2D.

Ce que l'on retient

Il faut tout de même retenir que si de telles applications sont développées ce n'est pas un hasard. Bien qu'elles profitent très probablement de l'effet de mode de la réalité virtuelle avec l'apparition de grands acteurs dans le domaine comme Facebook et leur Métavers, ainsi que de la crise du COVID qui nous a fait prendre conscience des limites du travail à distance, « voir » les personnes avec qui on discute rend la communication plus efficace (Yoon et al., 2019). Cet aspect collaboratif ne peut alors pas être négligé lors de revues MBSE.

4.1.2 Revues immersives d'architectures logicielles

Si les réunions en réalité immersive ne répondent pas à une problématique particulière, d'autres applications sont appliquées à un domaine spécifique : médical (Mirhosseini et al., 2014), géographie (Bennett et al., 2014), ou météorologie (Helbig et al., 2014). Pour tous ces exemples, les données visualisées sont très concrètes et représentables par des modèles 3D, ou des métaphores symboliques communément admises (comme des flèches qui représentent le vent par exemple).

Dans d'autres domaines, il est nécessaire de faire appel à une imagination accrue, car les informations à explorer et à exploiter sont abstraites. Il faut alors inventer de nouvelles métaphores pour les représenter. C'est le cas en informatique où la réalité virtuelle sert à explorer les packages, classes et fonctions d'un programme par diverses métaphores. Par exemple, Oberhauser & Lecon (2017) représentent l'architecture du code par une ville, les immeubles étant les classes, plus ou moins hauts en fonction du nombre de fonctions qu'elles contiennent. Les classes sont reliées les unes aux autres et font appel aux fonctions des autres classes. Ici ils représentent ces liens par des traits entre les immeubles.

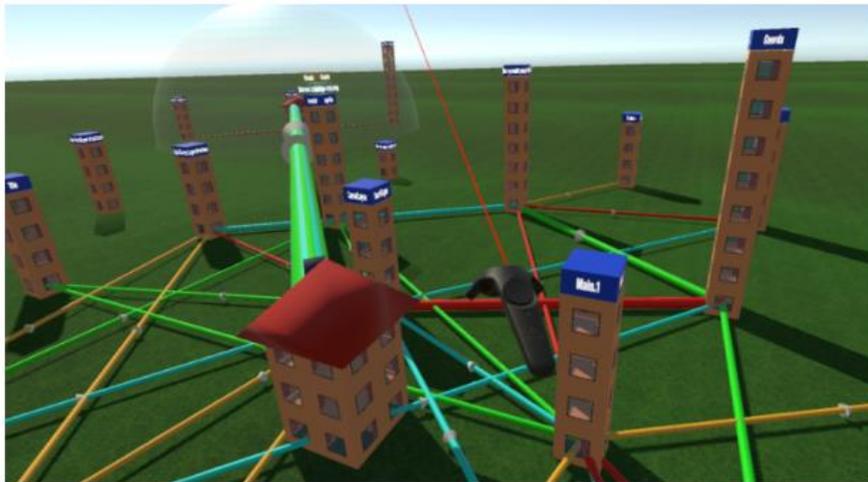


Figure 35 : Extrait de Oberhauser & Lecon (2017)

De façon comparable, Schreiber et al. (2019) proposent de représenter les classes sous la forme d'îles (Figure 36 à gauche), et Averbukh et al. (2019) de nœud dans un graphe (Figure 36 à droite).

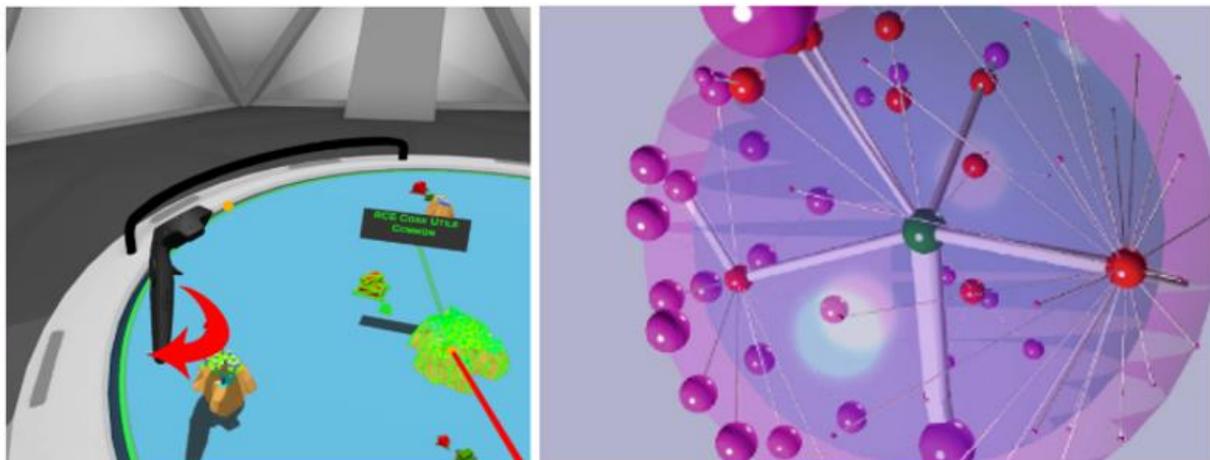


Figure 36 : Extrait de Schreiber et al. (2019) à gauche, de Averbukh et al. (2019) à droite

Les limites

Dans les exemples présentés dans cette section, les données exploitées ne proviennent pas de la conception de systèmes complexes et ne sont pas directement transposables au MBSE, car les données dans ce cas, proviennent de sources différentes, contrairement aux exemples présentés dans cette section.

Ce que l'on retient

En revanche, ils montrent qu'il est possible d'utiliser des outils de visualisation immersive pour des données concrètes, représentables grâce à leur géométrie et topologie, mais aussi abstraites comme dans le cas de la visualisation d'une architecture logicielle. Dans ce cas, les possibilités sont encore infinies et à explorer, car il n'existe ni de métaphore visuelle adoptée par la communauté concernée pour ce type de données ni de méthode pour spécifier, concevoir et tester les métaphores adaptées comme c'est le cas en 2D (Bach & Scapin, 2005). Ces points sont particulièrement intéressants car si certaines données d'ingénierie sont représentables de façon intuitive comme le modèle de géométrie 3D, d'autres sont complètement abstraites, et leur représentation est un sujet de discussion même en 2D (Bayer, 2018), comme les modèles créés pour réaliser l'analyse fonctionnelle d'un système par exemple. Oberhauser et al. (2018) ont d'ailleurs également proposé un environnement similaire pour les revues de processus modélisés avec le langage Business Process Modeling Notation (BPMN), ces travaux se limitant à cette unique vue (Figure 37).

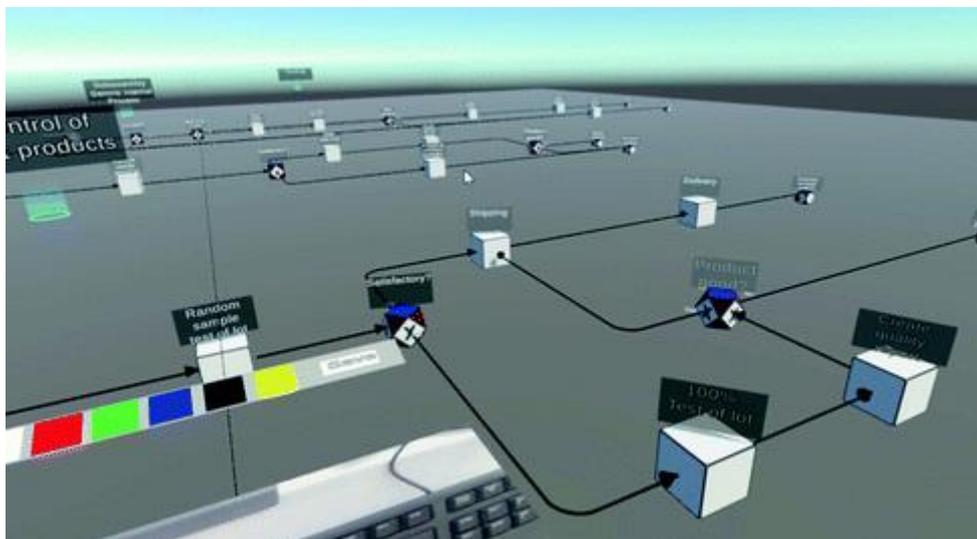


Figure 37 : Vue d'un processus de qualité dans le VR-BPMN de Oberhauser et al. (2018)

4.1.3 Des revues de modèles 3D



Figure 38 : Extrait de de Casenave et Lugo (2018)

Enfin, certains environnements proposés dans la littérature s'approchent plus des revues de conception telles que décrites dans le chapitre 3. Toutefois, ces propositions ne s'intéressent qu'à un

unique modèle, celui de la géométrie 3D ou modèle CAO, pour détecter les erreurs de conception. Des cas d'études divers sont disponibles dans la littérature, comme la revue de boîtes de vitesse (de Casenave et Lugo (2018), Figure 38), des engrenages (Freeman et al. (2016), Figure 39) ou encore des unités de puissances (Wolfartsberger (2019), Figure 40).

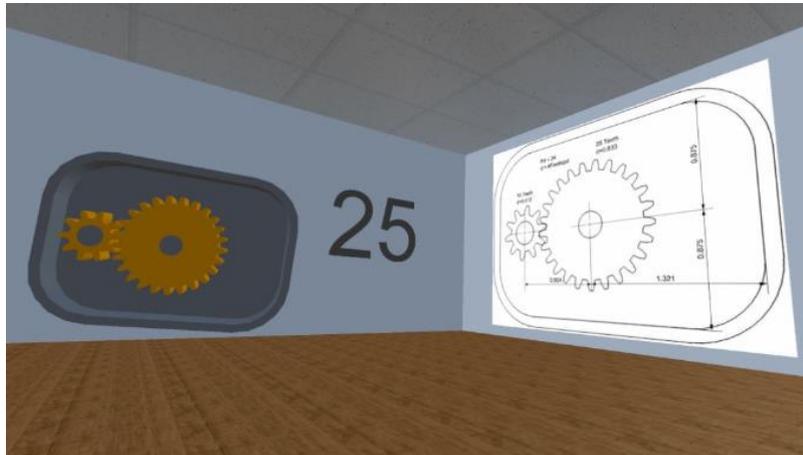


Figure 39 : Extrait de Freeman et al. (2016)

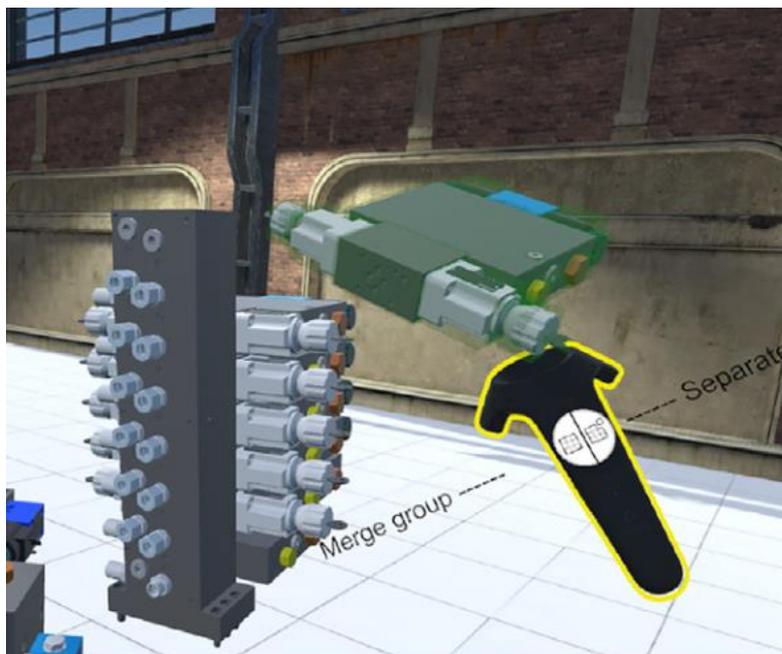


Figure 40 : Extrait de Wolfartsberger (2018)

Les limites

Encore une fois, ces différents exemples sont pertinents dans le sens où les données analysées sont issues d'un processus de conception, mais ils ont le défaut de se baser essentiellement sur la CAO. Or, il en existe bien d'autres, comme celui de comportement, de la spécification, des fonctions, de la sûreté de fonctionnement, etc.

Ce que l'on retient

Toutefois les interactions (attraper des pièces, les faire tourner, redimensionner, désassembler, etc.) peuvent être réutilisées telles quelles dans un autre environnement. Ensuite, certaines applications proposent d'ajouter quelques informations supplémentaires par rapport à ce que nous pourrions

trouver simplement en utilisant les logiciels de CAO, par exemple en les affichant sur les murs comme sur les Figure 38 et Figure 39, mais aussi au-dessus des avatars des mains, ou encore sur des tablettes virtuelles. Enfin, plusieurs études démontrent, via des expérimentations, que l'utilisation de technologies de visualisation et interaction immersives permet d'améliorer la revue de modèle 3D (Freeman et al., 2016; Satter & Butler, 2015; Wolfartsberger, 2019). Un plus grand nombre d'erreurs dans la conception est détecté grâce à ces outils et plus rapidement.

4.2 COMPREHENSION ET MAITRISE DE LA COHERENCE EN REVUE MBSE

A partir de la liste des tâches dressée dans le chapitre 3 et de la littérature, il est possible de proposer une solution pour réaliser les revues MBSE qui réponde aux objectifs 1.1 et 1.2.

4.2.1 Architecture de l'environnement

Nous faisons l'hypothèse que les différentes parties prenantes impliquées dans le projet ne modifient pas leurs habitudes de travail en dehors de cette phase bien spécifique de la conception. Ainsi, la solution doit s'adapter aux pratiques actuelles et non l'inverse. Pour cela :

1. Les acteurs ne modifient pas leurs habitudes et utilisent les logiciels spécialisés qu'ils maîtrisent pour modéliser leur vue métier (1 sur la Figure 41).
2. Il est toujours possible de récupérer l'essentiel des données stockées dans ces modèles sous un format d'échange standardisé (comme le format STEP pour la géométrie 3D par exemple). Les données nécessaires à une revue de conception sont alors toutes stockées dans une base de données commune qui permet de définir des liens entre elles – les digital threads. Le format standardisé permet alors aux parties prenantes de modifier les modèles natifs puis de mettre automatiquement les données à jour dans la base de données (2 sur la Figure 41).
3. Cette base de données est enfin visualisée et explorée par les parties prenantes impliquées dans la revue de conception supervisée par l'ingénieur système. Les modèles ne sont donc pas modifiables directement lors de la revue. En revanche, après une modification dans leurs logiciels natifs, il suffit d'exporter à nouveau leurs données vers la base de données pour que l'affichage soit mis à jour (3 dans la Figure 41).

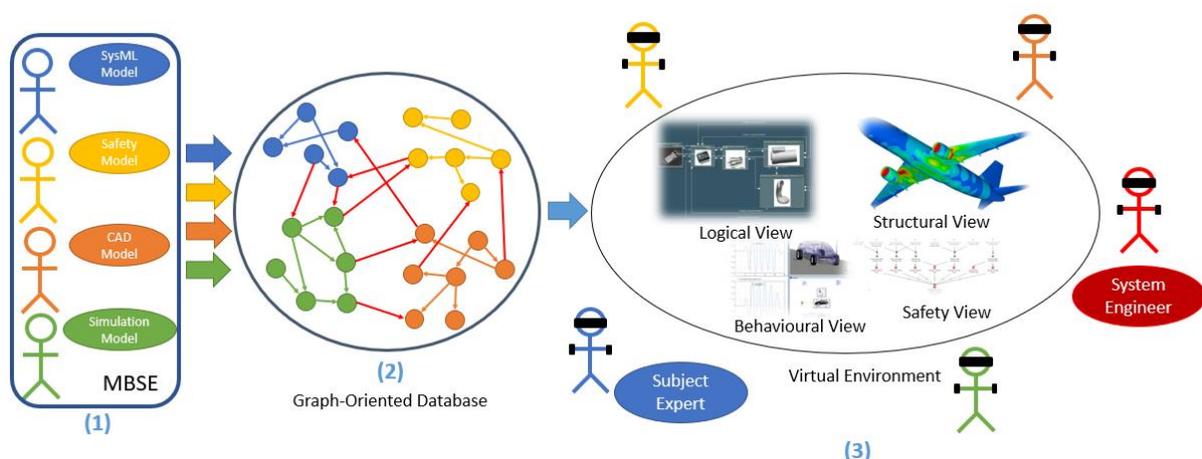


Figure 41 : Principe de l'environnement pour faciliter la compréhension du système et le maintien en cohérence des données de conception

Ces éléments impliquent d'ores et déjà quelques fonctionnalités qui répondent à des tâches énoncées dans la section précédente.

Une application multi-utilisateur

La première fonctionnalité que l'environnement doit posséder est une capacité de collaboration (« multi-user »). En effet il est nécessaire que plusieurs parties prenantes puissent se réunir lors des revues de conception.

Importer des données

Comme les parties prenantes utilisent encore les logiciels de modélisation dont ils ont l'habitude, l'application doit être capable d'importer les données essentielles de ces modèles dans une base de données unificatrice.

Exploration des données

Les données sont affichées dans un espace 3D infini. Il est ainsi possible de les explorer en se déplaçant.

Interagir avec les données

Enfin, il est nécessaire de pouvoir interagir avec les données pour les explorer. Des moyens d'interaction différents peuvent être implémentés en fonction des données explorées pour répondre à des objectifs différents.

4.2.2 Scénario d'utilisation de l'environnement

Une revue de conception s'inscrit dans un processus de développement de produit itératif ponctué de revues à la suite desquelles les modèles sont modifiés puis à nouveau revus et ainsi de suite, jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable.

Dans ce paragraphe, le but est de décrire le scénario d'utilisation, pour le but de compréhension et maintien en cohérence d'une conception multivue du point de vue de l'utilisateur de l'environnement virtuel (Figure 42).

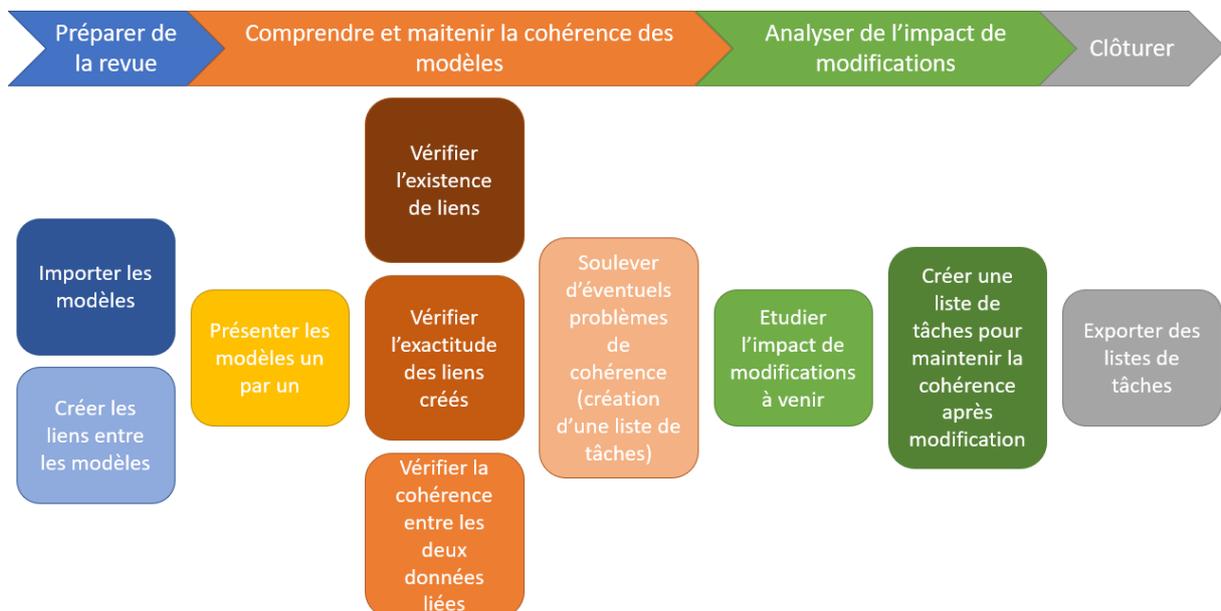


Figure 42 : Scénario d'utilisation de l'environnement virtuel pour réaliser des revues MBSE ayant pour objectif la compréhension et le maintien en cohérence d'une conception multivue (objectifs 1.1 et 1.2). Les activités sont présentées ici sous forme de séquence d'actions car c'est dans cette ordre qu'elles doivent être réalisées. Cependant, lors d'une revue, des boucles itératives peuvent exister.

Préparer la revue

La première étape d'une revue de conception est sa préparation. L'utilisation d'un environnement tel que décrit dans le paragraphe précédent requiert la collecte des données nécessaires issues des modèles natifs et la création de liens, soit partiellement automatiquement (grâce à des conventions de nommage par exemple pour rapprocher deux éléments avec un nom identique mais appartenant à des vues complémentaires) soit manuellement. Ces tâches impliquent le besoin des fonctionnalités suivantes :

- Import de modèles (voir paragraphe précédent)
- Création automatisée de liens
- Création manuelle de liens

Il faut noter que pour cette étape de préparation de la revue, il n'est pas nécessaire que toutes les parties prenantes participent.

Comprendre et maintenir la cohérence des données

La revue de conception en elle-même commence par une phase de compréhension individuelle des modèles (en jaune sur la Figure 42). Pour rendre l'exploration des données possible, l'environnement doit alors permettre de :

- Faire apparaître des données pour comprendre les liens de traçabilité verticale entre les niveaux systémiques (système, sous-systèmes, ..., composants).
- Faire apparaître des données pour comprendre les liens de traçabilité horizontale (parties prenantes, fonctions, exigences, blocs logiques, blocs physiques, etc., à un niveau systémique donné).
- Cacher des données pour éviter que la scène virtuelle soit surchargée.

En ce qui concerne le maintien de la cohérence, il est nécessaire que des données provenant de plusieurs modèles soient visibles simultanément et que les liens entre ces données le soient également. Cette fonctionnalité permet de s'assurer que les liens existent et qu'ils sont exacts. Il est alors nécessaire d'identifier les liens erronés (lien en trop, manquant, ou incorrect), pour qu'ils soient corrigés puis remontés dans une liste de tâches. Pour résumer, les fonctionnalités nécessaires au maintien de la cohérence sont les suivantes :

- Visualiser et analyser des liens entre des données de différents modèles.
- Stocker les problèmes trouvés dans une liste de tâches à réaliser.

Analyser de l'impact de modifications

Après avoir assuré la cohérence entre les données de vues complémentaires, il est possible d'analyser l'impact d'une modification. Cela nécessite de faire apparaître tous les éléments liés à la donnée amenée à changer et d'apprécier les conséquences de sa modification. Le résultat de cette analyse doit lui aussi pouvoir être capturé et exporté dans une liste de tâches à réaliser pour que la cohérence soit maintenue. Pour résumer, les fonctionnalités à développer sont les suivantes :

- Visualiser tous les éléments liés à une donnée et analyser les besoins de changements.
- Stocker les modifications à apporter.

Clôturer la revue

Enfin, l'ensemble des décisions qui ont été prises lors de la revue (modification pour maintenir ou pour rétablir la cohérence des modèles) doit pouvoir être exporté dans un format standard, a minima sous la forme de compte rendu au format PDF traçant les modifications à apporter à chaque modèle. Ainsi, chaque partie prenante pourra adapter son ou ses modèles à celui des autres.

4.2.3 Conclusions

Cette section s'intéresse en particulier aux revues MBSE pour lesquelles les objectifs sont de comprendre les différents modèles conçus par les différentes parties prenantes ou, plus généralement, de comprendre le système conçu dans son ensemble, mais aussi de s'assurer de la cohérence de ce qui a été produit. Ce maintien de la cohérence permet dans un second temps d'analyser l'impact d'une modification dans l'un des modèles. Pour cela nous avons proposé un processus à suivre pour réaliser de telles revues en reprenant les tâches à réaliser détaillées dans le chapitre précédent. Une liste de fonctionnalités que l'environnement virtuel doit fournir aux utilisateurs pour permettre le bon déroulement de la revue a été dressée. Cette liste est assimilable à un cahier des charges de l'environnement développé. Ce cahier des charges nous sert à s'assurer que la solution proposée permet a priori d'améliorer le processus de revue MBSE.

Cette section valide également la première phase du carré de validation, lorsque les objectifs de revue sont la compréhension, la maîtrise de la cohérence et l'analyse d'impact. Le chapitre 2 montre qu'il existe bien un besoin et que l'utilisation d'outils de visualisation immersive pourrait faciliter certaines des tâches réalisées en revue de conception. Cette section, avec l'énoncé d'une liste de fonctionnalités, montre qu'il est possible d'implémenter une telle solution.

4.3 PROPOSITION D'UN CAS D'ETUDE SUR LEQUEL UTILISER NOTRE ENVIRONNEMENT

Ce chapitre propose un environnement qui répond aux objectifs 1.1 (comprendre) et 1.2 (maintenir la cohérence) énoncés dans le chapitre 3. L'utilité de l'environnement virtuel vis-à-vis de ces deux buts sera validée au moyen de la mise en œuvre de celui-ci sur un problème éprouvette : la revue de conception d'un télescope.

4.3.1 Revues de conception d'un télescope

Ce cas d'application se situe dans une phase de conception préliminaire. Nous faisons l'hypothèse qu'un modèle d'architecture à plusieurs niveaux systémiques existe, et qu'il contient les exigences associées. L'architecture contient des formes 3D primitives et une première décomposition en sous-systèmes existe dans un modèle de comportement.

Ces trois vues sont inspirées du cas d'étude présenté par Mhenni et al. (2014). Nous proposons ce jeu de données ainsi créé en libre accès³⁷ pour qu'il soit complété et amendé, et surtout pour qu'il soit réutilisé dans d'autres études proposant des environnements similaires au notre pour objectiver les comparaisons entre les différentes solutions et faire ainsi progresser la recherche en termes de métaphores de visualisation et d'interaction.

³⁷ Accessible sur le lien git suivant : https://github.com/GIS-S-mart/Benchmark-6_model-based-design-reviews/tree/main/datasets/Telescope

4.3.2 Modèle d'architecture

La modélisation de l'architecture se fait avec le plug-in Papyrus de l'environnement Eclipse³⁸, en SysML. Il est toutefois important de noter que l'utilisation de n'importe quel autre logiciel est possible à condition d'exporter les données dans un format standardisé. Ici, les données SysML pertinentes, détaillées dans la suite de cette section, sont stockées dans un fichier XML importé plus tard dans l'environnement. Un processus systématique pour concevoir les différents diagrammes que nous estimons nécessaires pour réaliser l'analyse fonctionnelle du télescope et définir son architecture est imposé :

1. Définition des interacteurs et interfaces externes
2. Définition des fonctions que doit réaliser le système (services que doit rendre le système aux interacteurs ou contraintes imposées par les interacteurs).
3. Exigences dérivées de ces fonctions.
4. Décomposition en sous-systèmes reliés par des interfaces internes.

Après la décomposition du système en sous-systèmes, le même processus est récursivement appliqué à chaque sous-système. Le système « Télescope » servira à illustrer ce processus.

Définition des interacteurs

La définition des interacteurs dépend du niveau systémique. Certains sont des interacteurs externes au système, mais lorsque l'on étudie un sous-système, d'autres sous-systèmes peuvent faire partie de la liste des interacteurs. Ici, ils sont modélisés avec un diagramme SysML Bloc Definition Diagram (BDD, Figure 43).

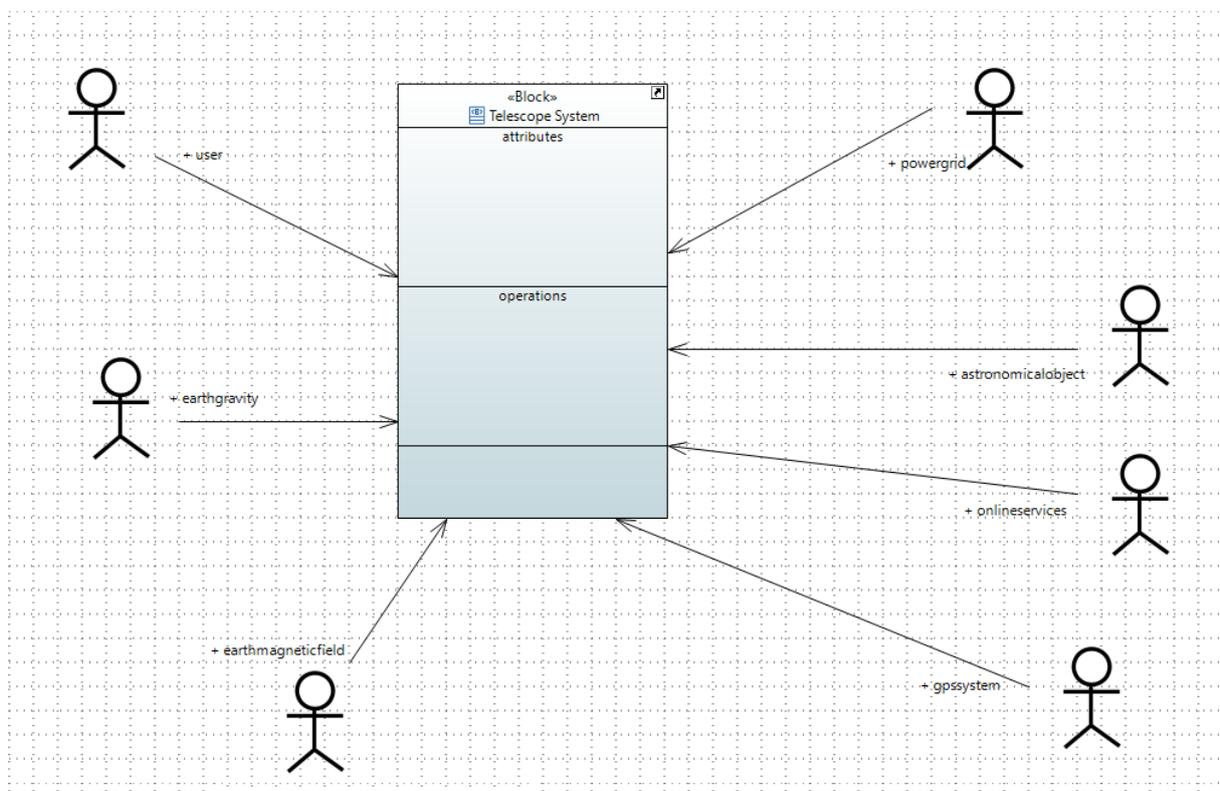


Figure 43 : Définition des interacteurs du système « Telescope » en phase de vie « Utilisation »

³⁸ <https://www.eclipse.org/papyrus/> - Consultée le 07/09/2022

Certaines parties prenantes sont rapidement identifiables comme l'utilisateur ou l'astre observé. Le télescope doit pointer et suivre un objet astronomique présent dans une base de données. Il est donc nécessaire qu'il soit alimenté en énergie (partie prenante « réseau électrique »), et que sa base de données puisse être mise à jour (partie prenante « services en ligne »). Enfin, pour pointer et suivre un astre, le télescope doit connaître avec précision sa position (parties prenantes « champs magnétique » pour connaître le nord, « GPS » pour sa position sur la Terre, et « gravité » pour connaître la verticale).

Définition des fonctions que doit remplir le système

L'identification des parties prenantes n'est pas un but mais un moyen d'identifier les fonction, services et contraintes. Ils sont ici modélisés avec diagramme SysML de Use Case (Figure 44).

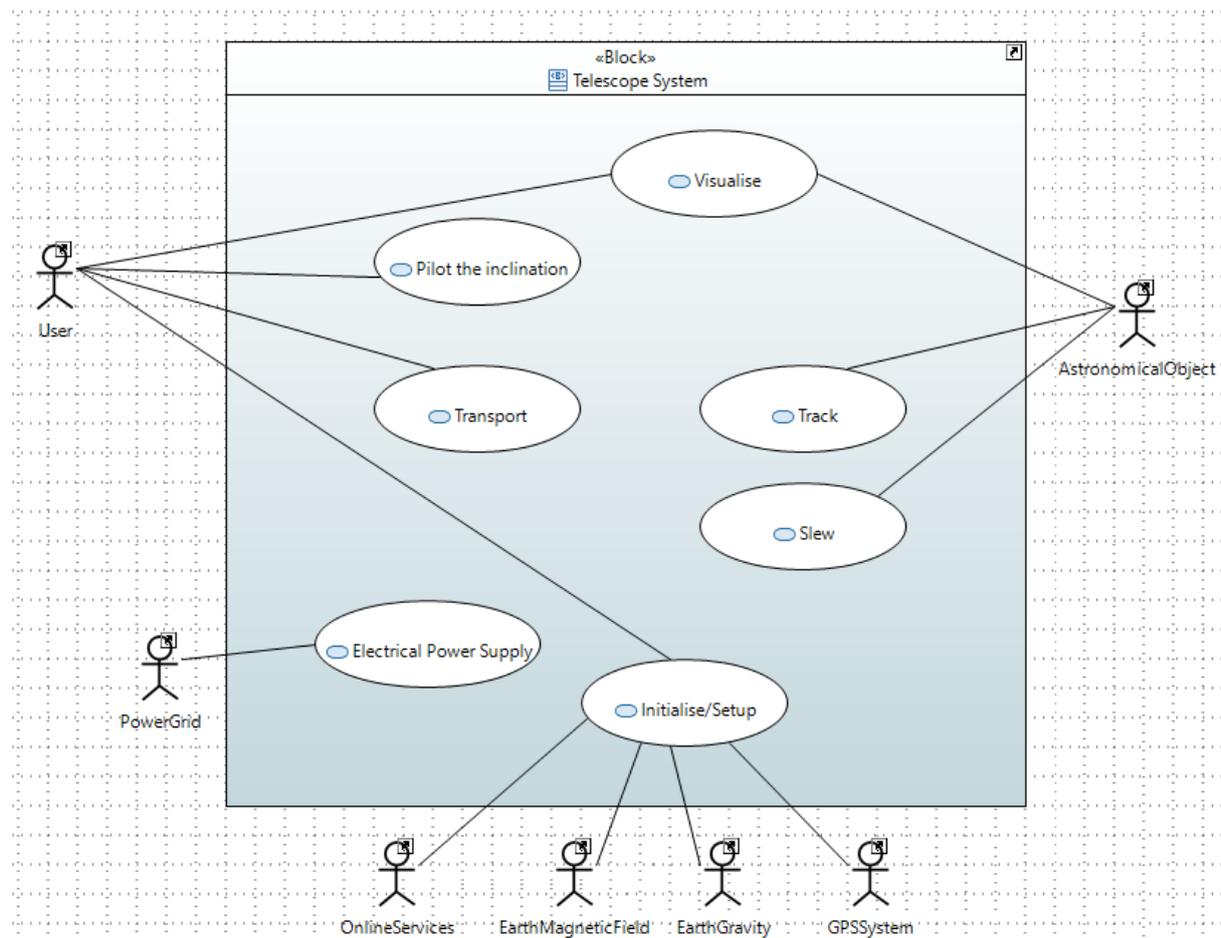


Figure 44 : Définition des fonctions que doit remplir le système « Telescope »

Les fonctions remplies par le système, représentées dans des bulles, sont celles évoquées dans la phase précédente, mais cette fois décrite graphiquement.

Définition des exigences du système

Toutes les fonctions définies dans la phase précédente ne sont que des indications de ce que doit faire le système, mais pas avec quel niveau de performance il doit le faire et dans quelles conditions. C'est le rôle des exigences modélisées dans un diagramme SysML d'exigences (Figure 45).

Une exigence est composée d'un nom, par exemple « Req Visualise » (en haut à gauche sur la Figure 45), d'un identifiant, 1 pour cette même exigence, et d'un énoncé textuel, lequel spécifie ce qui est attendu du système. Une unique fonction externe (service ou contrainte) au niveau système ou

fonction interne au niveau sous-système peut être dérivée en plusieurs exigences, comme la contrainte « transport » qui implique une exigence sur le poids du système et une autre sur ses dimensions.

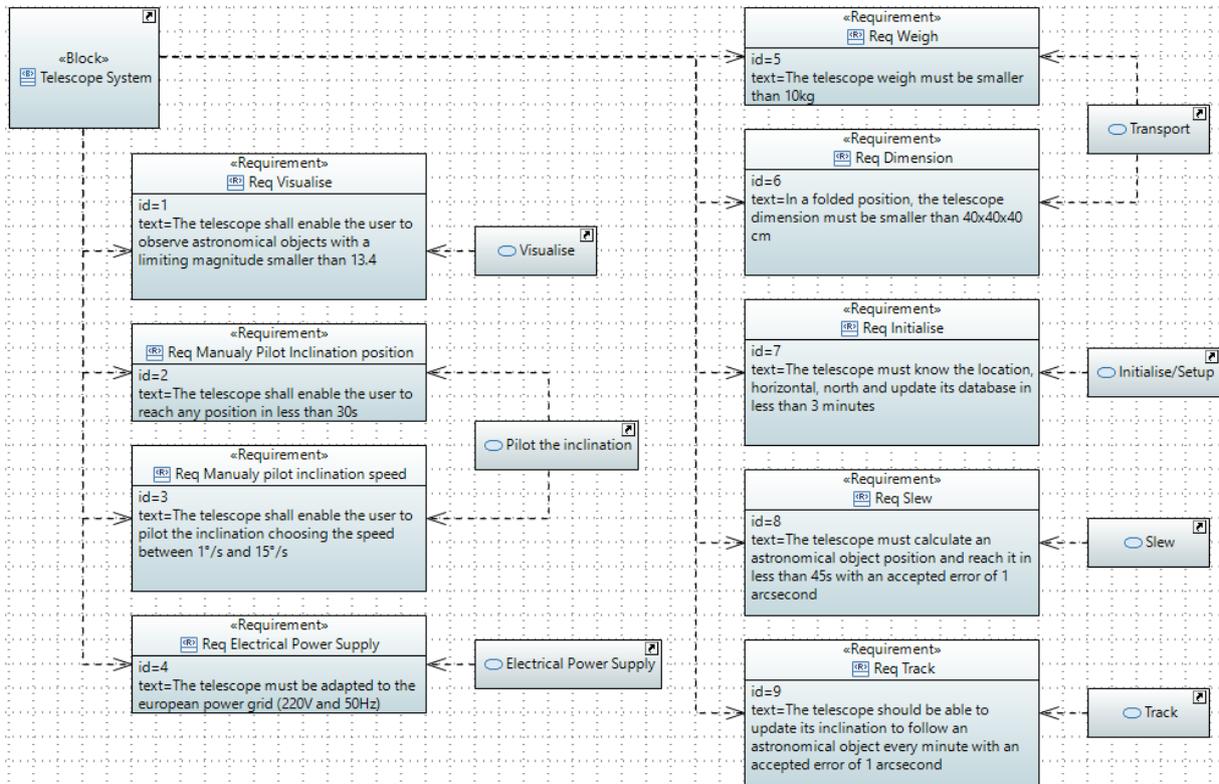


Figure 45 : Extrait de la définition des exigences du système « Telescope »

Décomposition en sous-systèmes

Enfin, la dernière étape consiste à définir les sous-systèmes, et les interfaces internes, ici représentées dans un diagramme SysML Internal Block Diagram (IBD, Figure 46).

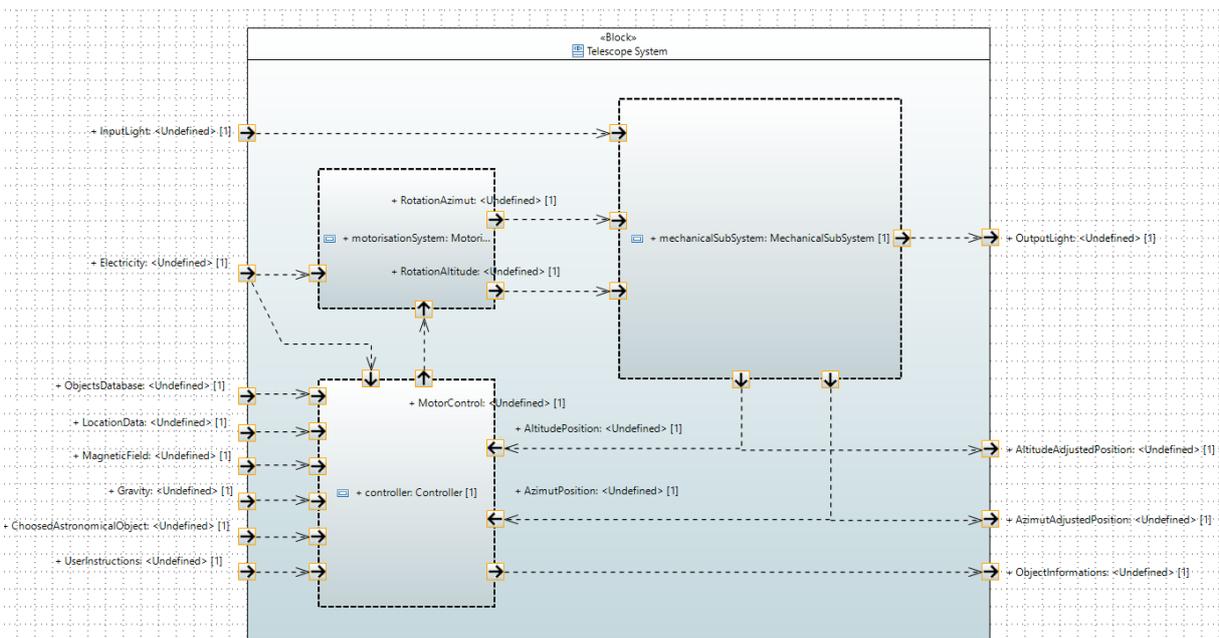


Figure 46 : Décomposition du système « Telescope » en sous-systèmes

Le télescope se décompose en trois sous-systèmes : un contrôleur, une motorisation, et un assemblage mécanique. Ensuite, le même processus s'applique sur chacun de ses sous-systèmes, pour définir ses interacteurs, ses fonctions, ses exigences et son architecture.

4.3.3 Modèle CAO

Un autre modèle conçu pour ce cas d'étude est une ébauche d'un premier modèle de géométrie 3D (Figure 47), modélisé sous CREO³⁹, qui permet d'exporter les modèles dans le format d'échange standardisé STEP.

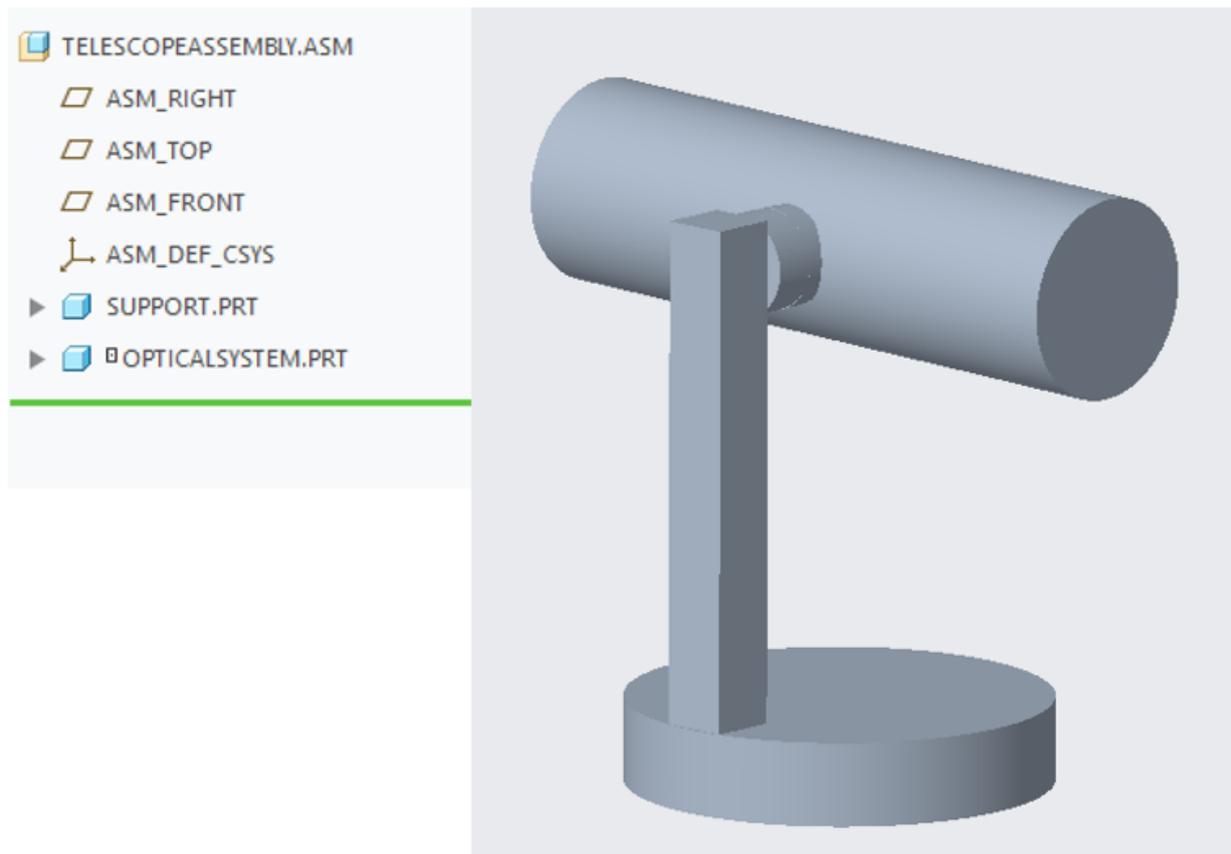


Figure 47 : Ebauche de modèle 3D du télescope et de son arborescence

Ce modèle ne représente que l'assemblage mécanique défini comme l'un des sous-systèmes du système télescope dans le modèle d'architecture. Il est composé de deux sous-assemblages : le support et le système optique.

4.3.4 Modèle de comportement

Le dernier modèle de conception du télescope est une vue logique du modèle de comportement. Comme pour le modèle CAO, celui-ci est préliminaire. Il est réalisé dans SystemModeler⁴⁰ (Figure 48), et les données peuvent être récupérées avec un script qui va lire le modèle Modelica (ou Simscape si la suite MathWorks est préférée). Ici, on récupère les blocs, leurs ports, et les flux entre les ports.

³⁹ <https://www.ptc.com/fr/products/creo> - Consultée le 07/09/2022

⁴⁰ <https://www.wolfram.com/system-modeler/> - Consultée le 07/09/2022

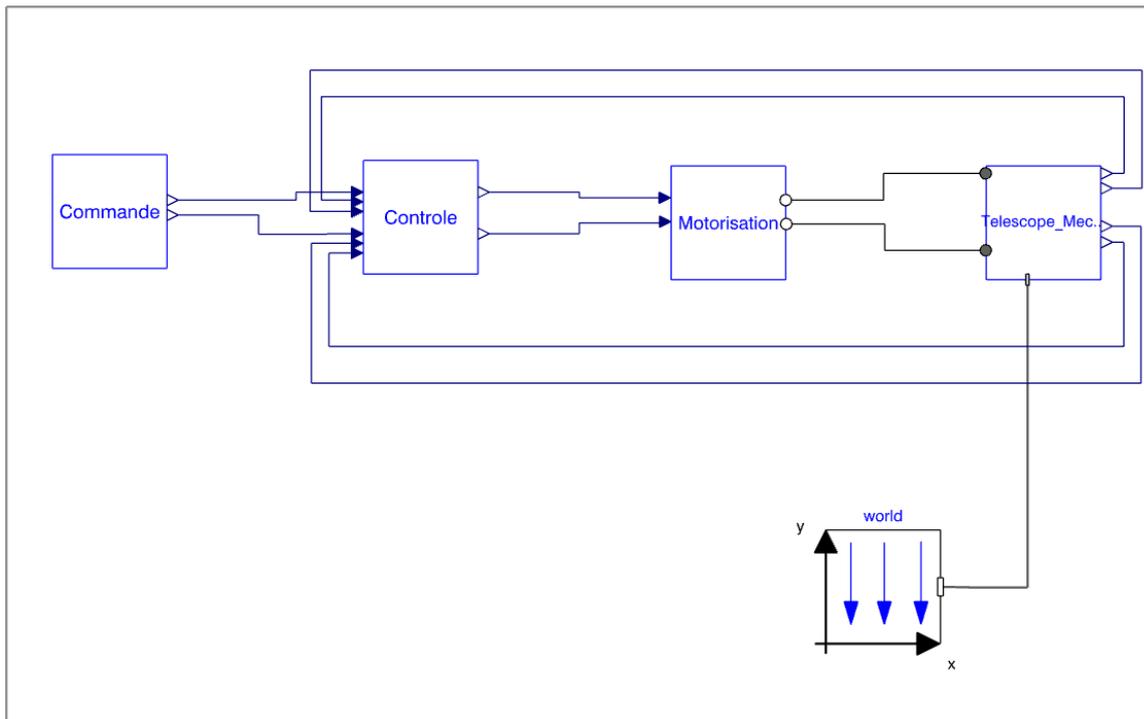


Figure 48 : Vue logique du modèle de comportement du télescope

4.3.5 Des modèles interdépendants

Si tous ces modèles sont conçus dans des langages et des logiciels de modélisation différents, ils représentent des vues complémentaires du télescope. Ils sont donc liés les uns aux autres, mais ici ces liens sont implicites. Pour les expliciter, des matrices de traçabilité ou Design Structure Matrix (DSM) sont fabriquées (Figure 49). Aujourd’hui, lors d’une revue MBSE, ceux-ci sont présentés comme ils le sont dans cette section, via des captures d’écran, ce qui ne permet pas d’exploiter les avantages de l’utilisation de modèles (Bayer, 2018).

| | Telescope | Commande | Contrôle | Motorisation | Telescope Mecanique | World |
|------------------------|-----------|----------|----------|--------------|---------------------|-------|
| Telescope System | X | | | | | |
| Control SubSystem | | | X | | | |
| Motorisation SubSystem | | | | X | | |
| Mechanical SubSystem | | | | | X | |
| Support SubSystem | | | | | | |
| Optical SubSystem | | | | | | |

Figure 49 : Matrice DSM des liens entre les éléments de l'architecture (lignes) et les éléments du modèle de comportement (colonnes)

4.4 UN DEMONSTRATEUR FONCTIONNEL POUR LES REVUES DE CONCEPTION IMMERSIVES ET INTERACTIVES

Dans cette section est introduit l'environnement développé pour réaliser des revues MBSE, en l'illustrant avec le cas d'étude du télescope.

4.4.1 La base de données

Comme décrit dans le chapitre 3, le principe de fonctionnement de l'application repose sur la visualisation d'une base de données qui regroupe l'ensemble des données de conception pertinentes. Dans un premier temps, il est donc nécessaire de définir cette base de données puis de la remplir.

Nous choisissons pour cela une base de données orientée graphe, laquelle permet de stocker des données dans des nœuds (caractérisés par un type et une liste d'attributs), mais aussi de rendre explicite les liens entre ces nœuds. Il faut noter que l'avantage du graphe par rapport à d'autres solutions de bases de données est sa flexibilité. Il est ainsi très simple d'ajouter de nouveaux nœuds, de nouveaux attributs, et de nouvelles relations entre les nœuds. Par ailleurs, les bases de données NoSQL orientées graphes ont été inventés pour stocker de gros volumes de données relationnelles.

Pour chacun des modèles, il est nécessaire d'identifier les données à encoder comme un nœud dans le graphe, et les différents liens qui peuvent exister entre ces nœuds. Le métamodèle (Figure 50) explicite la structure de la base de données. Pour le modèle d'architecture, ce métamodèle est construit de la façon suivante :

1. Cinq objets dans les diagrammes conçus sont identifiés : Les blocs d'architecture, « **BUILDING BLOCK** » (par exemple le système télescope est un building block), les parties prenantes « **STAKEHOLDER** », les fonctions « **FUNCTION** », les exigences « **REQUIREMENT** » et leurs paramètres « **PARAMETER** ».
2. Pour chaque objet, nous identifions une liste d'attributs. Par exemple, les blocs d'architectures sont caractérisés par un identifiant dans la base de données, un niveau systémique (un entier, qui est 0 pour le système, 1 pour ses sous-systèmes, et ainsi de suite), et un nom.
3. Enfin, il faut identifier de quelle manière les nœuds peuvent être interreliés. Par exemple, les « **STAKEHOLDER** » interagissent « **INTERACTS** », avec des blocs d'architecture « **BUILDING_BLOCK** », lesquels réalisent « **FULFILLS** » des fonctions.

Le même processus d'identification des données pertinentes est répété pour chaque vues du télescope.

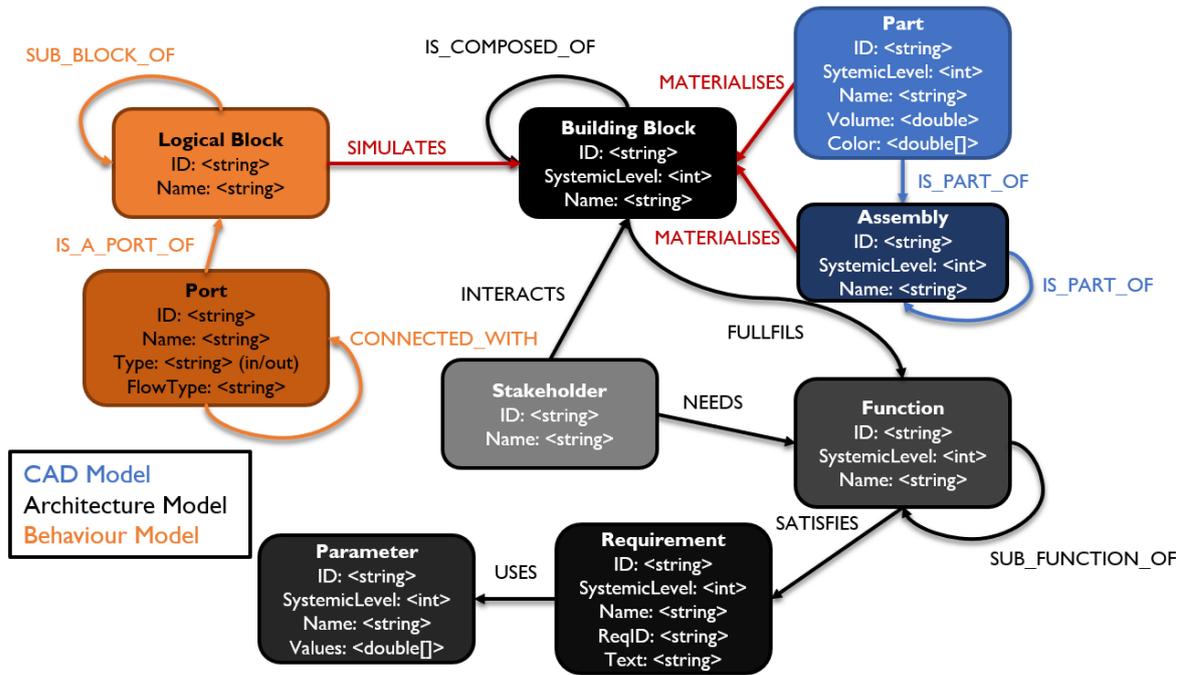


Figure 50 : Métamodèle de la base de données

La Figure 51 est un extrait de la base de données, avec les données telles qu'elles sont enregistrées.

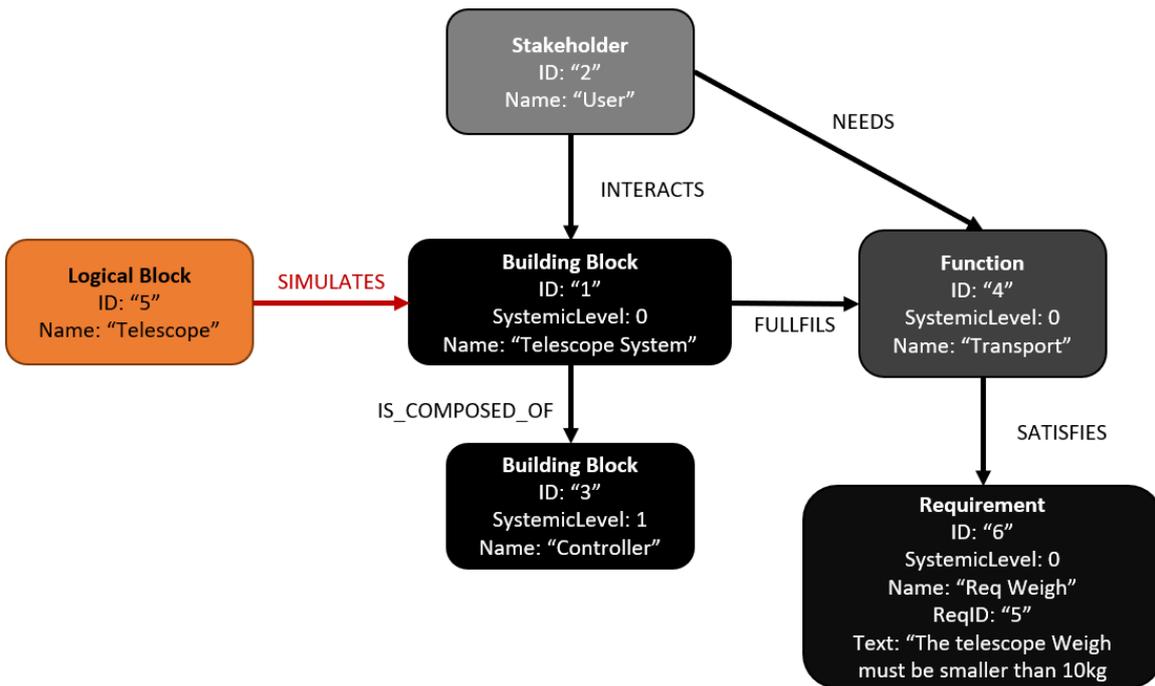


Figure 51 : Extrait de la base de données

Après avoir défini la structure de notre base de données, il faut la remplir. Pour chacun des modèles, il faut alors exporter les données qui contiennent les informations nécessaires à la revue. Pour le modèle d'architecture, le logiciel Papyrus enregistre les données dans un fichier XML. De la même façon, CREO permet d'exporter les modèles CAO dans le format STEP qui contient les données nécessaires. Pour le modèle de comportement, il est possible de s'appuyer sur Modelica dont le langage est standardisé ou d'exporter le modèle au format d'échange Functional Mock-up Interface

(FMI). La solution est alors d'écrire un script qui permette d'extraire toutes les informations, c'est-à-dire les noms des blocs logiques, les ports de ces blocs logiques, et les flux qui lient ces ports. Enfin il faut choisir un système de gestion de base de données, ici ce sera Neo4j⁴¹.

Sans rentrer dans les détails techniques, pour chaque modèle la procédure est la même. Les fichiers dans lesquels les données pertinentes des modèles sont parsées dans l'application, ici en langage C#, pour remplir alors la base de données via un langage de requêtes, en l'occurrence en Cypher pour Neo4j.

L'environnement proposé dans cette thèse sert à analyser les modèles, et non les modifier. Il a fallu faire des choix de langages et logiciels pour modéliser les vues du cas d'étude, mais la base de données ne dépend pas de ceux-ci. La base de données est donc agnostique aux langages et logiciels de modélisation à condition de respecter le modèle de données (Figure 50). Autrement dit, les nœuds correspondant aux fonctions dans la base de données pourraient être issues de modèles Capella par exemple plutôt que de diagrammes SysML.

4.4.2 Les métaphores visuelles

Le but de ce chapitre est de proposer un environnement qui répond aux objectifs 1.1 (compréhension) et 1.2 (maintien de la cohérence) du chapitre 3. Pour cela, les informations pertinentes sont stockées dans la base de données présentée dans les paragraphes précédents. Cette thèse propose alors une métaphore abstraite et directe, en visualisant cette base de données dans une scène virtuelle immersive sous forme de graphe. Ce choix est motivé par plusieurs facteurs. Premièrement, la métaphore de graphe 3D est indépendante des concepts à visualiser puisqu'un graphe (nœuds et arêtes) est universel pour des données relationnelles et très flexible pour accueillir de nouveaux objets ou interdépendances. Deuxièmement, la métaphore de graphe 3D rend explicite les liens entre les données. Troisièmement, les études qui montrent qu'explorer des graphes est plus facile en 3D stéréoscopique que sur un écran 2D (Alper et al., 2011). Enfin, cette métaphore a déjà fait l'objet de recherches en ce qui concerne la gestion de son affichage et plusieurs algorithmes existent (Fruchterman & Reingold, 1991; Kwon et al., 2015).

Les premiers éléments à visualiser sont les nœuds du graphe. En effet, ce sont dans ces nœuds que sont contenues toutes les données extraites des modèles. Comme l'illustrent les Figure 52 et Figure 53, s'il est naturel de représenter les éléments du modèle CAO en utilisant directement leur géométrie, il faut faire des choix en ce qui concerne les données abstraites. Dans notre environnement, nous associons chaque type de donnée à une forme et une couleur pour qu'il soit facilement identifiable. Par exemple, les fonctions remplies par les systèmes sont représentées par des sphères bleues. De cette façon il est facile d'identifier de loin et visuellement le type de donnée observée. Des informations complémentaires, comme les noms, éventuellement identifiants, etc., sont écrites au-dessus des objets. Le choix d'encoder les concepts (partie prenante, fonction, exigence, bloc logique...) avec des représentations symboliques offre une certaine flexibilité vis-à-vis de potentiels ajouts de concepts dans le modèle de données.

⁴¹ <https://neo4j.com/> - Consultée le 08/09/2022

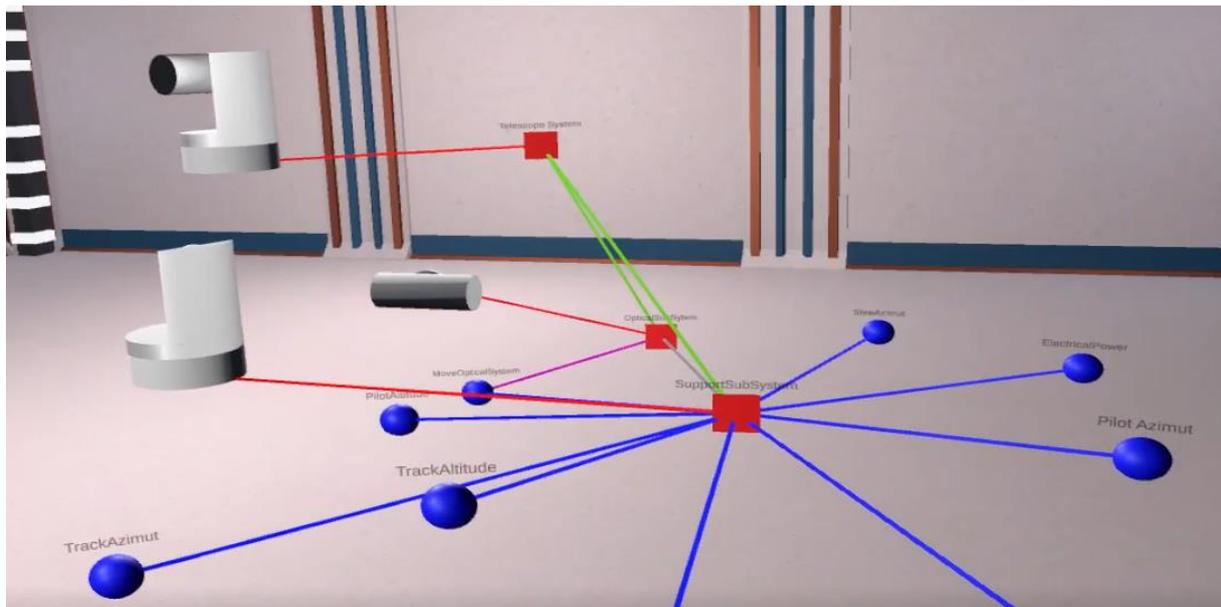


Figure 52 : Exemple de ce que peut voir un utilisateur de l'environnement. Les cubes rouges sont les blocs d'architectures, les sphères bleues les fonctions qu'ils doivent remplir. Les liens entre les blocs de l'architecture et les éléments du modèle 3D sont également représentés par des liens rouges.

Si les nœuds sont effectivement les objets qui contiennent les données extraites des modèles, l'autre élément important du graphe est l'interdépendance des données. Celles-ci sont représentées par une arête entre deux nœuds. La couleur de ce trait dépend du type de lien (par exemple, sur les Figure 52 et Figure 53, un trait bleu représente un lien « **FULLFILS** », un trait orange représente un lien « **SUB_FUNCTION_OF** », etc.). Il est important que ces liens soient observables, puisqu'il est défini dans le chapitre 3 que l'une des tâches que l'environnement doit permettre est d'appréhender et comprendre ces interdépendances, et de les valider.

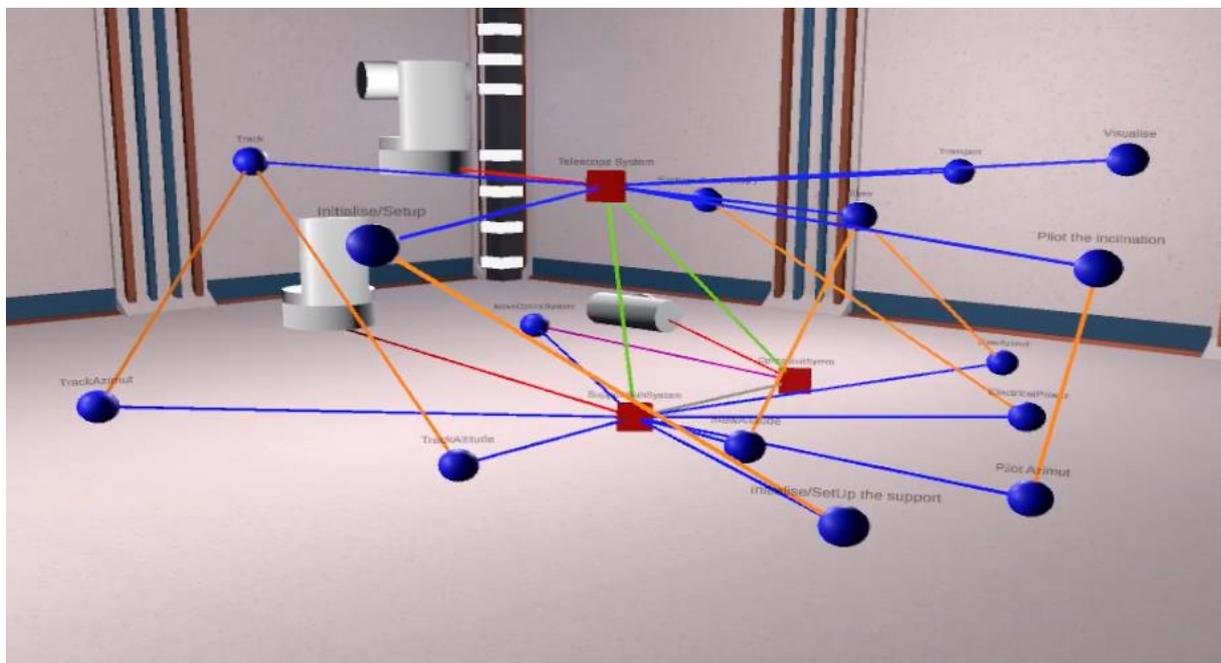


Figure 53 : Un autre exemple de visualisation, détail des fonctions de l'assemblage mécanique et de ses sous-systèmes

Enfin, la scène virtuelle doit permettre de distinguer les niveaux systémiques pour clarifier la lecture de la base de données. Comme l'illustre les Figure 52 et Figure 53, les blocs « Telescope » se situent

plus en hauteur que les blocs représentant ses sous-systèmes. Ce placement particulier est géré automatiquement par l'environnement. Il en est de même pour les fonctions, ou encore les exigences. Séparer ainsi les niveaux systémiques permet de trier les nœuds dans la scène, pour la rendre plus lisible, et il est par conséquent plus facile pour l'utilisateur de se situer dans la conception. Techniquement, les nœuds sont attirés vers une altitude, ce qui permet de les déplacer tout de même verticalement et d'obtenir un mouvement fluide dans la scène virtuelle en ne les bloquant pas sur une altitude donnée, mais limitant leur déplacement pour toujours garder la lisibilité des niveaux systémiques.

4.4.3 Les interactions

L'environnement doit également permettre d'interagir avec les métaphores. Tout d'abord, la première étape est la préparation de la revue. La Figure 54 montre comment démarre l'utilisation de l'environnement. Sur cette fenêtre uniquement 2D, il est possible de choisir le but de la revue en lançant l'application pour la vérification qui est présentée dans le chapitre suivant, ou en démarrant celle de ce chapitre en tant qu'hôte (lorsque c'est sur cette machine que la base de données tourne) ou en tant que client, pour se connecter à une application déjà lancée sur une autre machine, à distance. Il est enfin possible de préparer les modèles avec le bouton en bas à droite, qui dirige vers une autre fenêtre 2D qui, elle-même, propose d'importer les différents modèles et de remplir la base de données à visualiser dans la scène virtuelle.

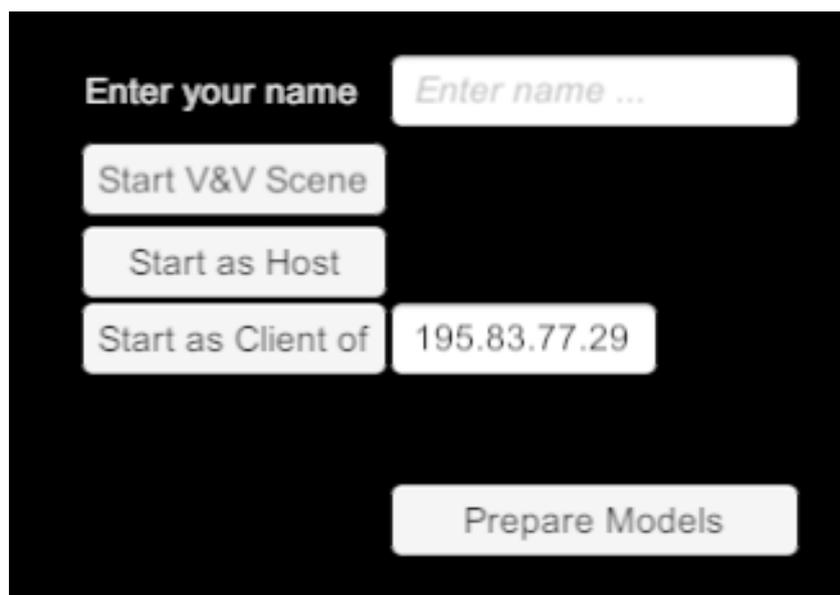


Figure 54 : Ecran d'accueil de l'application

Dans la scène virtuelle dans laquelle les utilisateurs sont immergés, les acteurs de la revue de conception peuvent interagir avec tous les nœuds présents dans la scène. La première interaction possible est naturelle : les utilisateurs peuvent toucher les nœuds avec leurs mains virtuelles, au moyen des avatars de leurs mains ou manettes (Figure 55). Il est donc possible de pousser ou tirer un nœud, ce qui peut permettre de les ranger, les séparer pour les mettre en valeur, etc. Le fait de pouvoir interagir avec ces objets virtuels permet de tangibiliser, au sens figuratif, des concepts (fonction, exigence, bloc logique, relations...). En effet, la tangibilité peut être physique, c'est-à-dire la capacité de toucher et se saisir des objets virtuels, ou figurative, c'est-à-dire la capacité à comprendre, s'approprier, [...], ressentir des concepts (Boy, 2017).

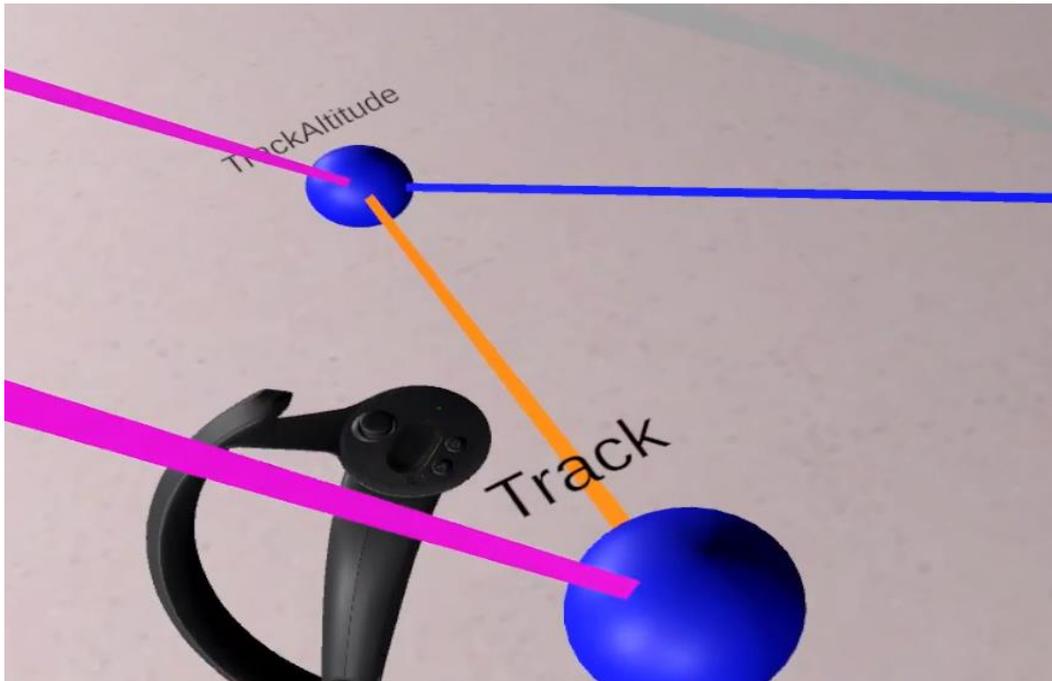


Figure 55 : Nœud tiré par un utilisateur avec sa manette

Un autre moyen d'interaction, est le « clic » grâce à des pointeurs lasers. Ces clics sur les nœuds font apparaître un menu qui suggère des interactions en fonction de différents modes (Figure 56 et Figure 57). Dans l'environnement, deux modes d'exploration différents existent : le mode « exploration complète » et le mode « exploration par voisins ».

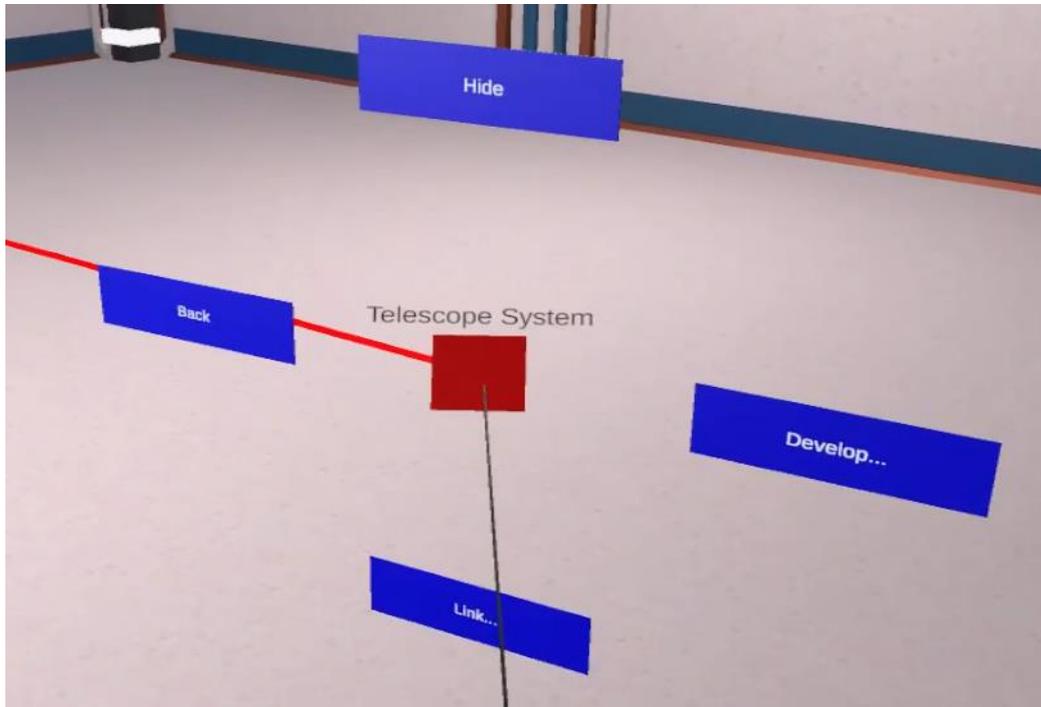


Figure 56 : Exemple d'un nœud cliqué, ici en mode « exploration complète »

Avec le mode « exploration complète », il est toujours possible de faire apparaître de nouveaux nœuds dans la scène. Un clic sur un élément (Figure 56) ouvre un menu qui propose de le développer en faisant apparaître tous ses voisins d'un certain type. Par exemple, lors d'un clic sur un Building Block,

(Figure 56), il est possible d'afficher toutes les parties prenantes qui sont à l'origine des exigences auxquelles ce bloc satisfait. Il est également possible de cacher des nœuds ou des groupes de nœuds avec le bouton « Hide », ce qui permet de garder une scène lisible.

Ce mode permet d'explorer, d'analyser ou de présenter librement un modèle en particulier ou les liens entre deux modèles. La Figure 53 est un exemple de visualisation obtenue en explorant les données avec ce mode d'interaction.

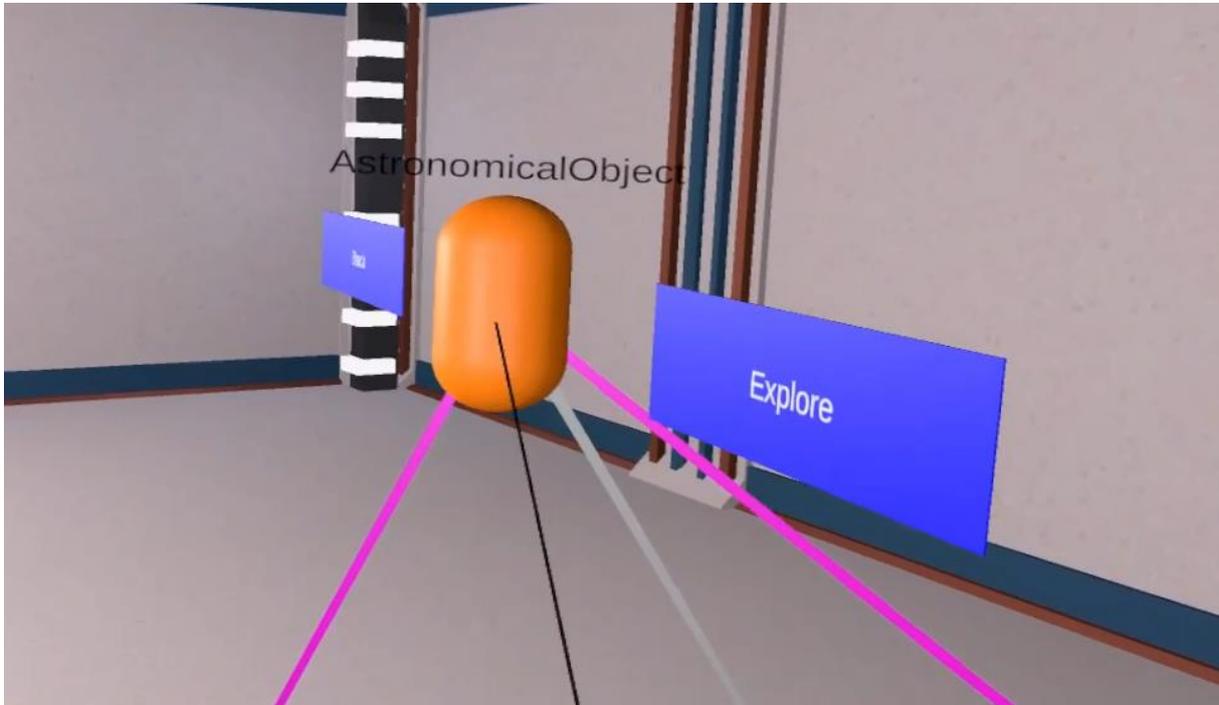


Figure 57 : Nœud cliqué en mode « exploration par voisins »

Le deuxième mode d'interaction est l'exploration par voisins. Cette fois, lors du clic sur un nœud (Figure 57), seul un bouton « Explore » apparaît. Ce bouton permet d'afficher les voisins dans la base de données du nœud exploré, c'est-à-dire tous les nœuds ayant un lien quelconque avec celui-ci.

La Figure 58 est un exemple de visualisation obtenue grâce à ce mode d'interaction, en explorant le nœud « Astronomical Object ». L'avantage de ce mode est le nombre limité de nœuds affichés simultanément dans la scène, laquelle reste alors toujours lisible. Il est possible de l'utiliser pour étudier, par exemple, l'impact d'une modification d'un élément en particulier.

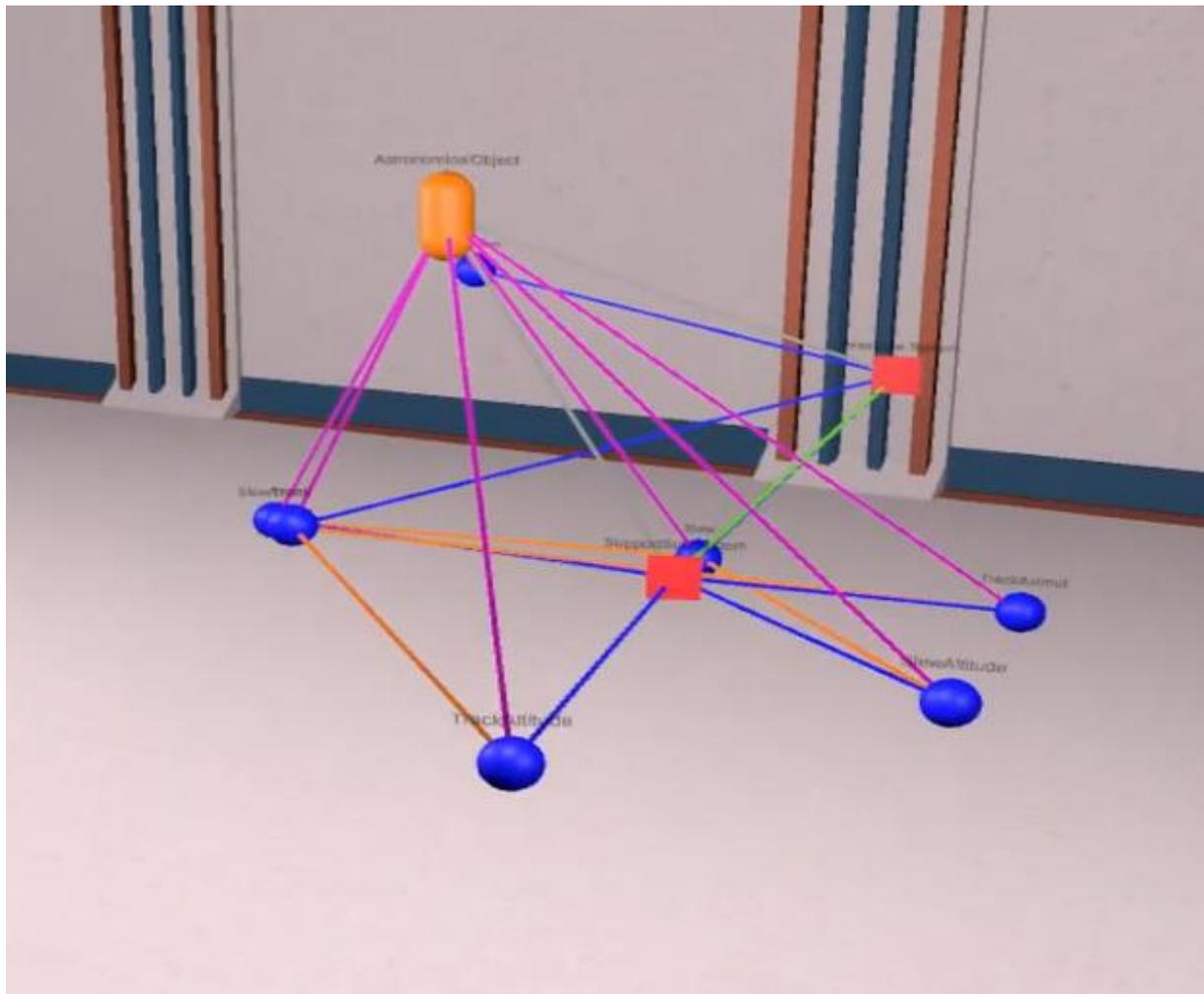


Figure 58 : Affichage uniquement des voisins (l'intégralité des voisins) du nœud « Astronomical Object »

Cette section a présenté les différents moyens de visualisation et d'interaction avec la base de données pour permettre les tâches exprimées dans le chapitre 3 : préparer la revue, présenter les modèles, vérifier les liens (leur existence, exactitude et cohérence). Des exemples d'utilisation de ces deux modes sont disponibles en vidéo⁴².

4.4.4 La structure

L'environnement proposé est flexible grâce à son architecture (Figure 59).

⁴² <https://1drv.ms/u/s!AgRF9w1y4k6GgcxgUjRZw6yAo7K9w?e=Urzbd6> – Consultée le 17/10/2022

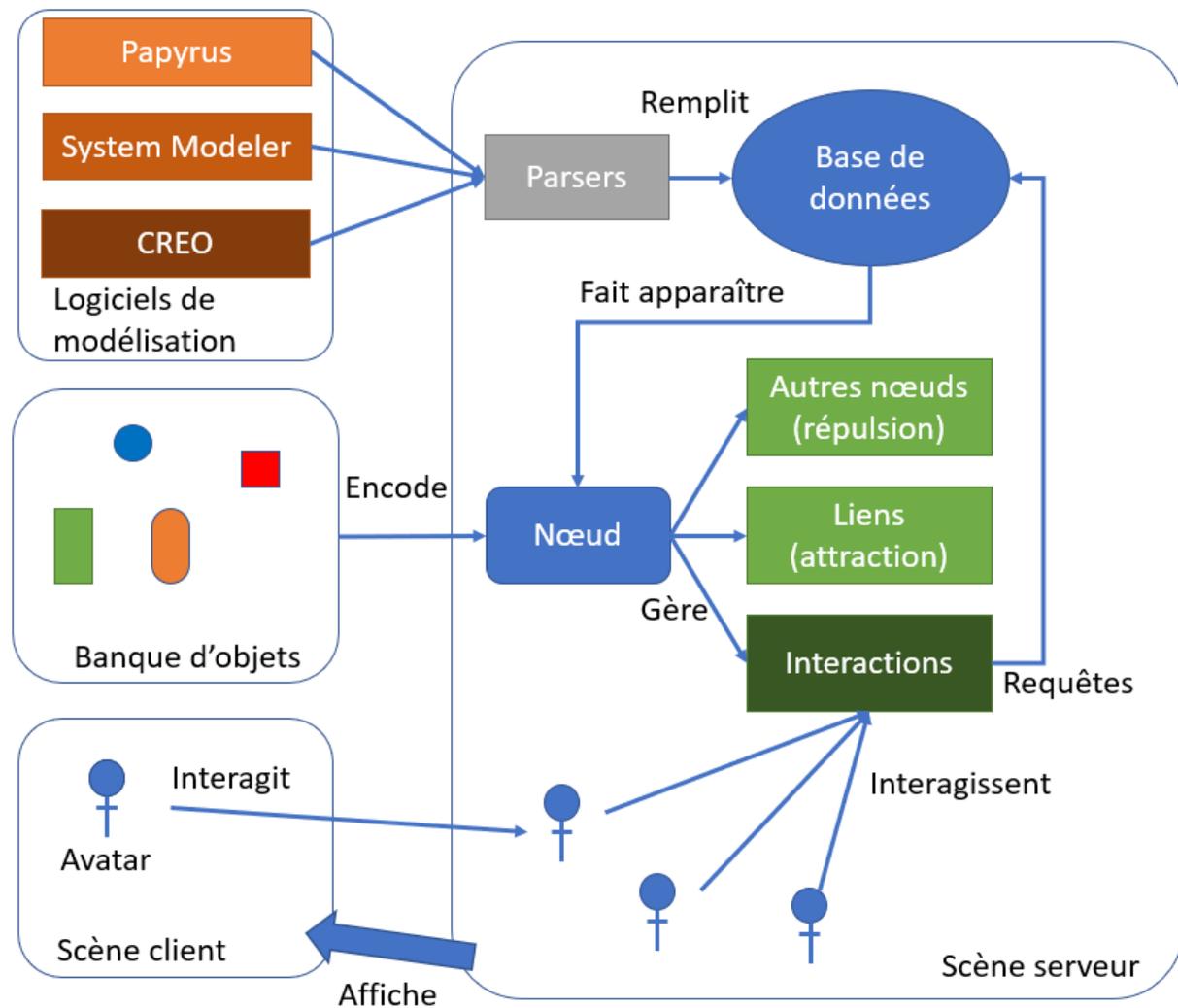


Figure 59 : Architecture de l'application

Sans rentrer dans le détail de la communication client-serveur qui permet d’immerger plusieurs utilisateurs dans un même environnement, concentrons-nous sur ce qu’il se passe du côté du serveur. Ce qui sert à la préparation de l’environnement est représenté en haut de la Figure 59, avec l’import des données des différents modèles. Elles sont lues par les parsers, puis automatiquement stockées dans la base de données via le langage de requête Cypher. Ainsi, si un modèle est mis à jour dans son logiciel natif, il suffit de relancer le parser de ce modèle pour que la base de données soit également à jour. En ce qui concerne l’affichage dans la scène, ce sont les nœuds qui gèrent leur placement grâce à un algorithme du type attraction-répulsion, ou force-directed (Fruchterman & Reingold, 1991). Quel que soit le nœud, quel que soit son type, il aura toujours le même comportement : il s’assure que tous les liens sont affichés avec les autres nœuds, il attire vers lui les nœuds avec lesquels il est lié, et il repousse les nœuds qui sont trop proches. De cette façon, la scène reste lisible, car les nœuds se repoussent tous entre eux, et les données qui ont un rapport entre elles sont à côté les unes des autres. Pour séparer les niveaux systémiques, les nœuds sont également attirés par une altitude particulière. Cette implémentation par attraction permet non seulement de garder une scène lisible mais aussi que les mouvements soient fluides. Ce comportement commun est implémenté dans une classe mère, dont tous les nœuds héritent. Deux éléments dépendent du type de nœud : l’objet 3D qui le représente, et les interactions disponibles. En ce qui concerne leur représentation visuelle, les nœuds utilisent des objets présents dans une banque, auxquels ils sont associés manuellement, sauf pour le

modèle CAO. Pour les interactions, un menu permet d'exécuter des requêtes sur la base de données pour explorer de nouveaux nœuds. Cette architecture a trois avantages pour :

- Modifier un modèle et mettre la base de données à jour, car son remplissage est automatisé.
- Ajouter de nouveaux types de nœuds (concepts), car le dessin de graphe est indépendant.
- Ajouter de nouvelles interactions, car l'affichage de nouveaux menus et boutons est facilité par l'héritage de classe, et que les requêtes sur la base de données sont facilement implémentables, à condition de maîtriser le langage Cypher.

Il est donc possible d'implémenter et tester de nouvelles hypothèses, en modifiant par exemple les métaphores de visualisation en utilisant des objets 3D dotés d'une meilleure transparence sémantique, ou encore en modifiant les modes d'interaction pour, par exemple, proposer de tracer un chemin entre plusieurs nœuds, etc.

4.4.5 Les limites du démonstrateur fonctionnel

A l'aide d'outils immersifs et interactifs, il est possible, dans l'environnement proposé dans ce chapitre, d'explorer et d'analyser différents modèles fabriqués dans le cadre de la conception d'un système complexe et de visualiser les liens entre ces modèles. Cependant, si une grande partie des tâches énoncées comme étant nécessaires pour effectuer des revues de conception sont réalisables dans notre prototype, certaines ne le sont pas :

- Créer des liens entre les modèles dans la scène virtuelle, lors d'une revue ou de la préparation.
- Créer une liste de tâches à réaliser pour maintenir la cohérence lors d'une modification.
- Capturer des informations (argument, décision, justification, etc.).

Ces trois tâches servent l'objectif 1.2 de cette thèse, qui concerne le maintien de la cohérence du système. Et s'il n'est alors probablement pas possible de conclure sur cet objectif en particulier, en ce qui concerne la visualisation et les interactions avec les informations produites autour de la conception d'un système, ce démonstrateur montre que l'environnement spécifié dans le chapitre 3 est réalisable.

4.5 UNE EXPERIMENTATION POUR EVALUER DES ENVIRONNEMENTS

Le développement d'un démonstrateur fonctionnel est une condition nécessaire mais pas suffisante pour valider la troisième phase du carré de validation. En effet, il faut démontrer que la mise en œuvre de celui-ci sur le problème éprouvette du télescope est utile vis-à-vis de l'objectif 1.1 de la thèse et donc valider que l'utilité vis-à-vis du but visé est bien la conséquence de la mise œuvre de notre démonstrateur. C'est pourquoi dans cette section nous proposons de réaliser une expérimentation – avec mise en œuvre de la proposition et d'une proposition rivale – qui cherche à montrer que les participants comprennent effectivement mieux les modèles conçus dans l'environnement virtuel présenté dans ce chapitre qu'à travers une présentation de diapositives.

4.5.1 Validation de nouveaux outils

Plusieurs démarches existent pour valider de nouveaux outils. Cette section présente celles le plus couramment rencontrées.

Des démonstrateurs

La première méthode de validation est la présentation d'un démonstrateur (Adwernat et al., 2020; Martini et al., 2015; Shiratuddin & Thabet, 2007). Comme nous l'avons alors évoqué, ce n'est que la validation du fait qu'implémenter un tel environnement est réalisable et qu'il est effectivement

possible d’y réaliser les tâches pour lesquelles il a été conçu. Cette méthode, qui pourtant ne valide pas de façon rigoureuse l’apport des propositions, est la plus utilisée dans la littérature actuelle.

Ces publications sont tout de même intéressantes, car elles expliquent systématiquement comment les auteurs réalisent ces environnements virtuels, les obstacles et choix techniques qu’ils réalisent. Cependant, il n’est pas possible, à la suite de ces lectures, de généraliser les conclusions.

Des expérimentations

D’autres recherches sont testées par des expérimentations. Le Tableau 2 regroupe quelques papiers présentés dans le chapitre 2 qui valident leur recherche par une expérimentation.

| Référence | Modèles | Participants | Mesures/Résultats/Limites |
|----------------------------|---------|---|--|
| Horvat et al. (2019) | CAO | 13. Principalement des experts en CAO. Principalement des personnes n’ayant jamais ou très peu utilisé de dispositifs de réalité virtuelle. | La différence de perception spatiale entre un environnement virtuel et une interface de CAO classique. Surtout pour des systèmes peu complexes, la réalité virtuelle permet une meilleure perception de l’espace. Des effets d’apprentissages non-évités, des participants au profil très homogène, des interactions limitées dans l’environnement de réalité virtuelle. |
| de Casenave et Lugo (2018) | CAO | 40. Sujets volontaires, avec un minimum de connaissance en CAO et une vue normale ou corrigée. | Comparaison entre une revue de CAO 2D, 3D (sur écran d’ordinateur), en réalité virtuelle mais avec un objet fixe, sans interactions et en réalité virtuelle avec la possibilité d’interagir avec le modèle. La réalité virtuelle permet de détecter plus d’erreurs mais pas plus vite. |
| Freeman et al. (2016) | CAO | 10. Etudiants en ingénierie mécanique | Comparaison sur un exercice de recherche d’erreur dans la conception entre un environnement classique (logiciel de CAO) et un environnement virtuel. L’environnement virtuel permet d’être plus rapide, plus précis, et plus confiant. Une population statistiquement non significative pour conclure. |

Tableau 2 : Quelques exemples de validation par expérimentation dans la littérature

Il faut ajouter à ce tableau les travaux de Wolfartsberger (2019) et de Satter et Butler (2015), très proches de ceux de Freeman et al. (2016). Ce qui est présenté ici est une liste exhaustive des publications qui réalisent une expérimentation pour valider les environnements qu’ils proposent. Malgré des biais, elles ont le mérite de chercher à valider, de façon objective, que les propositions

améliorent l'activité de revue de conception ou améliorent la compréhension par l'activité de revue de conception.

D'autres possibilités ?

Dans notre domaine de recherche, il existe encore une autre forme de validation de nos travaux : leur acceptation dans l'industrie. En effet, notre objectif est de proposer des solutions qui permettent aux entreprises, et en particulier aux concepteurs d'améliorer le processus de conception. Leur utilisation, effective et durable, par les industriels constitue alors d'une certaine façon une validation de leur utilité et efficacité. Dans ce cas, le but est alors de convaincre de potentiels utilisateurs qu'ils ont tout intérêt à investir dans les solutions proposées pour les mettre en place dans leur fonctionnement, cela justifie qu'un grand nombre de papiers ne propose que des démonstrateurs, qui visent en réalité à convaincre plus qu'à démontrer.

4.5.2 Proposition d'un protocole expérimental

Dans la section précédente, nous avons présenté l'environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif pour les revues MBSE sans toutefois valider le fait qu'il facilite la compréhension et le maintien de la cohérence des modèles. Cette section présente un protocole pour valider son utilité pour la compréhension de la définition multivue d'un système en cours de conception.

Ce protocole fait partie du benchmark d'évaluation des environnements virtuels pour les revues MBSE. En effet, si très peu d'environnements pour les revues de conception (plutôt pour les revues de modèles 3D pour le moment), sont validés par des expérimentations, et, lorsque c'est le cas, elles sont systématiquement différentes, tant au niveau de leur protocole qu'au niveau de leur cas d'application. Il n'est alors pas possible de comparer deux solutions entre elles, et donc pas possible de conclure réellement sur les apports de nouvelles métaphores ou interactions par rapport à celles qui existent déjà. Ce protocole est disponible sur le même projet Git⁴³ que celui du cas d'étude présenté plus haut.

Contexte, questions et hypothèses

L'expérimentation doit évaluer la compréhension personnelle, de chaque partie prenante, des modèles de conception d'un système complexe, en l'occurrence celle du télescope introduit plus tôt, tant en ce qui concerne le niveau de compréhension qu'en ce qui concerne leur confiance en leur compréhension. Elle cherche également à évaluer l'utilisabilité de l'environnement et la charge cognitive qu'il engendre.

Cette expérimentation se base sur la comparaison entre l'utilisation de l'environnement virtuel et une solution rivale représentative des pratiques actuelles : une présentation de diapositives contenant des captures des modèles du télescope. La question de recherche adressées est la suivante :

EST-CE QUE LA COMPREHENSION DE LA DEFINITION MULTIVUE D'UN SYSTEME EN COURS DE CONCEPTION BASEE SUR DES MODELES EST FACILITEE PAR L'UTILISATION DE L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF PAR RAPPORT A UN ENVIRONNEMENT USUEL ?

Nous pouvons résumer les résultats que attendus en quatre hypothèses.

⁴³ https://github.com/GIS-S-mart/Benchmark-6_model-based-design-reviews/tree/main/datasets/Telescope

H1 : L'environnement virtuel immersif permettra aux utilisateurs de mieux comprendre les modèles proposés – c'est-à-dire que la qualité des réponses qu'ils pourront donner à des questions posées sur le système sera supérieure à ceux qui utilisent un environnement traditionnel.

Cette hypothèse provient des nombreuses études qui démontrent l'utilité de la réalité virtuelle pour la compréhension de données CAO (de Casenave & Lugo, 2018; Freeman et al., 2016; Wolfartsberger, 2019). C'est toujours sur ces études que nous basons notre deuxième hypothèse.

H2 : L'environnement virtuel immersif permettra aux utilisateurs de comprendre plus rapidement le système étudié.

A propos de la confiance que les utilisateurs auront en leurs réponses, on base notre hypothèse sur les résultats de l'étude réalisée par Freeman et al. (2016).

H3 : Les utilisateurs de l'environnement immersif auront une confiance significativement plus importante dans leurs réponses.

L'utilisabilité des deux environnements expérimentés conduit à faire l'hypothèse que les participants trouveront l'environnement immersif plus agréable et facile à utiliser que l'environnement classique.

H4 : La note d'utilisabilité obtenue par l'environnement virtuel immersif sera plus élevée que celle de l'environnement classique de revue de conception.

Enfin, la charge cognitive ressentie par les utilisateurs conduit à la dernière hypothèse :

H5 : La charge cognitive ressentie par les utilisateurs de l'environnement immersif sera moins importante que celle ressentie pour des revues de conception classiques.

Description de la situation

Deux environnements doivent être mis en place. Le premier se base sur les outils actuellement utilisés lors de revues de conception, c'est-à-dire des diapositives qui contiennent des captures d'écran de logiciels métier et les matrices DSM traçant les liens entre les différents modèles. Les captures utilisées pour la fabrication de cet environnement sont celles qui ont servi à présenter le cas d'étude en section 4.3. Le deuxième est un environnement virtuel immersif dans lequel les sujets peuvent fouiller la base de données contenant les mêmes données des modèles d'architecture, de modélisation 3D et de simulation de comportement. L'objectif est alors d'évaluer la qualité de tâches réalisées dans chacun des environnements, l'efficacité avec lesquelles elles sont réalisées et leur confort et ergonomie. Pour cela, nous aurons recours à plusieurs outils :

- La qualité est évaluée par un questionnaire sur le fonctionnement du système qui permet d'évaluer la compréhension des utilisateurs
- L'efficacité est mesurée par le temps que mettent les sujets à répondre aux questions de fond
- L'ergonomie est évaluée par un questionnaire SUS (qui évalue l'utilisabilité d'une application) et le confort par un questionnaire TLX de la NASA (qui évalue la charge mentale d'une tâche).

Participants

Dans une étude de 2006, Guest et al. (2006) montrent qu'avec 12 participants, nous pouvons déjà obtenir des résultats significatifs. Par ailleurs, Tullis et Stetson (2004) montrent qu'à partir de 12 à 14 participants le questionnaire SUS fournissent des réponses fiables.

Nous estimons qu'il nous faut, dans le but d'obtenir des résultats fiables sur les deux questionnaires SUS, au minimum 14 participants pour chaque groupe étudié, et donc 28 participants au total. Cependant, il est préférable de monter à une trentaine de sujets pour être certains de récolter assez d'information et d'éliminer les résultats aberrants.

Les participants sont recrutés au laboratoire G-SCOP (a minima pour les pré-tests) et chez les étudiants de Grenoble INP – Génie Industriel. Ceux-ci ont l'avantage d'avoir un minimum de connaissance en ingénierie (souvent suffisantes pour comprendre le système que nous souhaitons leur faire étudier) mais qui restent assez floues pour qu'ils rencontrent des difficultés de compréhension sur les vues métier très complètes et spécifiques. Nous recrutons ces étudiants lors des cours dans lesquels nous enseignons, en première et deuxième année d'école d'ingénieur. Comme nous pouvons faire passer plusieurs sujets à la fois et que les expérimentations durent environ une heure, nous les réalisons sur les pauses repas des étudiants ou en fin de journée.

Quelques sujets « experts » dans certains domaines d'ingénierie ou dans l'utilisation de technologies de réalité virtuelle serait également pertinents. Nous recruterons donc quelques participants au laboratoire G-SCOP dans les équipes CC (conception collaborative) et CPP (conception produit process).

Les sujets sont répartis aléatoirement sur l'environnement immersif ou sur l'environnement classique, de façon à ce que chaque environnement ait le même nombre total d'utilisateurs.

Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation en elle-même se déroule en 4 étapes.

PHASE 1 : PREPARATION

Les participants commencent par signer une notice d'information et de consentement éclairé qui explique le déroulement de l'expérimentation et stipule qu'ils ont compris en quoi consistait l'expérimentation et qu'ils peuvent se retirer à tout moment. Ensuite, ils répondent à un **questionnaire socio-démographique**, afin de connaître leurs connaissances en termes d'ingénierie et d'utilisation d'outils de visualisation immersive, et en particulier de leur utilisation de casques de réalité virtuelle. Ce questionnaire vise aussi à connaître leur avis sur ces technologies. Toutes les réponses sont anonymisées.

PHASE 2 : ENTRAINEMENT SUR UN PREMIER CAS D'ETUDE

Pour que les sujets prennent en main l'environnement, nous leur proposons un cas d'étude très simple : la revue de la conception d'un pendule inversé. Ils ont accès au modèle 3D, conçu sous SolidWorks, au modèle d'architecture, conçu sous Papyrus, et qui contient également les exigences, et du modèle de comportement, conçu sous SystemModeler.

Il est nécessaire que les vues proposées dans les captures d'écran pour ce premier cas d'étude soient les mêmes que celles proposées lors de la phase suivante. Pour l'environnement immersif, la question ne se pose pas dans la mesure où l'environnement est le même, quel que soit le système conçu.

Les utilisateurs utilisent le temps qu'il leur est nécessaire pour maîtriser les outils qu'ils ont à disposition. Comme pour la phase suivante à laquelle ils participent par la suite, on leur fournit une

série de quelques questions auxquelles ils doivent répondre pour s'habituer à l'exercice et comprendre le genre de question posée. En plus de ces questions, un document expliquant le processus suivi pour créer les modèles est mis à leur disposition. De plus, nous leur expliquons oralement le fonctionnement de l'environnement qu'ils doivent utiliser, ce qu'ils peuvent y voir, comment interagir avec. A ce stade, ils peuvent poser les questions qu'ils veulent, que ce soit sur les modèles, sur les questions posées, ou sur l'utilisation de l'environnement.

Cette phase se conclut par une évaluation, lors de laquelle on vérifie que les sujets réussissent à répondre correctement aux questions posées en discutant avec eux. Ils ne peuvent passer à la phase suivante qu'après avoir validé ce test, qui permet de nous assurer qu'ils maîtrisent suffisamment bien les outils que nous leur fournissons.

PHASE 3 : EXPERIMENTATION SUR LE CAS D'ETUDE DU TELESCOPE

L'objectif de l'étude est de vérifier la compréhension du système par les différentes parties prenantes. Pour cela, nous posons, 3 questions, auxquelles les utilisateurs doivent trouver la réponse grâce aux outils que nous leur mettons à disposition. Les questions n'ont pas de réponse évidente, ce qui permet d'avoir un nombre d'erreur variable. Les questions pour lesquelles sont attendues une liste de plusieurs éléments sont privilégiées, des éléments pouvant facilement être oubliés, rendant les réponses incomplètes. Les questions posées sont les suivantes.

- Quel est l'identifiant des exigences réalisées par le sous-assemblage « Support » ?
- Quel est le nom des fonctions auxquelles sont liés la partie prenante « PowerGrid » ?
- Quel est le nom des parties prenantes à l'origine de l'exigence « Req Manualy Pilot Inclination position » ?

Ces questions sont posées une à une, et les sujets ne peuvent répondre à la question suivante que s'ils ont fini de répondre à celle d'avant. Faire défiler les questions de cette manière nous permet d'éviter que les sujets ayant une bonne mémoire soient avantagés en ne quittant jamais leur environnement pour répondre correctement à toutes les questions simultanément, ce qui nous éloignerait d'un scénario classique de revue de conception pendant laquelle les ingénieurs procèdent de façon méthodique pour vérifier les points importants à aborder.

Ces questions s'accompagnent systématiquement d'une échelle de confiance (entre 1 et 7, de « *pas sûr du tout* » à « *parfaitement certain* »), pour que le sujet indique à quel point il est confiant dans la réponse qu'il vient de donner, comme l'ont fait par exemple Freeman et al. (2016) dans leur étude.

Comme pour le premier cas d'étude, ce sont les sujets qui décident du temps dont ils ont besoin pour répondre aux questions. Le temps étant une variable que l'on cherche à mesurer, il ne faudrait pas que nous l'imposions comme une contrainte. Cependant, pour que l'expérimentation dans son intégralité ne dure pas plus d'une heure, après 20 minutes, ils sont arrêtés (leur environnement est fermé), mais ont encore le droit de répondre sur le questionnaire s'ils pensent avoir la réponse. Notons que ces 20 minutes sont normalement suffisantes pour répondre aux trois questions. Ils peuvent également décider à n'importe quel moment d'abandonner sans répondre à l'ensemble des questions. Enfin ils peuvent encore poser des questions sur l'utilisation de l'outil lors de cette phase.

Après les 20 minutes pendant lesquelles ils répondent à 3 questions en ayant le droit de se servir de l'environnement qu'ils ont à disposition, ils disposent de 5 minutes supplémentaires pour explorer les données, avec la consigne de comprendre le système. A la suite de ces 5 minutes ils doivent, pour finir, répondre à trois nouvelles questions, plus orientées vers une compréhension générale, toujours en indiquant la confiance qu'ils ont en leur réponse. Ces trois nouvelles questions sont les suivantes :

- Quelles sont les parties prenantes du télescope ?
- Quels sont les sous-blocs logiques du système Télescope ?
- Quelles sont les parties prenantes du sous-système « MechanicalSubSystem » ?

L'objectif avec cette deuxième phase de l'expérimentation est de mesurer l'impact de l'environnement sur la compréhension globale. En effet, en posant des questions auxquelles les participants peuvent répondre à l'aide de l'environnement, nous mesurons à quel point il est pratique pour retrouver des informations dans une base de données. Bien que ce point soit a priori l'un des facteurs facilitant la compréhension, il est préférable de la mesurer avec cette deuxième série de questions.

PHASE 4 : QUESTIONNAIRES POST-EXPERIMENTATION

Lorsque le participant estime avoir répondu aux questions, la phase 3 prend fin. Quel que soit l'environnement, il doit alors répondre à un questionnaire System Usability Scale (SUS), un questionnaire proposé par Brooke (1996), pour connaître leur ressenti sur l'environnement utilisé. Ce questionnaire donne une note entre 0 et 100 qui permet de comparer plusieurs applications différentes. Le second questionnaire que nous leur soumettons est proposé par la NASA pour connaître la charge mentale d'une tâche, appelé NASA/TLX (Hart & Staveland, 1988), pour « Task Load Index ». Lui aussi note entre 0 et 100 la charge totale que représente la tâche proposée aux participants, calculée selon plusieurs critères.

Mesures

Lors de la phase 3, trois grandeurs sont mesurées. La première est la qualité des réponses données (justesse). L'évaluation compte les réponses attendues sous la forme d'une liste d'éléments de la façon suivante : une faute par élément manquant dans la liste donnée comme réponse, et une faute par élément donné qui n'est pas la liste attendue. Le but est de pénaliser les scores de ceux qui répondent des choses fausses (potentiellement en comptant sur le hasard pour donner la bonne réponse) et ceux qui ne répondent rien pour être sûr de ne pas faire d'erreur. Cette méthode n'est pas communiquée aux participants qui ne doivent pas se sentir jugés. La qualité de leurs réponses est donc la somme de leur note lors de la première série de questions (avec l'environnement pour chercher les réponses) et lors de la deuxième série (uniquement à l'aide de leur mémoire et de leur compréhension). La deuxième grandeur mesurée est la confiance des participants dans leurs réponses. Ce sont les participants eux-mêmes qui l'estiment pour chaque question, en cochant une case sur une échelle de 7 allant de « sûr de se tromper » à « sûr d'avoir raison ». En convertissant en chiffre, chaque participant obtient un score total entre 6 à 30 (de 6x1 à 6x5, 6 étant le nombre de questions). Enfin, sur cette tâche, on chronomètre, à la minute près, le temps qu'il faut à chaque participant pour répondre aux trois premières questions.

La 4^e phase de l'expérimentation mesure deux grandeurs complémentaires, grâce à des questionnaires : l'utilisabilité (SUS) et la charge cognitive (NASA/TLX).

Pour résumer, pour chaque participant sont mesurés :

- Q : la qualité des réponses aux 6 questions
- P : Le temps utilisé par le participant pour répondre aux 6 questions (performance)
- C : La confiance totale du participant dans ses réponses
- U : L'utilisabilité ressentie par l'utilisateur pour l'environnement qu'il a utilisé
- T : La charge cognitive ressentie par l'utilisateur pour répondre à la première série de question en moins de 20 minutes avec l'environnement qu'ils ont à disposition.

4.5.3 Réalisation, et analyse des résultats

Cette section, présente les résultats obtenus en suivant le protocole en commençant par analyser le profil des participants puis les résultats obtenus sur les deux environnements. Enfin, les résultats serviront à falsifier les hypothèses.

Réalisation : les participants

Les participants sont âgés de 20 à 46 ans, avec une moyenne de 26 ans. Ce public relativement jeune s'explique par le recrutement que nous avons fait, en passant par l'école de Génie Industriel. Par conséquent, la plupart sont en 1^e année (Bac +3), et ont donc environ 21 ans. Notons également que sur 33 participants, seulement 6 sont des femmes. Encore une fois, ceci s'explique par le milieu dans lequel ils sont recrutés, qui est peu féminisé.

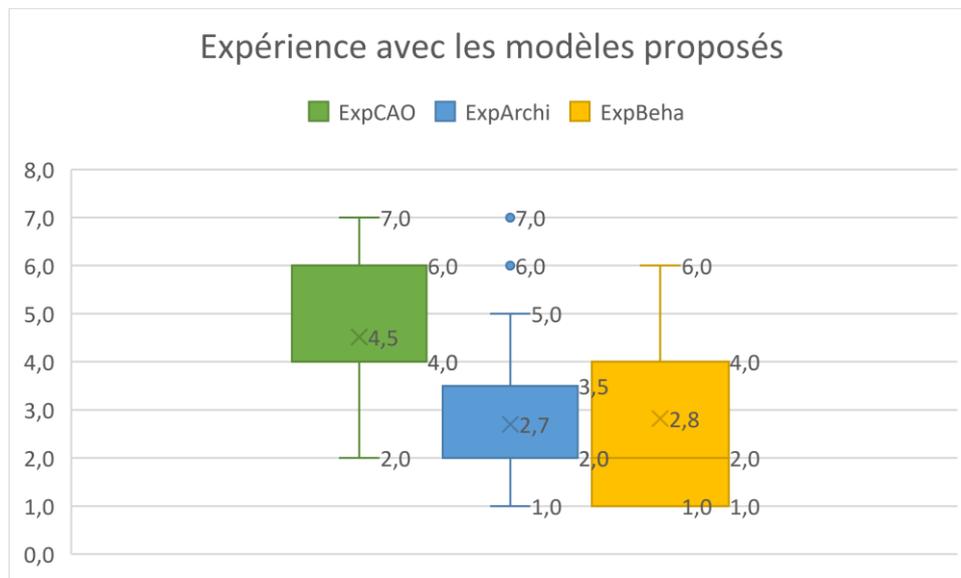


Figure 60 : Résultat de l'auto-évaluation des compétences des candidats avec l'utilisation des modèle CAO (en vert, à gauche), d'architecture (en bleu, au centre) et de comportement (en orange, à droite).

Si les participants estiment maîtriser correctement les modèles de géométrie 3D, ce n'est pas le cas, voire très peu le cas, pour les modèles d'architecture et de comportement (Figure 60). Pour rendre les résultats de l'expérimentation plus robustes, une meilleure répartition aurait été préférable, mais un profil qui est systématiquement centré autour d'un seul modèle n'est pas non plus mauvais, car dans les faits c'est ce type de personnes qui participent aux revues de conception : à l'aise sur la modélisation de leur vue, mais moins sur les autres. A noter que les questions posées dans l'expérimentation portent essentiellement sur le modèle d'architecture. Les participants n'étant souvent pas à l'aise avec ce modèle, nous pouvons avoir une idée intéressante de comment il est compris par des non-experts.

Les boîtes à moustaches Figure 60 qui nous permettent de comprendre la répartition des réponses. Les valeurs affichées sont les différentes bornes des quartiles. Nous affichons également la moyenne, représentée par la croix sur le graphique. Enfin, certaines valeurs très éloignées des autres sont indiquées par des points en dehors des boîtes à moustaches. Il est alors possible que ces valeurs soient considérées comme aberrantes en comparaison à toutes les autres pour lesquelles il faut alors se poser la question de les garder ou les exclure de l'analyse. Dans la suite, lorsque ces données seront exclues, ce sera clairement explicité.

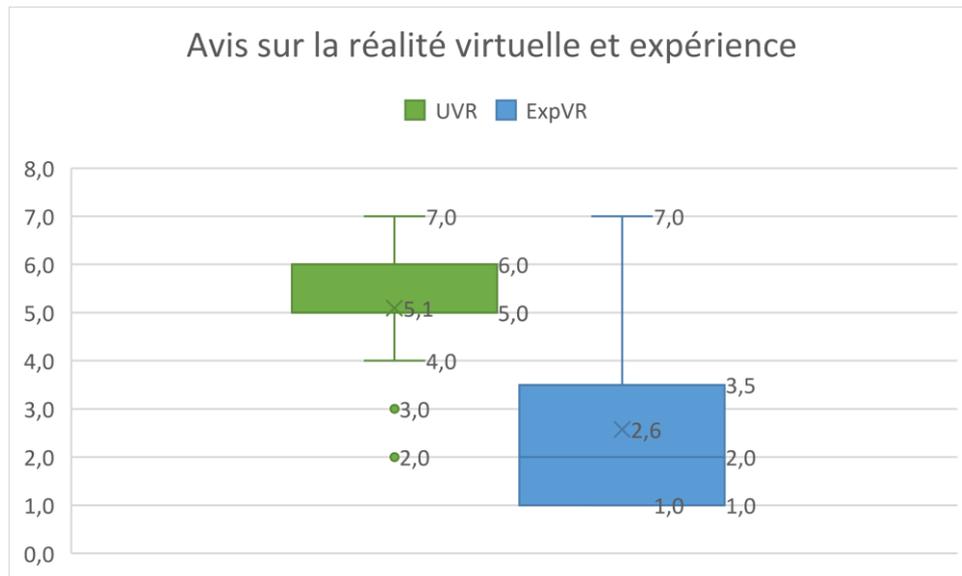


Figure 61 : Avis des participants sur les technologies de visualisation immersive (UVR, à gauche) et leur expérience dans leur utilisation (ExpVR, à droite)

Enfin, les participants d'indiquent leur avis sur l'utilisation d'outils de visualisation immersive et leur expérience (Figure 61). S'ils sont en grande majorité confiant dans le fait que cette technologie est utile, ils sont en revanche très peu initiés à son utilisation. Cette faible expérience peut avoir une influence sur les résultats de l'expérimentation, pour les sujets qui utilisent l'environnement virtuel pour répondre aux questions.

Analyse : Quel écart entre l'environnement immersif et la présentation ?

L'objectif ici est de comparer les différentes grandeurs mesurées dans le cas où c'est l'environnement immersif qui a été utilisé, et dans celui où ce sont les diapositives. Dans la suite nous noterons ces environnements respectivement Immersive Design Review (IDR) et Slides.

Qualité des réponses

Le « score » d'un participant est le nombre d'erreur qu'il a commis. Plus ce score est faible, meilleure est donc la qualité de la compréhension. La Figure 62 représente la qualité de compréhension du système avec l'utilisation de l'environnement immersif à gauche et avec la présentation à droite.

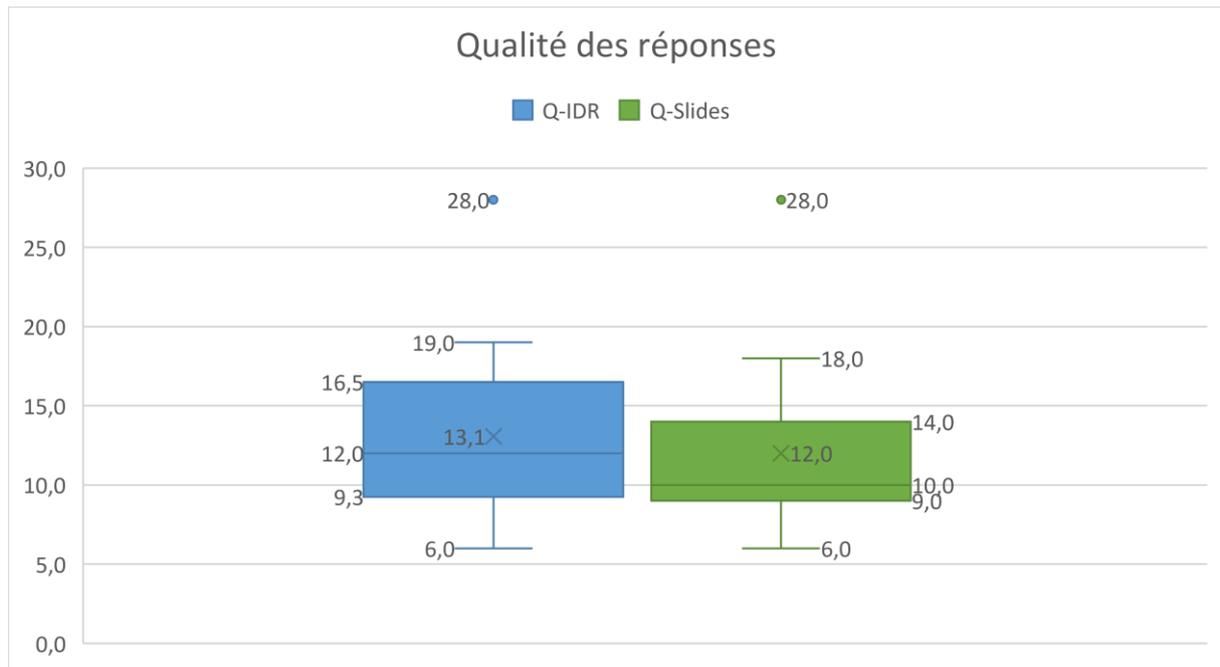


Figure 62 : Score représentant la qualité des réponses aux questions posées. Plus le score est élevé, plus le nombre de fautes commise est important.

Il n'y a pas de différence significative dans la qualité des réponses entre les participants ayant utilisé l'environnement immersif et ceux ayant utilisé les diapositives. On remarque tout de même une légère tendance à faire plus d'erreurs avec l'environnement IDR. Il faut toutefois nuancer cette tendance. En effet, pour la première série de questions, seulement 3 participants (2 avec l'IDR et 1 avec les Slides) ont un score que l'on peut considérer « aberrant », ayant fait 10 et 17 erreurs. En enlevant ces trois participants de nos résultats, les moyennes se retrouvent identiques et les deux répartitions sont très proches (Figure 63).

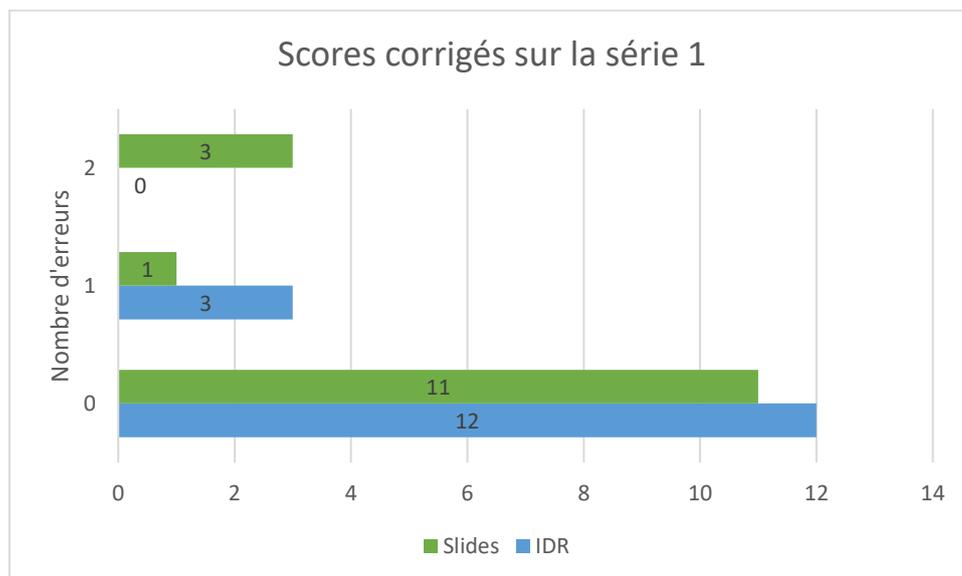


Figure 63 : Scores obtenus par les participants sur la première série de questions sans considérer les résultats aberrants

Ainsi 80% des participants qui utilisent l'IDR ne commettent aucune erreur (n=12) contre 73% (n=11) pour ceux qui utilisent les slides.

Confiance

Pour chaque question qui leur était posée, les participants doivent indiquer, sur une échelle allant de 1 à 7, à quel point ils sont confiants dans la réponse donnée. La confiance se calcule en sommant l'ensemble des indices de confiance qu'ils ont indiqués.

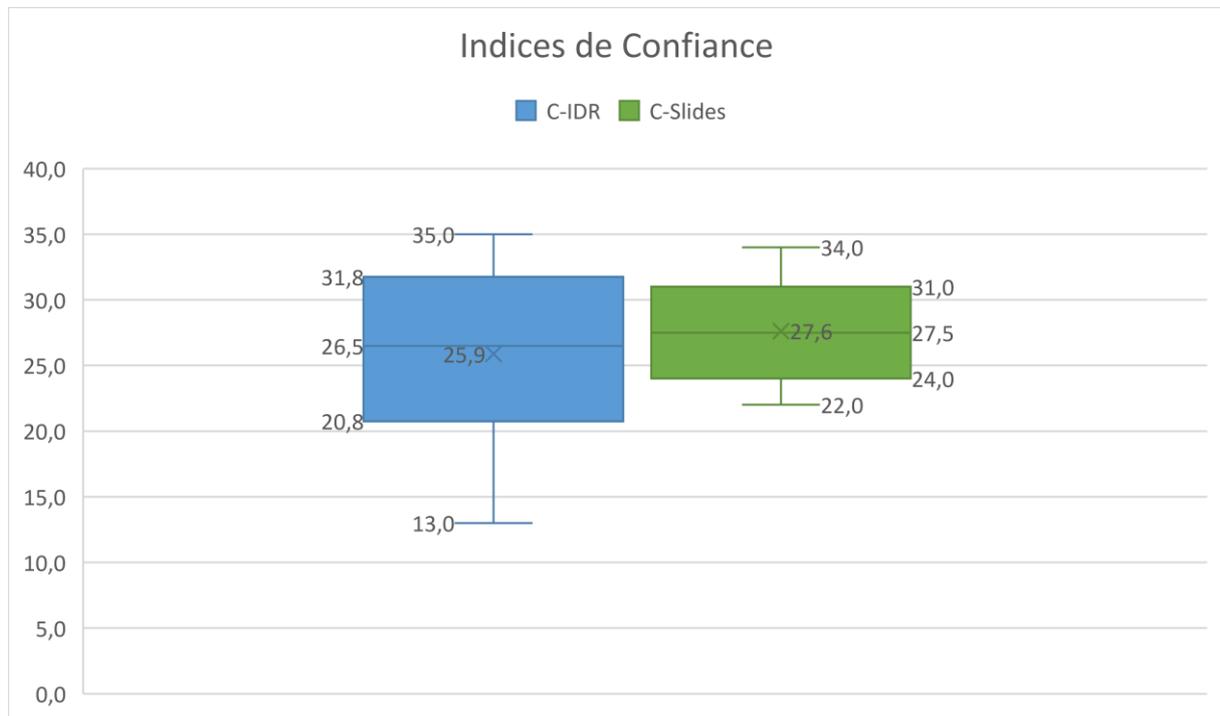


Figure 64 : Confiance dans les réponses données

Comme pour la qualité des réponses, les indices de confiance sont très proches, quel que soit l'environnement utilisé, même s'il apparaît que l'environnement pénalise cette confiance (Figure 64). Si nous entrons dans le détail, c'est sur la deuxième série de questions que l'écart se fait. En effet, les utilisateurs de l'environnement immersif indiquent alors une confiance moyenne de 8,7 contre 10,6 pour les utilisateurs de la présentation. Pour la première série, à nouveau en retirant les résultats loin des autres, c'est l'environnement virtuel qui permettrait une meilleure confiance, avec un score moyen de 18,3 (sur un maximum de 21) contre 17,1 pour les diapositives.

Temps passé dans l'environnement

Pour la première série de questions, les participants sont limités à 20 minutes de recherche dans l'environnement. Peu ont atteint cette limite, puisque seulement trois participants sur les 33 s'en sont servi, les trois utilisaient l'environnement immersif sans réussir à répondre à la dernière question. Pour ceux qui répondaient aux trois questions avant, ils pouvaient indiquer qu'ils avaient fini, et nous mesurons alors le temps qui leur a été nécessaire pour répondre. Les résultats sont représentés dans la Figure 65.

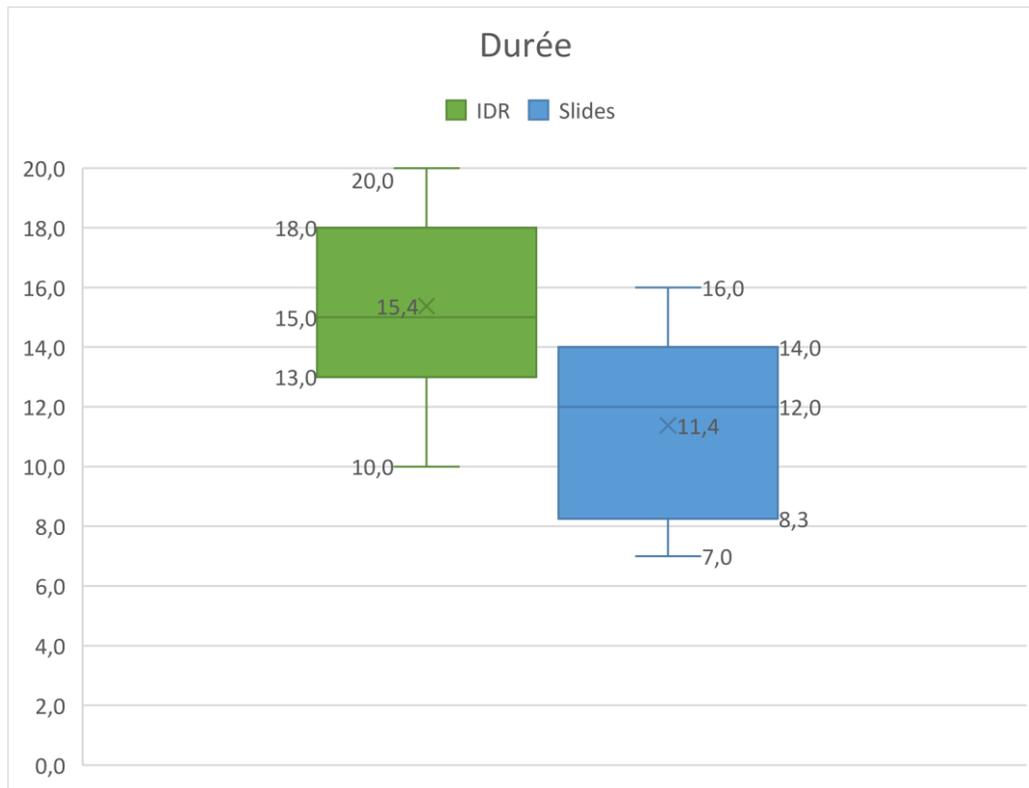


Figure 65 : Durée utilisée pour répondre à la première série de question

On observe une très nette différence entre les utilisateurs de l'environnement virtuel et ceux de la présentation : il semble être plus long de répondre avec l'environnement. Deux facteurs importants peuvent expliquer cette différence. D'abord, les participants n'ont qu'une expérience très limitée en ce qui concerne les technologies immersives. Il faut donc un temps non seulement pour comprendre l'application, mais aussi pour comprendre et prendre en main la technologie, ce qui n'est pas le cas pour la présentation. Une autre explication possible vient de l'expérimentation elle-même : les participants doivent répondre aux questions sur un écran d'ordinateur, et donc, dans le cas de l'utilisation de l'environnement, enlever le casque pour répondre, puis le remettre pour reprendre l'exploration. Ceci est d'autant plus valable lorsque les questions réclament plusieurs réponses, et que les utilisateurs font des allers-retours entre l'environnement et l'écran pour indiquer tous les éléments. Lorsque nous nous sommes rendus compte que cette perte de temps pouvait grandement influencer les résultats, nous avons commencé à la chronométrer, ce que nous avons réalisé sur 5 personnes. En moyenne, 2 à 3 minutes sont perdues, mais certains pouvaient perdre jusqu'à 5 minutes. Malheureusement, nous ne pouvons pas réellement quantifier cette perte de temps, à cause de la taille de l'échantillon, mais de fait, les temps pour les deux modalités sont donc plus proches.

Utilisabilité

En fin d'expérimentation, nous avons soumis aux participants deux questionnaires pour évaluer l'utilisabilité de l'environnement et la charge cognitive. L'utilisabilité est mesurée sur une échelle de 0 à 100 et calculée à partir de la réponse à 10 questions, plus la note est élevée, meilleure est l'utilisabilité. Les résultats obtenus sont représentés en Figure 66.

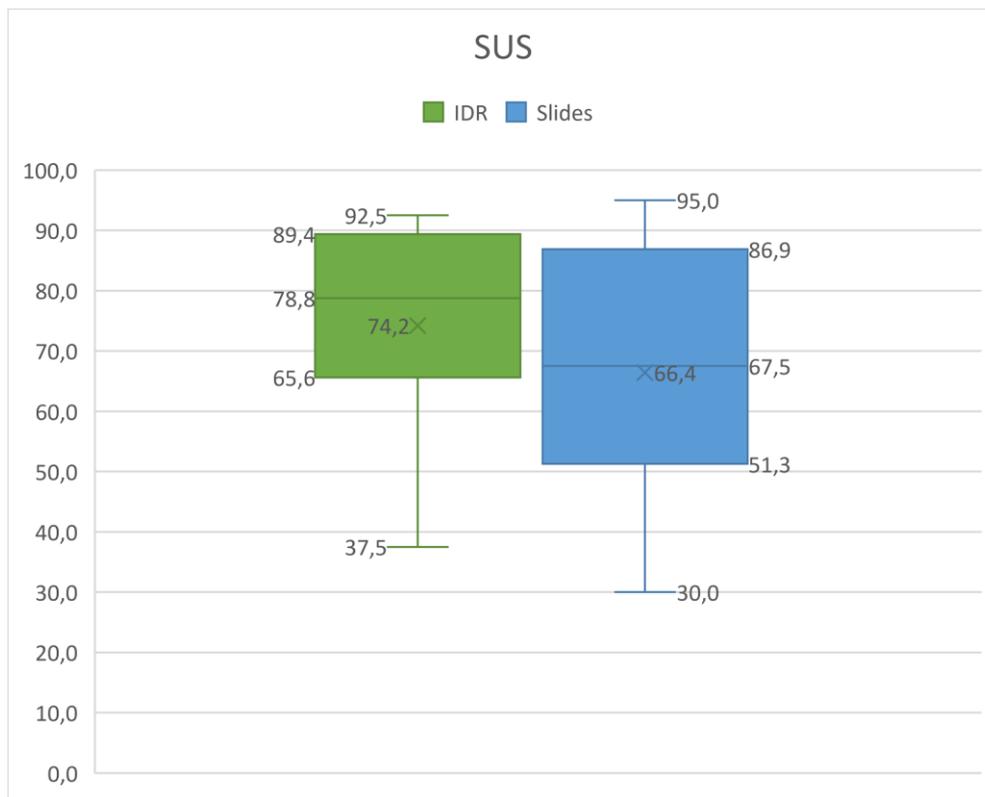


Figure 66 : Résultats du questionnaire SUS

L'utilisabilité mesure normalement « à quel point il est facile de se servir d'une application ou d'un environnement ». En ce qui concerne les diapositives, il est difficile d'être sûr de ce que mesure ce questionnaire. En effet, certaines questions comme « Les fonctionnalités de l'environnement étaient bien intégrées ? » ont laissé beaucoup de participant perplexes. Si l'utilisabilité semble sur la Figure 66 plus élevée pour l'environnement virtuel, il faut donc pondérer ce résultat. Toutefois, après maintenant plus de 30 ans d'existence, le questionnaire SUS a obtenu un grand nombre de retours, et certains proposent une classification des environnements en fonction du score moyen obtenu. Ainsi, d'après Bangor et al. (2009), une note moyenne de 74 correspond à une « bonne utilisabilité », et rentre dans la catégorie des utilisabilités « acceptables ». En revanche, une note de 66 entre dans la catégorie des environnements « OK », à la limite entre acceptable et non-acceptable. Ici l'IDR est alors clairement utilisable alors que les slides sont à la limite.

Charge cognitive ressentie

Le deuxième questionnaire cherche à mesurer la charge cognitive d'une tâche. En l'occurrence, nous précisons que la tâche évaluée est celle « de répondre, en moins de 20 minutes, aux trois premières questions, à l'aide de l'environnement qui est fourni ». A nouveau, à la fin de ce questionnaire, nous calculons une note entre 0 et 100. Plus cette note est élevée, plus la charge ressentie par l'utilisateur est élevée, et l'objectif est donc de la minimiser. Les résultats sont résumés dans la Figure 67.

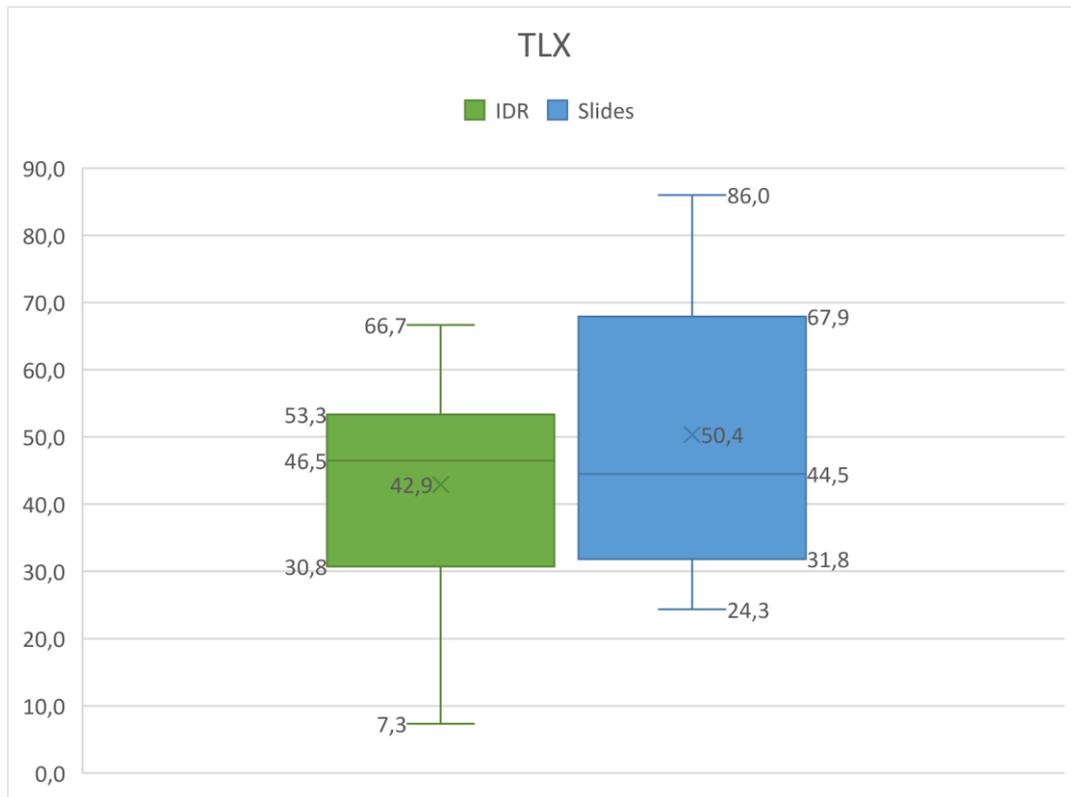


Figure 67 : Charge cognitive ressentie par les participants

Avec une moyenne de 42,9 contre 50,4, l'environnement immersif semble demander moins d'effort aux utilisateurs que la présentation de diapositives pour réaliser la même tâche. Ce résultat est d'autant plus valable que la qualité du résultat produit est très similaire (voir Figure 62).

4.5.4 Discussion

Nous pouvons résumer les résultats exposés dans cette section de la façon suivante.

- L'environnement utilisé n'a pas d'impact sur la qualité de la compréhension, ni sur la confiance des utilisateurs dans leur compréhension.
- Il est plus long de comprendre un système en passant par l'environnement virtuel.
- L'utilisabilité de l'environnement virtuel est bonne, alors que celle de la présentation n'est que « OK » sur l'échelle de Bangor et al. (2009).
- Les utilisateurs ressentent une charge cognitive moins importante s'ils utilisent l'environnement virtuel plutôt que la présentation.

Avec les résultats obtenus, nous pouvons porter un regard sur les hypothèses que nous avons énoncées plus haut. Celles portant sur la confiance, la durée et la qualité (H1, H2 et H3) ne sont pas validées par notre expérimentation puisque l'environnement immersif ne permet d'améliorer aucun de ces paramètres sans pour autant les détériorer. En revanche, celles portant sur l'utilisabilité et sur la charge cognitive sont vérifiées (H4 et H5).

Ces résultats ne sont que des tendances. En effet, aucun test statistique n'a été appliqué pour le moment sur les données. Même si ce que nous avons proposé jusque-là représente un pas vers une validation formelle de notre recherche, ce n'est pas encore suffisant pour comparer définitivement les environnements.

Ensuite, ici, nous avons comparé les grandeurs mesurées sur les participants ayant utilisé l'environnement immersif et ceux ayant utilisé la présentation. Nous pourrions étendre notre étude, et analyser l'impact de certains paramètres sur les résultats. Par exemple, quel est l'impact de l'âge sur la qualité des réponses dans l'environnement immersif ? Nous pouvons faire l'hypothèse qu'un public plus jeune, souvent plus habitué à l'utilisation de nouvelles technologies, peut avoir moins de difficultés à prendre en main l'application immersive. Le problème lors de ces analyses plus poussées est la taille des échantillons avec la prolifération des groupes nécessaires. Enfin, l'objectif de cette expérimentation est de répondre à la question de recherche que nous avons posée :

EST-CE QUE LA COMPREHENSION DE LA DEFINITION MULTIVUE D'UN SYSTEME EN COURS DE CONCEPTION BASEE SUR DES MODELES EST FACILITE PAR L'UTILISATION DE L'ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF PAR RAPPORT A UN ENVIRONNEMENT USUEL ?

A la lumière des résultats que nous obtenons, nous ne pouvons pas affirmer que notre environnement améliore la compréhension de la définition multivue d'un système en cours de conception basée sur des modèles, bien qu'elle ne la pénalise pas. En revanche, il semble plus simple de prendre en main l'environnement immersif que la présentation de diapositive et surtout la charge cognitive que représente cette tâche est moins élevée dans cet environnement. De plus, nous pouvons penser que dans quelques années, avec la démocratisation des technologies de réalité virtuelle, interagir avec un environnement comme le nôtre sera beaucoup plus naturel pour un public d'ingénieurs visé, et que certaines grandeurs peuvent alors évoluer, notamment le temps nécessaire pour répondre aux questions. Il est également possible que l'ajout de nouvelles fonctionnalités permettent une meilleure navigation dans l'environnement. Par exemple, un grand nombre de participants ont cherché des fonctions telles que « retour en arrière » ou encore « recherche par mot clé » que nous n'avions pas implémentées, notamment pour ne pas biaiser l'expérimentation, en fournissant deux environnements.

Enfin, il faut noter que l'environnement proposé dans ce chapitre est une proposition pionnière d'un environnement pour les revues MBSE. En effet, alors même que les têtes pensantes de l'ingénierie système comme la NASA (Weiland, 2021) ou l'INCOSE (INCOSE, 2021) prédisent que la réalité virtuelle est un élément constitutif de la vision futuriste de l'ingénierie système, les recherches en sont encore à leurs balbutiements. L'objectif premier de cette thèse est alors de montrer le bienfondé de la vision donnée par ces organismes et de s'appuyer sur la version beta de l'environnement virtuel pour spécifier de futurs axes d'amélioration en vue d'opérationnaliser ces techniques.

4.6 SYNTHÈSE

Dans ce chapitre nous avons proposé un démonstrateur fonctionnel, un cas d'application pour l'éprouver, et une expérimentation. Ces éléments font partie d'un benchmark qui a pour objectif de permettre des comparaisons entre différentes solutions pour réaliser des revues MBSE dont le but est de comprendre la définition multivue d'un système en cours de conception. Il est à noter que la base de données de ce cas d'étude est stockée dans un graphe. Ce choix permet de faciliter son adaptation à de nombreux modèles et à diverses modifications.

Les résultats de l'expérimentation montrent que la solution proposée dans la section 4.4 ne permet pas nécessairement d'améliorer la compréhension sans la dégrader, mais permet d'améliorer les

conditions dans lesquelles les utilisateurs comprennent le système, puisqu'ils ressentent une charge cognitive moins importante, et qu'ils évaluent l'utilisabilité de l'application comme étant « bonne ».

Avec le temps, cette même expérimentation, sur les mêmes environnements, risque de voir les résultats évoluer. En effet, les technologies immersives et leurs usages se démocratisent. Si aujourd'hui nos participants n'avaient qu'une expérience très limitée en ce qui concerne l'utilisation de ces technologies, il est possible que ce soit bien différent dans quelques années. Cette expérience peut alors permettre d'améliorer certaines grandeurs mesurées, comme le temps nécessaire à la compréhension, ou encore la confiance. Cependant, elle peut aussi avoir des effets négatifs sur d'autres, comme la charge cognitive, qui est peut être aujourd'hui boostée par une attirance pour une technologie nouvelle, ou encore sur l'utilisabilité, si les métaphores qui s'imposeront ne correspondent pas à celle que nous avons utilisées.

Enfin, dans ce chapitre nous avons essayé de valider la troisième étape du carré de validation, en validant par l'expérimentation, formellement, que l'environnement permettait d'améliorer la compréhension de la définition multivue d'un système en cours de conception, ce que nous n'avons pas pu réellement conclure, bien que certains paramètres soient encourageants. De plus, nous avons supposé que l'environnement permette également de faciliter le maintien de la cohérence du système, ce qui n'a pas été testé dans cette expérimentation. Une nouvelle étape pour valider ce deuxième point sera encore nécessaire.

CHAPITRE 5. UN PROCESSUS OUTILLE DE VERIFICATION ASSISTE PAR ORDINATEUR

Dans le chapitre 3, trois objectifs ont été dégagés. Le précédent, s'est concentré sur les objectifs 1.1 et 1.2. Dans celui-ci, c'est l'objectif 2 qui est abordé, soit comment améliorer l'efficacité de la vérification.

Pour apporter des éléments de réponses à cet objectif, nous commencerons par faire un retour sur la littérature, en approfondissant les notions déjà abordées dans le chapitre 2. Ensuite, en se basant sur l'expression du besoin détaillée dans le chapitre 3, nous proposons un processus pour la vérification de système complexe, que nous utiliserons dans un second temps, en s'appuyant sur un cas d'étude. Enfin, nous concluons sur la validité des résultats que nous apportons dans ce chapitre.

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1 | La vérification d'après la Property Model Methodology | 91 |
| 5.2 | Proposition d'un processus de vérification assistée par ordinateur..... | 94 |
| 5.2.1 | La vérification dans le processus de conception | 94 |
| 5.2.2 | La co-simulation d'un modèle de solution et d'un modèle de spécification | 96 |
| 5.2.3 | Une visualisation immersive du comportement | 97 |
| 5.2.4 | L'humain dans la boucle de simulation | 100 |
| 5.2.5 | De véritables composants dans la simulation | 101 |
| 5.2.6 | Synthèse | 102 |
| 5.3 | Un cas d'étude pour appuyer notre proposition | 102 |
| 5.4 | Vers une augmentation progressive du réalisme..... | 104 |
| 5.4.1 | Implémentation de la PMM | 105 |
| 5.4.2 | Un environnement virtuel pour visualiser le comportement | 105 |
| 5.4.3 | Implémentation d'interactions avec le système virtuel..... | 106 |
| 5.4.4 | Intégration de composants physiques | 109 |
| 5.5 | Validation de la proposition et discussions | 110 |

5.1 LA VERIFICATION D'APRES LA PROPERTY MODEL METHODOLOGY

L'INCOSE décrit quatre approches pour vérifier qu'un système satisfait aux exigences (INCOSE et al., 2015). Parmi celles-ci, il y a l'inspection visuelle, la démonstration avec un prototype fonctionnel, et le test sur banc d'essai. Toutes ces méthodes nécessitent la réalisation d'un premier prototype, contrairement à l'analyse dont les calculs analytiques ou numériques permettent une vérification au plus tôt avec des coûts et délais significativement réduits.

La méthode Property Model Methodology (Micouin, 2014) propose des activités de vérification analytique qui consistent à co-simuler des modèles de spécification avec des modèles de conception. Le modèle de spécification supervise le modèle de conception pour s'assurer que celui-ci satisfait aux exigences spécifiées (Figure 68).

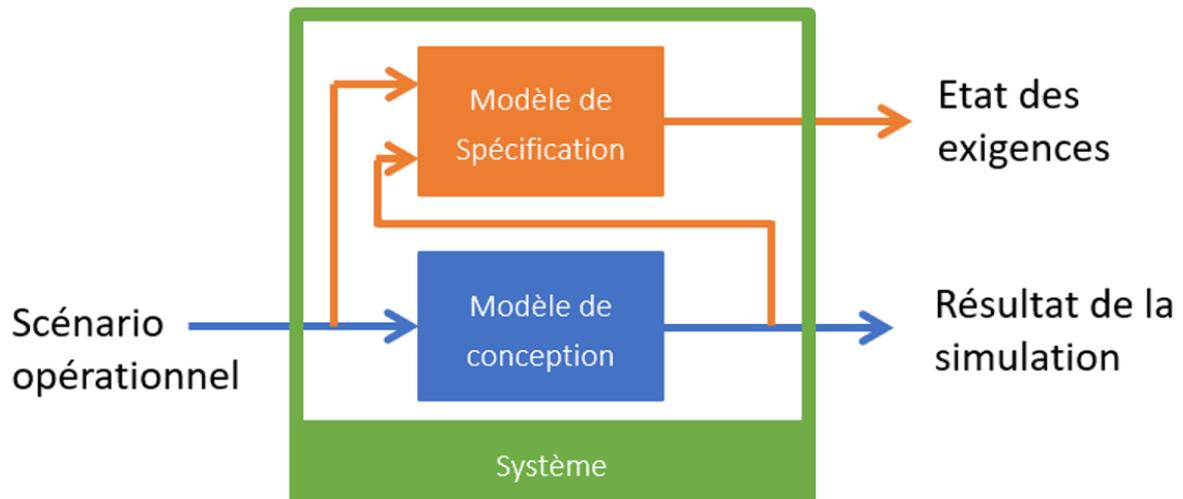


Figure 68 : Co-simulation d'un modèle de conception et d'un modèle de spécification

PMM se base sur une expression formelle des exigences, la théorie des Property-Based Requirements (PBR) (Micouin, 2008). Les PBR permettent de tester si un système produit bien les effets attendus quand un ensemble de conditions sont réunies. Cela se traduit formellement par une relation d'implication entre l'ensemble des effets attendus et l'ensemble des conditions dont l'état alimente une assertion logique (Figure 69). La table de vérité d'un PBR est donnée ci-dessous.

| Conditions | Effets attendus | Assertion | Sémantique |
|------------|-----------------|-----------|--|
| Vraie | Vraie | Vraie | Les conditions d'applicabilité de l'exigence sont réunies et les effets attendus aussi, donc l'exigence est évaluée et satisfaite par la conception |
| Vraie | Faux | Faux | Les conditions d'applicabilité de l'exigence sont réunies et les effets attendus non, donc l'exigence est évaluée et non satisfaite par la conception. |
| Faux | Vraie ou Faux | N/A | Les conditions d'applicabilités de l'exigences ne sont pas réunies, donc l'exigence n'est pas évaluée. |

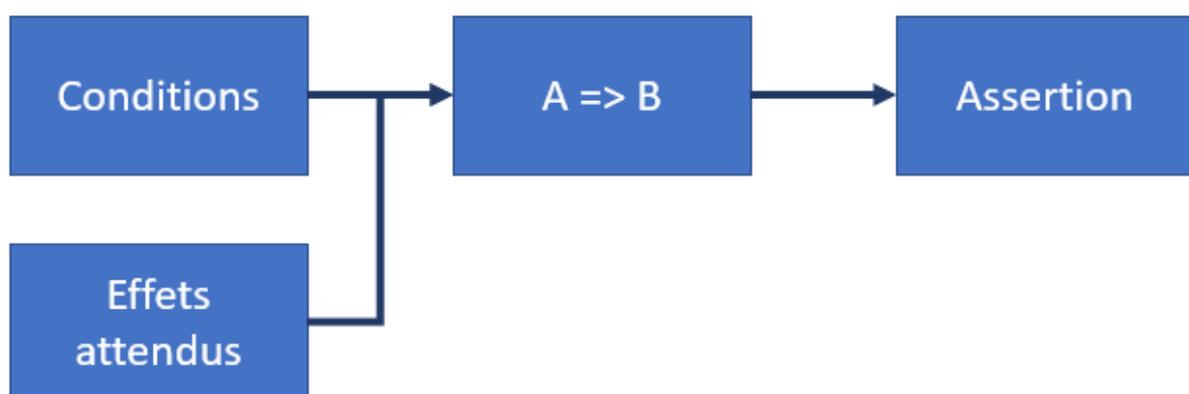


Figure 69 : Expression d'une exigence

L'implémentation des PBRs et des exigences basées sur la simulation de manière plus générale nécessite de choisir un langage de modélisation exécutable. L'un des langages les plus utilisés est

Modelica⁴⁴. Dans le cadre du projet Model Driven Physical System Operation (MODRIO⁴⁵), différents groupes de recherche ont développé des extensions au langage Modelica (Buffoni & Fritzson, 2015; Nguyen, 2014) pour modéliser des PBRs pouvant être simulés. Ce projet a également permis de démontrer la faisabilité que ce soit pour des systèmes électriques (Nguyen, 2014), aéronautiques (Kuhn et al., 2015; Pinquié et al., 2016) ou ferroviaires (Schamai et al., 2011). Enfin, une librairie Modelica de modélisation des PBRs a été proposée par Otter et al. (2015).

Si Modelica est un langage très utilisé pour la simulation de systèmes techniques, ce n'est pas le seul, et ce n'est donc pas le seul à avoir été utilisé pour implémenter des PBRs. VHDL-AMS (Micouin, 2013) et MATLAB/Simulink (Micouin et al., 2018) sont aussi des moyens pour implémenter des PBRs. Dans ce dernier article, les auteurs appliquent la PMM à la conception du train d'atterrissage d'un hélicoptère. Ils commencent par formaliser les exigences comme des PBRs (Figure 70) qui, aujourd'hui, s'apparente à la nouvelle « requirements toolbox »⁴⁶ dans la suite logicielle MathWorks.

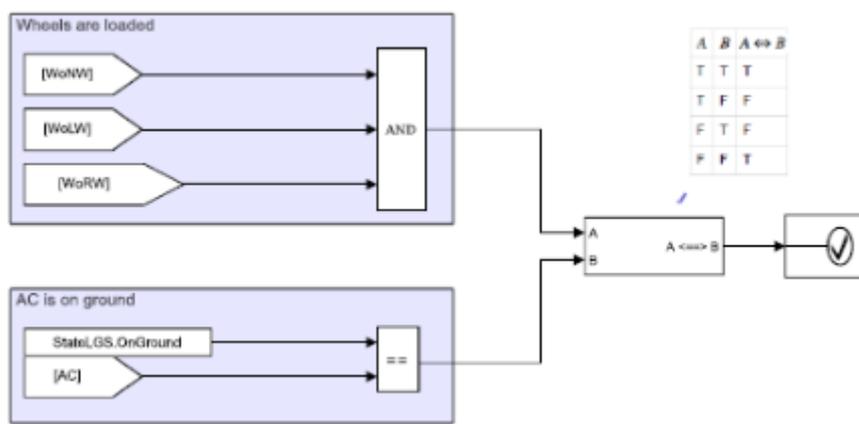


Figure 70 : Expression d'une exigence du train d'atterrissage, extraite de Micouin et al. (2018)

La vérification du modèle de conception du train d'atterrissage repose alors sur la co-simulation du modèle de spécification contenant plusieurs PBRs identiques à ceux de la Figure 70, et un modèle de conception du train d'atterrissage. Pour valider et vérifier le système au plus tôt, ils conviennent l'utilisateur final – un pilote d'essai – à opérer les scénarios opérationnels du train d'atterrissage via un cockpit virtuel limité au train d'atterrissage (Figure 71). Cela permet, d'une part, de valider le système – i.e. s'assurer que le système virtuel opéré par le pilote d'essai correspond bien à son besoin (tacite) – et, d'autre part, de vérifier le système – i.e. s'assurer que le modèle de conception satisfait bien aux exigences du modèle de spécification quand tous deux sont stimulés par les scénarios opérationnels joués par le pilote.

⁴⁴ <https://modelica.org/> - Consultée le 18/05/2022

⁴⁵ <https://itea4.org/project/modrio.html> - Consultée le 19/05/2022

⁴⁶ <https://fr.mathworks.com/products/requirements-toolbox.html> - Consultée le 31/05/2022

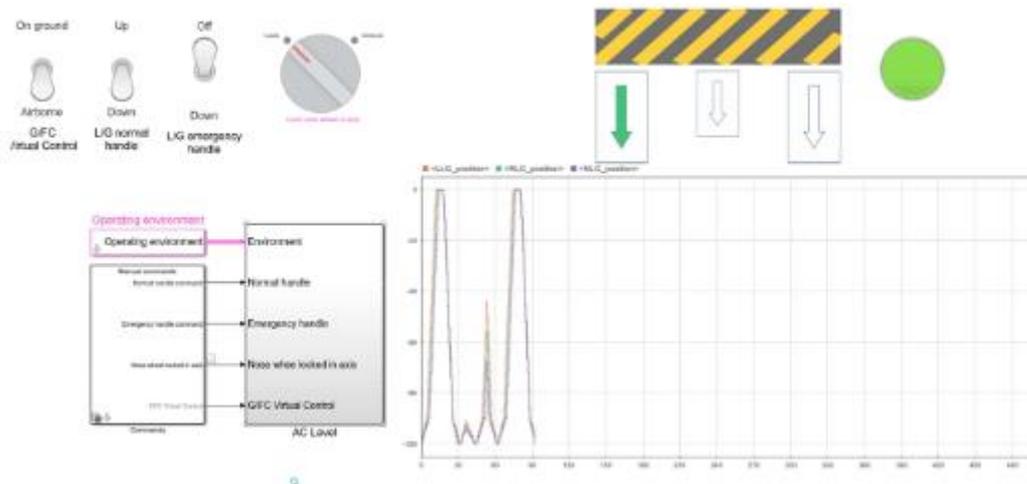


Figure 71 : Interface pour la vérification d'un train d'atterrissage d'hélicoptère (Micouin et al., 2018)

Si cette méthode, implémentée avec la suite logicielle MathWorks, permet de détecter, au plus tôt, des erreurs de spécification et de conception, elle possède tout de même des limites. En ce qui concerne la visualisation, c'est une animation qui pourrait être plus réaliste pour mieux apprécier les propriétés structurelles et comportementales du système.

La visualisation n'est pas la seule limite de cette proposition. Les interactions avec le système sont, elles, encore moins réalistes car limitées à des clics via une souris ou un écran tactile (Figure 71), ce qui n'est pas représentatif du comportement de l'utilisateur en conditions réelle d'utilisation.

Ces deux limites peuvent donc altérer le jugement des parties prenantes utilisatrices et réalisatrices du système. Dans la suite, nous proposons donc d'améliorer l'aspect visuel et interactif de l'outillage de cette méthode pour valider et vérifier le système dans des conditions opérationnelles plus réalistes. Dans un second temps, nous essayerons de se passer progressivement des blocs de simulation pour les remplacer par des composants réels, améliorant ainsi le réalisme de comportement du système.

5.2 PROPOSITION D'UN PROCESSUS DE VERIFICATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR

Pour répondre à l'analyse du besoin (Chapitre 3), un processus de vérification assistée par ordinateur qui repart des activités de la méthode PMM est proposé. A ce stade, il est donc nécessaire de disposer d'une définition préliminaire des propriétés structurelles (un modèle CAO) et comportementales (une simulation système) et du ou des modèles de spécification regroupant l'ensemble des exigences validées.

5.2.1 La vérification dans le processus de conception

Comme évoqué dans la section précédente, si la PMM permet d'améliorer la vérification de systèmes grâce à son caractère formel, le manque de réalisme dans la visualisation du comportement et dans la génération des sollicitations peuvent être la source d'erreur de vérification (oublis de cas tests, mauvaise appréciation des propriétés physiques et comportementales, etc.). La littérature montre qu'il est possible d'augmenter ce niveau de réalisme par l'utilisation d'outils de visualisation et d'interaction immersive ou encore par la mise en place de simulations « Hardware-In-The-Loop » (HIL). Les simulations HIL intègrent des composants réels dans la boucle de simulation afin de s'affranchir des hypothèses de modélisation et des erreurs numériques. Toutefois, comme pour une vérification sur des bancs d'essais après des mois ou des années de développement, la vérification repose toujours

sur l'interprétation d'énoncés d'exigences textuelles, souvent ambigus ou incorrects, vis-à-vis des résultats de simulations HIL. Or, les approches de vérification analytique basées sur la co-simulation de modèle de spécification et de conception ont montré qu'il était possible de s'affranchir de ces interprétations et de vérifier formellement la conception et l'implémentation d'un système vis-à-vis de spécifications. C'est pourquoi nous proposons de conserver le concept de vérification par co-simulation et de l'inscrire dans un processus qui repose sur un continuum virtuel-réel dans lequel le niveau de réalisme augmente progressivement.

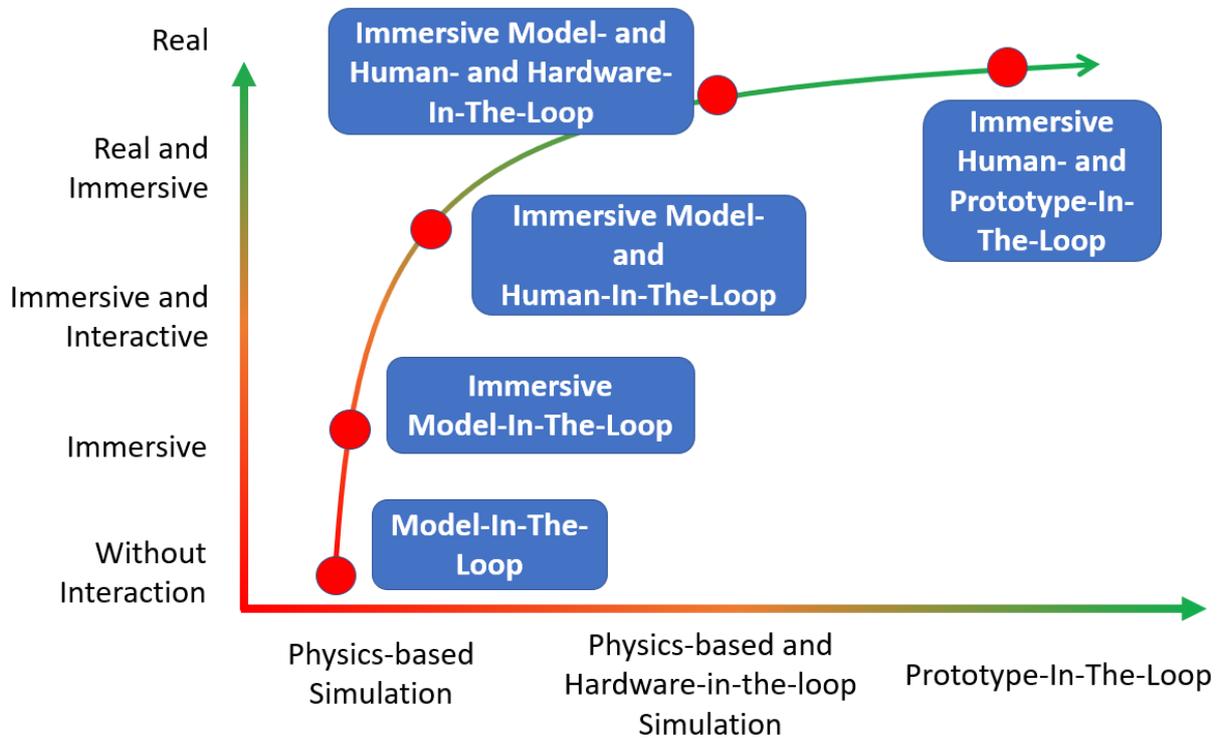


Figure 72 : Le processus de vérification assisté par ordinateur centré utilisateur dans un continuum virtuel-réel

Nous distinguons deux façons d'augmenter le réalisme : l'augmentation du réalisme visuel et interactif dans l'interface utilisateur/système (en ordonné sur la Figure 72) et l'augmentation du réalisme du comportement, en abscisse.

En ce qui concerne le visuel, l'augmentation de son réalisme débute par l'immersion stéréoscopique de l'utilisateur dans un contexte opérationnel à partir duquel il est possible d'appréhender les propriétés physiques et comportementales du système supervisé par le modèle de spécification (Immersive Model-In-The-Loop). Puis nous augmenterons le réalisme des interactions, en ajoutant l'utilisateur dans la boucle de simulation (Immersive Model- and Human-In-The-Loop), pour stimuler le système tel qu'il le ferait avec un système réel. Enfin, en remplaçant progressivement les modèles de conception par des composants réels (Immersive Model-, Human-, and Hardware-In-The-Loop jusqu'à Immersive Prototype-In-The-Loop), il est possible de s'affranchir des hypothèses de modélisation pour une vérification qui s'approche du test sur banc d'essai avec des modèles de spécification qui remplacent la lecture d'exigences de cas tests.

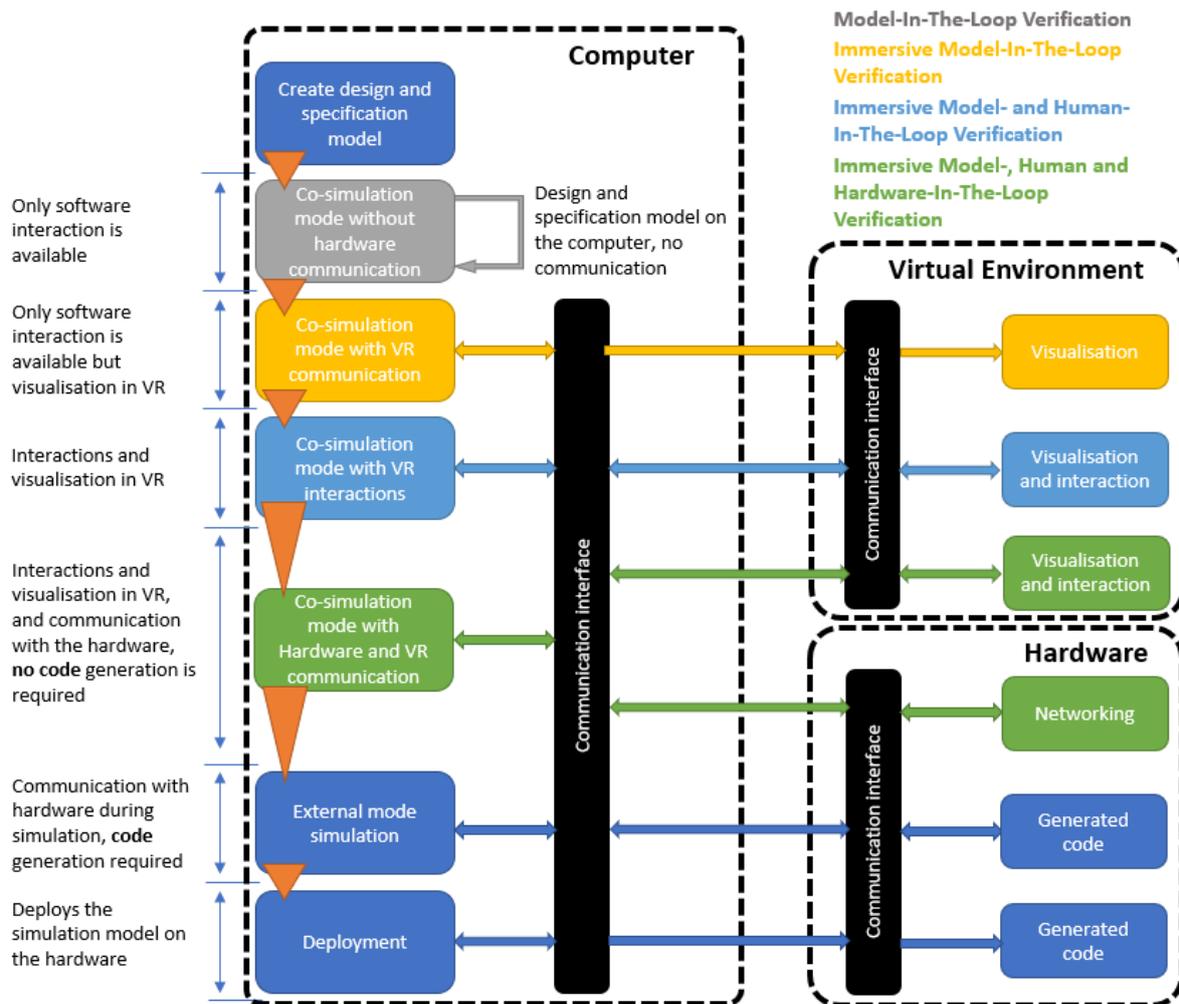


Figure 73 : Insertion du processus de vérification assisté par ordinateur dans une démarche de conception basée sur des modèles

La Figure 73 montre l'insertion de ce processus outillé dans une démarche de conception plus large, sans représenter l'architecture de l'environnement développé dans la suite de ce chapitre. La suite de cette section explique comment mettre en place techniquement cette augmentation du réalisme, qu'un cas d'étude illustre dans la suite de ce chapitre.

5.2.2 La co-simulation d'un modèle de solution et d'un modèle de spécification

Le processus commence par une vérification dite « Model-In-The-Loop », basée sur les méthodes de vérification par co-simulation d'un modèle de conception et d'un modèle de spécification comme la PMM (Micouin, 2014). Cette phase nécessite l'utilisation d'un logiciel de simulation pour simuler la conception du système conçu mais aussi pour modéliser les exigences dans un modèle de spécification. Ici, MATLAB/Simulink lequel a déjà été utilisé pour mettre en place cette méthode (Micouin et al., 2018) est préféré, mais il est aussi possible d'en utiliser d'autres comme ceux basés sur le langage Modelica (Pinquié et al., 2016). Les conceptions du système et des sous-systèmes sont alors supervisées par des modèles de spécification lesquels vérifient, en comparant les entrées et les sorties de la simulation. Il est donc sous-entendu que ces modèles de spécification sont conçus et validés au préalable, lors de revues dédiées. Cette implémentation est résumée par la Figure 74.

La vérification consiste à simuler des scénarios prédéfinis, c'est-à-dire que les entrées du système sont un ensemble de sollicitations prévues à l'avance. Le modèle de spécification de chacun des sous-

Le système vise alors à s'assurer que les sorties correspondent bien à ce qui est prévu lors d'une telle sollicitation. En sortie, chaque exigence peut être dans trois états différents : non-testé, validé ou falsifiée.

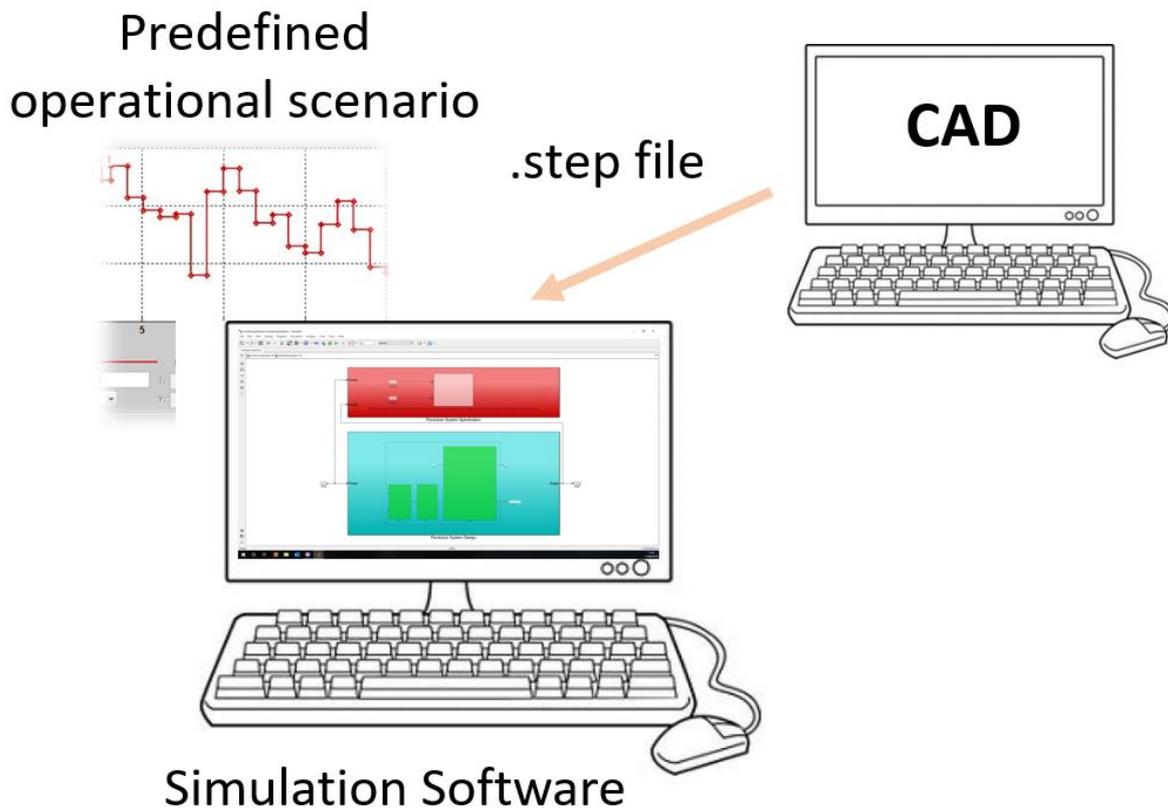


Figure 74 : Model-In-The-Loop Verification

Limites

Si cette méthode permet de s'assurer formellement, tôt dans le processus de développement, du respect des exigences par la conception, son niveau de réalisme est pauvre. En effet le retour visuel en sortie de simulation se résume, au mieux, à une image 2D animée, éventuellement en couleur, et le plus souvent à des graphiques, comme sur la Figure 85, pour le cas d'étude qui illustre la proposition. Ce faible niveau de réalisme ne permet alors pas à l'utilisateur d'appréhender avec fidélité les propriétés physiques et dynamique du système. De plus les stimulations du système se limitent à des scénarios prédéfinis sans aléas.

5.2.3 Une visualisation immersive du comportement

Pour augmenter le réalisme lors de la vérification, il est possible d'immerger l'utilisateur dans un contexte opérationnel afin de mieux apprécier les propriétés du système. Si rien ne change en termes de sollicitation, le résultat de la simulation n'est cette fois plus affiché sur un écran 2D mais en 3D stéréoscopique.

Pour intégrer l'utilisation de la réalité virtuelle dans cette boucle de simulation, il faut coupler le logiciel dans lequel la co-simulation du modèle de spécification et du modèle de conception est effectuée avec un moteur de rendu qui permettra de visualiser le résultat de cette simulation. Il existe pour cela plusieurs méthodes, qui possèdent toutes des avantages et des inconvénients.

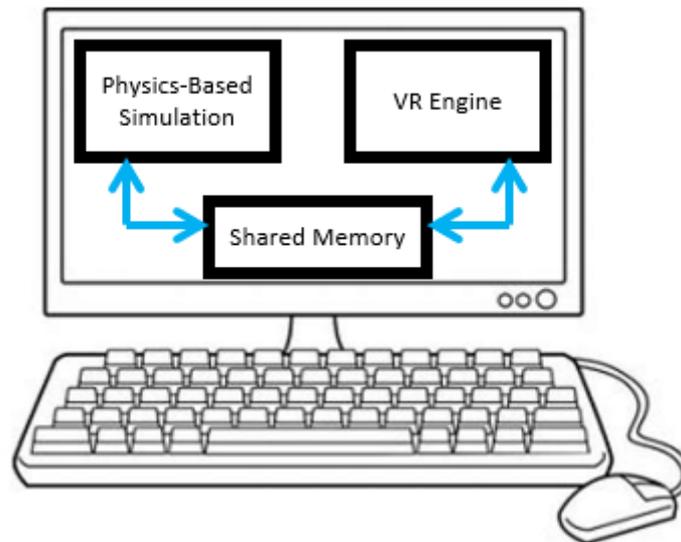


Figure 75 : Couplage d'un logiciel de simulation et d'un moteur de rendu par une mémoire partagée

Il est par exemple possible d'utiliser une mémoire partagée (Figure 75), comme le font Andaluz et al. (2016) pour visualiser le comportement d'un robot simulé dans leur cas dans Simulink et visualisé en réalité virtuelle grâce à Unity3D. Un avantage de cette méthode est la séparation entre les deux logiciels, qui permet d'en modifier un sans impacter l'autre. Un autre avantage est le besoin d'une seule machine. Cependant, ce qui peut être un avantage peut aussi être un inconvénient. En effet, la simulation et la visualisation sont réalisés par la même machine, ce qui peut demander des ressources de calculs élevées. De plus, il faut être à l'aise avec l'utilisation de la mémoire d'un ordinateur pour être certain de ne pas impacter d'autres processus de la machine.

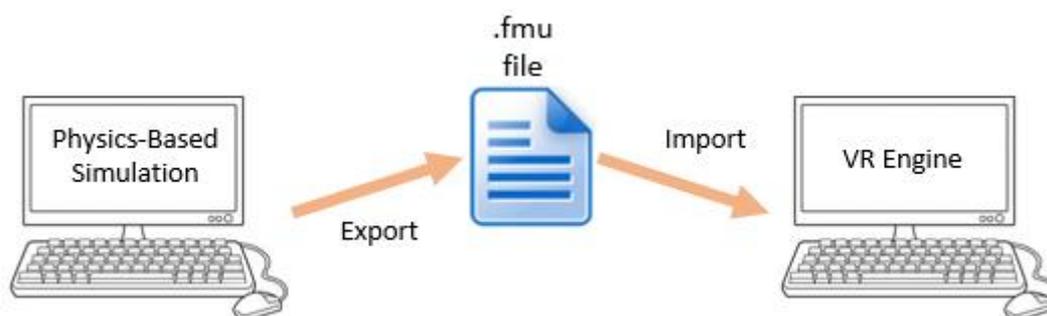


Figure 76 : Couplage d'une simulation avec un moteur de rendu grâce à des modèles standardisés

Une autre solution est l'utilisation du standard d'échange FMI⁴⁷ (Figure 76) qui permet de générer des Functional Mock-Up Units (FMUs). FMI est un format standardisé pour représenter un modèle comportement, comme l'est le format STEP pour les modèles CAO par exemple. Dans ce cas, il faut exporter une FMU depuis le logiciel de simulation et l'importer dans le moteur de rendu. Comme pour la solution précédente, il est possible de n'utiliser qu'une seule machine. De plus, l'utilisation de fichiers standardisés permet de toucher un public plus large, d'utiliser a priori un plus grand nombre de logiciels différents. Cependant, ce format engendre une perte de certaines informations, et certains logiciels permettent d'exporter uniquement des versions obsolètes de ce type de fichier. Si leur

⁴⁷ <https://fmi-standard.org/> - Consultée le 30/08/2022

utilisation semble alors plus judicieuse dans le futur, ce n'est pas une solution actuellement viable pour les activités proposées dans cette thèse.

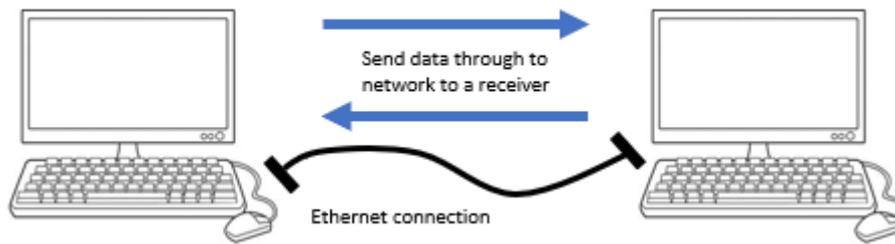


Figure 77 : Couplage d'un logiciel de simulation avec un moteur de rendu grâce à l'envoi et la réception de "sockets"

La dernière solution envisagée est le partage d'informations en temps réel par communication réseau entre deux machines (Figure 77). Il existe alors deux protocoles de communication : le TCP/IP et le UDP. Dans le premier cas, l'expéditeur attend systématiquement un accusé de réception de la part du receveur avant d'envoyer une nouvelle information. De cette façon, il est certain que les données reçues par la cible sont correctes et à jour, mais cela ralentit également l'envoi de données mises à jour. Dans le second cas, avec le protocole UDP, l'expéditeur ne se soucie pas de ce que reçoit sa cible. L'envoi peut alors être beaucoup plus fréquent et rapide, mais il est impossible d'être certain que la cible reçoit toujours la bonne information complète.

C'est cette dernière solution qui est proposée dans cette thèse pour répartir les calculs sur deux machines et pour communiquer de la façon la plus fluide possible entre les deux postes. Il est alors nécessaire que les sorties de la simulation (position des objets 3D) soient envoyées à un second poste de travail qui se charge de les afficher (Figure 78). Il est également nécessaire d'importer les modèles de géométrie dans ce second logiciel.

Il existe plusieurs logiciels capables de créer et d'animer des scènes virtuelles qui supportent l'utilisation d'outils de visualisation immersive. Ici nos applications sont conçues avec Unity3D⁴⁸. En ce qui concerne les dispositifs physiques, divers moyens permettent d'immerger un utilisateur dans ces scènes virtuelles, que ce soit par des CAVE (un ensemble d'écrans stéréoscopiques) ou encore par des casques de réalité virtuelle Head Mounted Display (HMD). Dans cette thèse c'est ce second choix qui est exploré car ce sont des dispositifs peu coûteux et qui nécessitent peu d'adaptation matérielle, il est possible de s'en servir dans une salle de travail classique.

Avec l'ajout de l'immersion pour visualiser le résultat de la simulation, le comportement du système peut non-seulement être supervisé par le modèle de spécification mais aussi apprécié par l'utilisateur dans un contexte opérationnel. Il peut ainsi, par exemple, détecter des cas d'usages qui n'ont pas été anticipés.

⁴⁸ <https://unity.com/> - Consultée le 26/08/2022

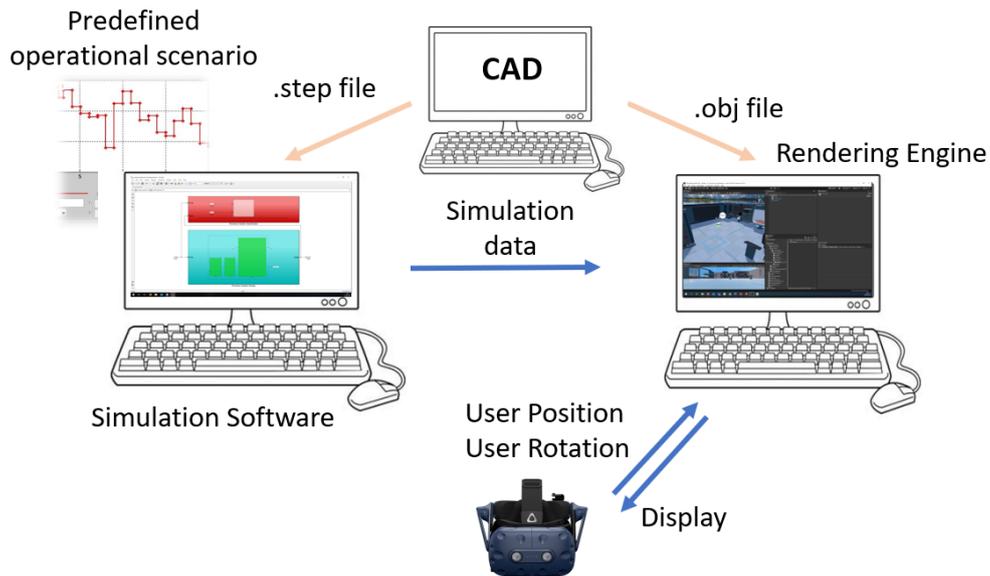


Figure 78 : Immersive Model-In-The-Loop Verification

Limites

Toutefois, si la visualisation immersive permet une compréhension plus intuitive du fonctionnement du système, de ses dimensions, de ses positions dans l'espace ou encore de ses formes, les tests réalisés pour s'assurer du respect des exigences ne sont que des scénarios prédéfinis, lesquels simulent des situations bien identifiées en amont. Pourtant, lors du fonctionnement d'un système, de nombreuses sollicitations aléatoires peuvent intervenir, notamment dues à l'utilisateur de ce système.

5.2.4 L'humain dans la boucle de simulation

Pour se passer des scénarios prédéfinis, il est possible d'ajouter l'humain dans la boucle de simulation pour que les entrées du système ne soient plus des scénarios prédéfinis mais bien dues à l'activité de l'utilisateur. En ce qui concerne l'implémentation d'une telle solution, il faut maintenant non seulement que les sorties de la simulation soient envoyées pour animer le système dans la scène virtuelle dans laquelle est immergée l'utilisateur, mais aussi que les interactions de l'utilisateur dans cette scène soient envoyées au logiciel de simulation pour qu'il s'en serve d'entrées (Figure 79). Pour les dispositifs, les casques HMD ont aujourd'hui tous des interacteurs, le plus souvent des manettes, mais parfois des captures de mains réelles par analyse d'image. Ces interacteurs représentent les mains virtuelles de l'utilisateur, lesquelles lui servent à interagir avec les objets d'une scène virtuelle. Il existe également des dispositifs haptiques avec le même rendu visuel mais qui permettent également d'appliquer des retours d'efforts sur la main. De cette façon, c'est non seulement la vue qui est stimulée (visualisation de la main dans l'environnement virtuel) mais aussi le toucher, ce qui rajoute encore un niveau d'immersion dans la scène.

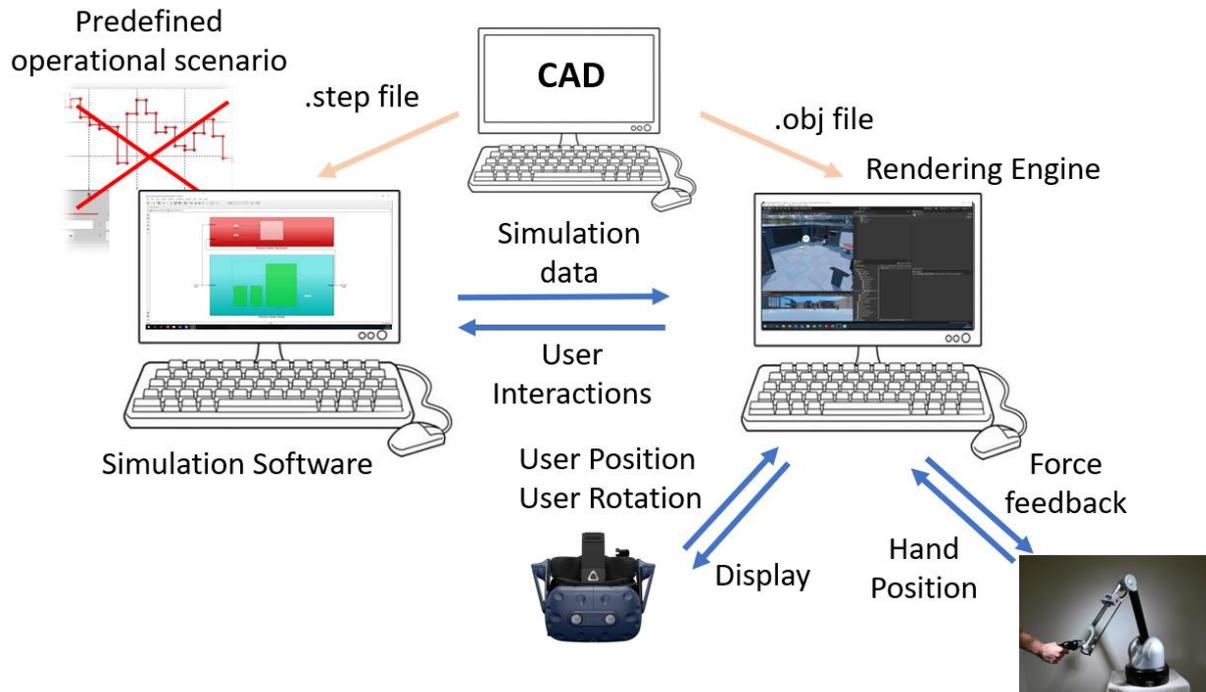


Figure 79 : Immersive Model- and Human-In-The-Loop Verification

Dans cette configuration, les tests effectués par l'utilisateur se rapprochent des tests en condition réelle : les interactions avec le système sont plus naturelles, la visualisation plus intuitive, et le comportement est fidèle aux lois de la physique. Le testeur peut alors stimuler le système à ses limites, d'autant plus que ces tests ne comportent aucun risque puisqu'ils sont virtuels.

Limites

S'il est possible d'estimer que la visualisation et les interactions sont maintenant très proches du réel, le comportement, lui, reste uniquement simulé. Bien que les logiciels de simulation soient assez fiables pour être largement utilisés, le comportement réel de certains composants ou sous-systèmes peut légèrement dévier de ce qui est prévu, et modifier alors significativement la performance générale.

5.2.5 De véritables composants dans la simulation

Pour passer au-delà de la limite de la simulation, nous proposons de remplacer, petit à petit, des éléments simulés par de véritables composants physiques. Par exemple, en remplaçant le bloc « controller » de la simulation par une carte de commande. Le reste du système reste simulé, mais les calculs sont effectués par la carte de commande du système, et donc à la vitesse à laquelle ils seront effectués en conditions réelles. Les sorties du composant physique sont récupérées pour alimenter la suite de la simulation, et les sorties de la simulation sont utilisées par le composant comme entrée.

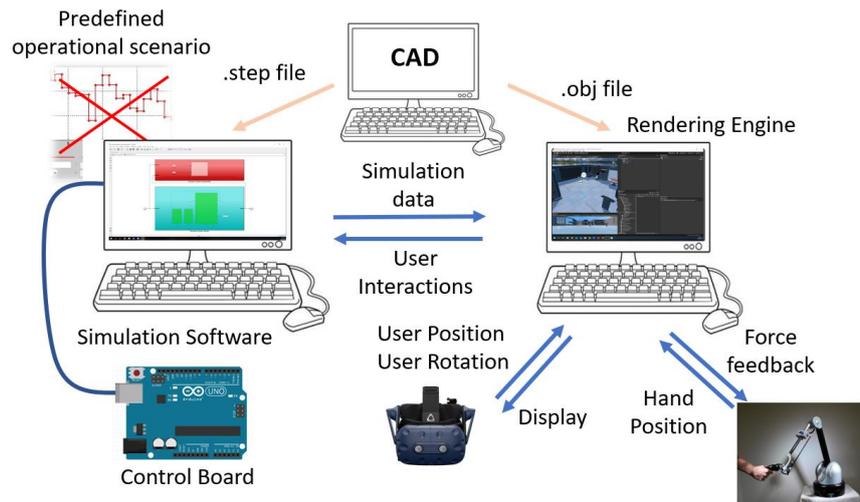


Figure 80 : Immersive Model- and Human- and Hardware-In-The-Loop Verification

En remplaçant ainsi des éléments simulés par des éléments réels, nous pouvons être certains que le comportement de ces éléments sont ceux qu'ils auront dans le système fini. Il est possible d'aller jusqu'à tous les remplacer tout en les gardant instrumentés de façon à toujours pouvoir tester le système depuis un environnement virtuel. C'est d'ailleurs ce qui a été fait au sein d'Airbus Helicopters (Fabre et al., 2020) en parallèle de nos recherches. De cette façon, l'avantage d'une sollicitation aléatoire et similaire à ce que l'utilisateur fera en condition réelle est conservé avec des moyens et des risques moins importants que des tests d'intégration réels.

5.2.6 Synthèse

Cette section détaille le continuum virtuel-réel imaginé pour réaliser des vérifications au plus tôt. Ce processus permet d'améliorer le réalisme de visualisation, des interactions puis du comportement. La première phase du carré de validation est alors validée, grâce à une revue de littérature (chapitre 2 et section 5.1), une décomposition en tâches à réaliser (chapitre 3) et la proposition, dans cette section, d'un processus permettant de réaliser ces tâches.

5.3 UN CAS D'ETUDE POUR APPUYER NOTRE PROPOSITION

Le processus proposé peut être illustré par son application sur un robot 6 axes.

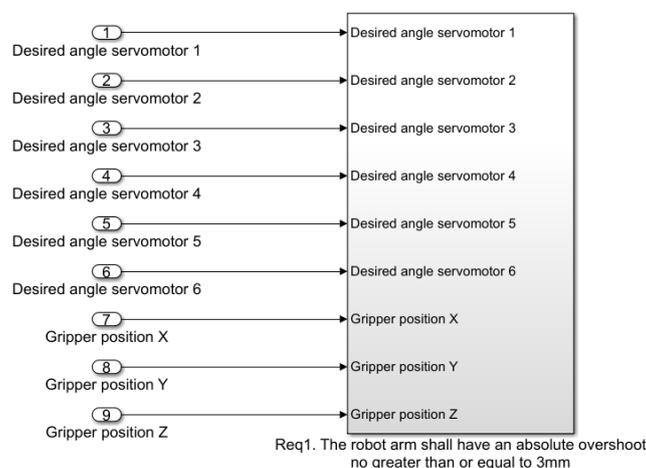


Figure 81 : Exemple d'exigence de notre modèle de spécification (sur l'exigence 1)

Un modèle de spécification est implémenté dans le logiciel MATLAB/Simulink. A ce stade, nous faisons l'hypothèse que ce modèle a déjà été validé plus tôt dans le processus de conception et qu'il est donc possible de le considérer complet et correct. En pratique, chaque exigence prend la forme décrite dans la Figure 81, c'est-à-dire une liste d'entrées qui sont, d'une part, les sollicitations sur le système (en l'occurrence sur la figure, les entrées 1 à 6) et, d'autre part, les sorties de la simulation du comportement (les entrées 7, 8 et 9 sur la figure). De cette façon, le bloc sur la Figure 81 peut vérifier que le comportement est bien celui attendu pour ce type de sollicitation.

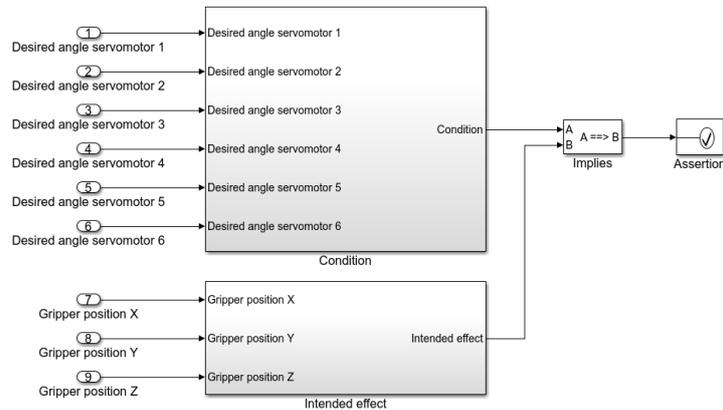


Figure 82 : Détail de l'implémentation de l'exigence 1

Plus précisément, les exigences du modèle de spécification sont composées de deux tests (Figure 82). La première (appelée « Condition » sur la Figure 82, le bloc du haut), s'assure que l'exigence est testée, c'est-à-dire si la sollicitation correspond à un cas de test, et la deuxième (appelé « Intended effect », le bloc du bas sur la Figure 82) vérifie que le comportement du système est bien celui prévu lors de cette sollicitation. Nous retrouvons bien la structure que nous avons décrite dans la Figure 69.

En ce qui concerne la solution, le robot est composé de 6 moteurs permettant de mettre en rotation les bras les uns par rapport aux autres et un permettant de fermer la pince. Il est donc composé, en plus du bâti, d'une pince, et de six éléments pouvant être mis en rotation pour permettre à la pince d'accéder à n'importe quel point dans son champ d'action. La solution est, elle aussi, modélisée dans le logiciel MATLAB/Simulink pour simuler son comportement (Figure 83).

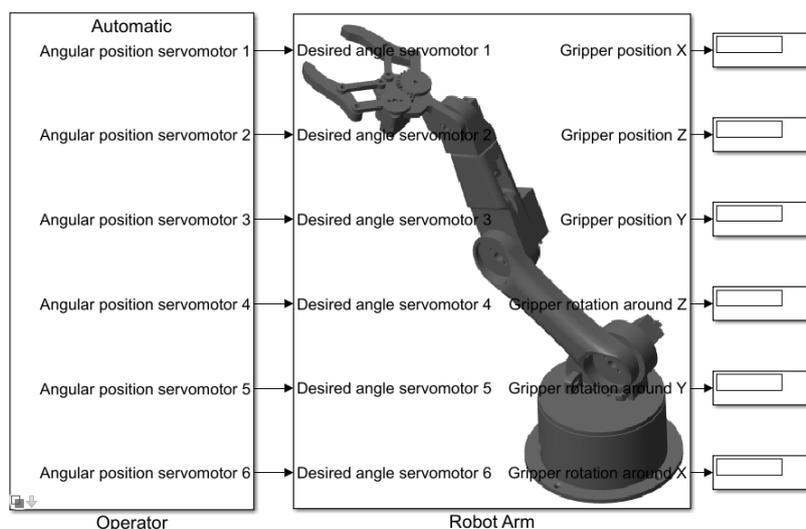


Figure 83 : Modèle Simulink de notre bras de robot

Le modèle de solution en lui-même est le bloc « Robot Arm » de la Figure 83, mais en plus de cette simulation de comportement il faut ajouter deux éléments : des scénarios opérationnels (le bloc « Operator ») et des sorties (à droite sur la Figure 83) pour visualiser le résultat de la simulation (position des différents composants mécaniques, efforts, vitesses etc.). De plus, certaines sorties devront ensuite être utilisées par le modèle de spécification pour s'assurer du respect des exigences fonctionnelles.

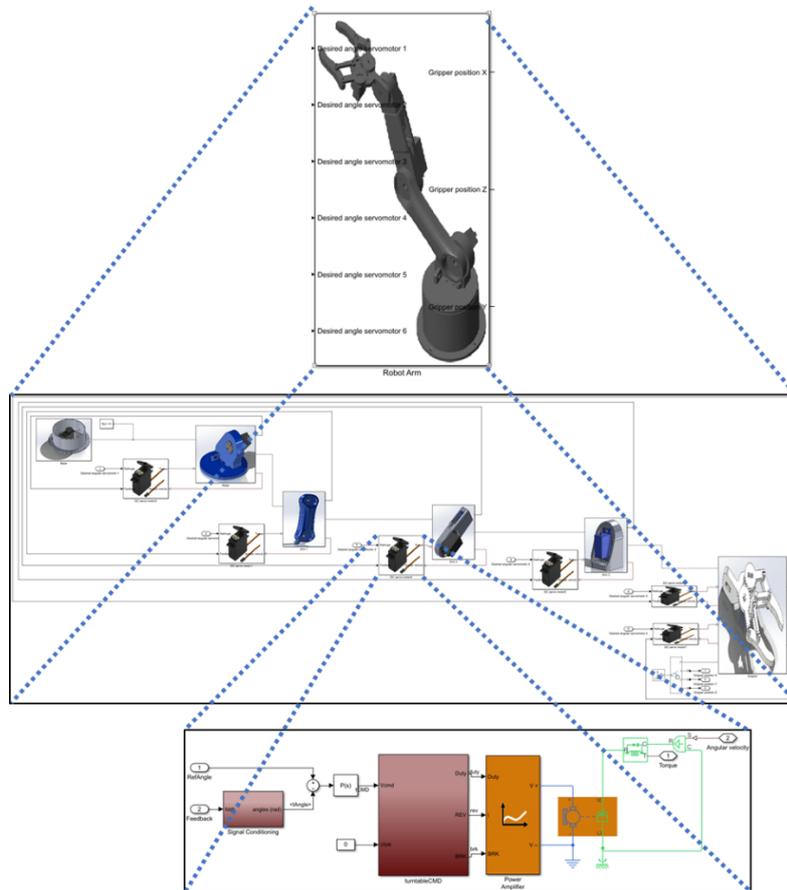


Figure 84 : Détail du modèle de comportement de notre bras de robot, décomposition en sous-systèmes sous MATLAB/Simulink

Le modèle de solution est décomposé en sous-systèmes. Le système étant relativement simple, nous avons créé un sous-système par classe d'équivalence (pour chaque ensemble mécanique en liaison encastrement) et pour chaque moteur (Figure 84). Le comportement des moteurs est décrit plus précisément par des équations de la physique, transformant un signal et une entrée électrique en énergie mécanique de rotation.

5.4 VERS UNE AUGMENTATION PROGRESSIVE DU REALISME

Avec un modèle de simulation, un modèle de géométrie 3D et un modèle de spécification, nous avons tous les prérequis pour s'engager dans le processus de vérification que nous avons présenté dans le chapitre précédent. Ainsi, nous commencerons par utiliser seulement le logiciel de simulation, en l'occurrence MATLAB/Simulink, avant de rajouter un aspect immersif dans la visualisation du comportement du système grâce à un logiciel et un dispositif de réalité virtuelle. Enfin, nous ajouterons la possibilité d'interagir directement depuis l'environnement virtuel avec le système testé, avant de remplacer progressivement les éléments simulés par de véritables composants physiques.

5.4.1 Implémentation de la PMM

Pour cette première étape, nous appliquons la PMM de Micouin (2014), que nous appellerons Model-In-The-Loop car seul les modèles de solution et de spécification sont nécessaires à ce stade. En pratique, pour mettre en place cette vérification, nous importons les pièces du modèle 3D dans le modèle de comportement pour que le logiciel puisse considérer les inerties dans ses calculs. Nous définissons et implémentons également quelques scénarios d'utilisation du robot pour tester les exigences fonctionnelles du modèle de spécification. Nous obtenons alors l'architecture définie par la Figure 74.

Lorsque nous lançons la simulation, les scénarios sont alors exécutés, le logiciel simule la conception du système en réponse aux stimulations et vérifie que celui-ci satisfait à la spécification. En sortie, nous pouvons, par exemple, observer des courbes de vitesse ou de position mais aussi une animation qui permet de visualiser le mouvement du système soumis aux sollicitations prédéfinies (Figure 85).

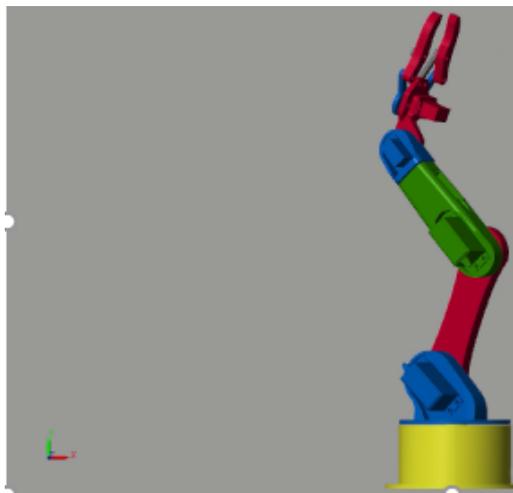


Figure 85 : Extrait de la visualisation du résultat de la co-simulation des modèles de comportements et de simulation dans Simulink

Cette méthode permet ainsi d'automatiser le processus de vérification, en s'assurant que toutes les exigences sont bien testées et en s'assurant que le comportement les respecte à chacun des pas de simulation. Cependant, le résultat de cette co-simulation reste sommaire, avec une animation en 2D que ne permet pas de se rendre compte des dimensions ou qui rend difficile l'appréhension des grandeurs physiques comme les vitesses ou les accélérations. Par conséquent, des tests, des situations d'utilisation, des sollicitations particulières peuvent avoir été oubliées et rien dans ce processus ne permet de corriger ce manque. Nous proposerons alors dans la prochaine étape de rajouter un niveau de réalisme dans la visualisation avec l'utilisation de dispositifs de réalité virtuelle.

5.4.2 Un environnement virtuel pour visualiser le comportement

Pour implémenter la solution, nous utilisons l'architecture de la Figure 78. Par rapport à l'étape précédente, on trouve un second poste de travail qui s'occupe de la gestion de l'affichage en réalité virtuelle du résultat de la simulation. C'est sur ce poste qu'est installé le moteur de rendu qui permet d'immerger l'utilisateur dans une scène virtuelle avec l'utilisation de casques dits HMD (Head Mounted Display). Dans notre cas, nous utilisons des HTC Vive Pro Wireless⁴⁹ car leur résolution est suffisante pour créer de l'immersion et un sentiment de présence dans la scène virtuelle, d'autant plus que leur utilisation sans fil permet une grande liberté de mouvement. Il est toutefois possible d'utiliser

⁴⁹ <https://www.vive.com/fr/product/vive-pro-full-kit/> - Consultée le 30/08/2022

n'importe quel casque compatible avec Steam VR, développé par Valve, que nous utilisons (Valve Index, Oculus Rift, etc.).

Une fois le modèle de géométrie 3D importé dans le moteur de rendu, il faut l'animer en suivant les résultats de la simulation. Comme expliqué plus haut, plusieurs solutions existent, et nous utiliserons une communication réseau via un protocole UDP, pour que le logiciel de simulation envoie les positions des différents éléments mobiles du système, ainsi que l'état de exigences en temps réel. Nous obtenons une scène telle que celle de la Figure 86, sur laquelle on voit le bras de robot à l'échelle 1, posé sur une table en bas à droite de l'image, et un écran qui nous permet de passer d'une exigence à l'autre en contrôlant leur état (non-testée, validée, falsifiée) grâce à une LED virtuelle qui indique l'état via sa couleur (grise, verte, rouge).



Figure 86 : Vérification "Immersive Model-In-The-Loop" de notre bras de robot

Avec l'ajout de l'immersion dans le processus de vérification, l'appréhension des grandeurs physiques par l'utilisateur lors du fonctionnement du système devient intuitive. Il est alors plus facile d'imaginer des cas d'utilisation imprévus, ou encore se rendre compte de situations dangereuses dans certains cas particuliers. Cependant, les stimulations restent prévues, et prédéfinies. Par conséquent, si de nouveaux cas tests sont identifiés, il est nécessaire de les modéliser et de relancer une simulation. Il n'y a donc pas de place pour la simulation de certains facteurs humains comme des sollicitations aléatoires. Par exemple, si le robot rencontre un obstacle, ou qu'un opérateur pousse le bras. Cela nécessite un modèle d'interaction (multi-)physique entre l'humain virtuel et le système.

5.4.3 Implémentation d'interactions avec le système virtuel

La prochaine étape est alors l'ajout de l'humain dans la boucle de simulation en se passant de scénarios prédéfinis (Figure 79). Ainsi, le réalisme d'interaction avec le système est amélioré. Du côté du moteur de rendu, il est donc non seulement nécessaire d'immerger l'utilisateur dans la scène virtuelle mais aussi de récupérer les interactions qu'il peut avoir avec le système. Pour ce faire, il existe deux moyens : les manettes fournies avec les casques de réalité virtuelle, et éventuellement des dispositifs haptiques. Quel que soit le moyen, le moteur de rendu récupère alors la position des mains de l'utilisateur qui peut alors interagir naturellement avec l'environnement dans lequel il évolue. Il est également possible d'ajouter des fonctionnalités en utilisant les boutons présents sur les manettes. Ainsi, dans la scène virtuelle, l'utilisateur peut, grâce à des pointeurs lasers, cliquer sur le tableau regroupant les exigences

pour les explorer, ou encore attraper le bras de robot et le déplacer en le portant. Avec un dispositif haptique, il est également possible d'ajouter des retours d'efforts qui donne un niveau d'immersion supplémentaire à l'utilisateur. Ainsi, si sa main virtuelle se fait « taper » par le bras de robot en mouvement, l'utilisateur sentira ce choc dans la main, comme si un objet réel l'avait percutée.



Figure 87 : Vérification "Immersive Model- and Human-In-The-Loop" du bras de robot

Dans notre cas, nous identifions deux façons d'interagir avec le bras de robot : soit en pilotant directement les moteurs, soit en touchant le système. La Figure 87 illustre la tablette (en bas à gauche) qui a été implémentée pour piloter les moteurs individuellement. Le reste de la scène reste inchangée pour, d'une part, qu'il soit toujours possible de visualiser le comportement simulé du système et, d'autre part, visualiser l'état des exigences testées en temps réel. Les interactions avec le système dans la scène virtuelle sont ensuite envoyées vers le logiciel de simulation. Il est important de noter que cette phase de développement des interactions avec le système est la plus importante en termes d'effort. En effet, il faut non seulement modifier tous les éléments de la scène virtuelle avec lesquels nous souhaitons que l'utilisateur interagisse, mais aussi capturer les interactions pour les envoyer vers le logiciel de simulation. Dans ce second logiciel, il faut donc développer un moyen de récupérer ces données, et de s'en servir comme entrée.

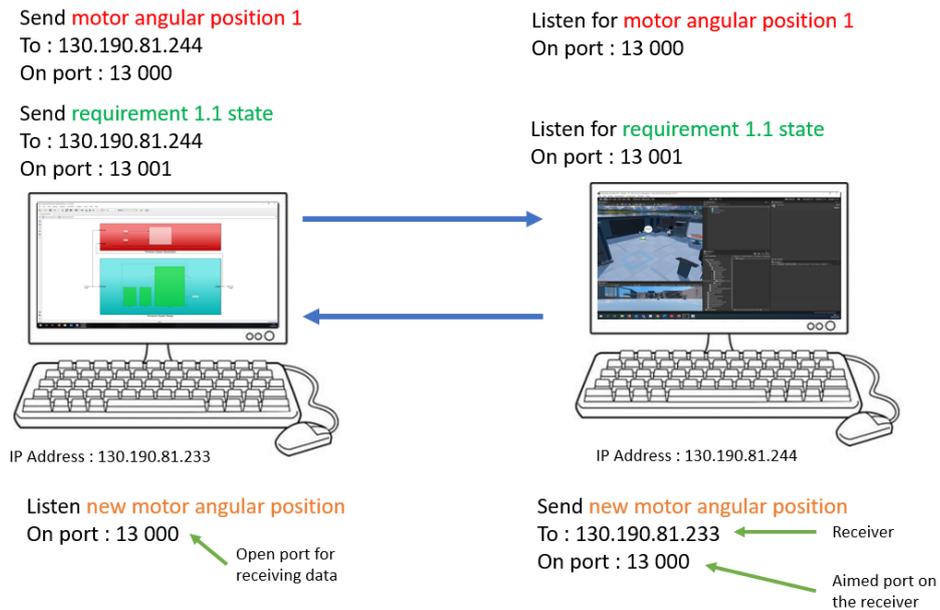


Figure 88 : Mise en place de la communication par protocole UDP entre les deux machines que nous utilisons

En effet, cette fois il est également nécessaire que le moteur de rendu envoie des informations en retour. Comme décrit sur la Figure 79, nous nous passons complètement de scénarios prédéfinis, qui étaient jusque-là implémentés dans le logiciel de simulation. En pratique, les deux logiciels envoient des informations à l'autre poste, sur des ports spécifiques, que l'autre « écoute » (Figure 88).

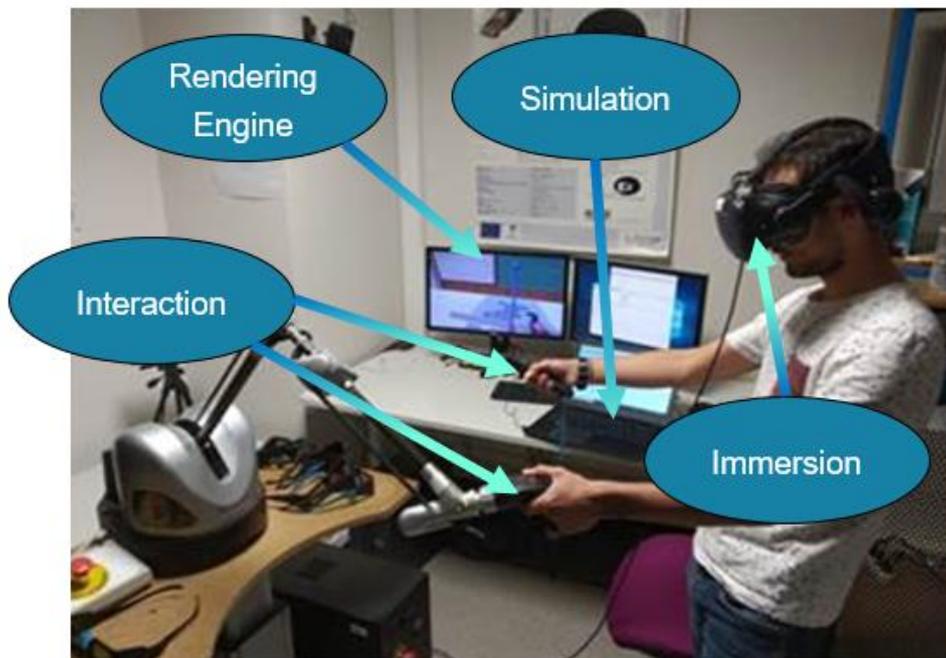


Figure 89 : Illustration d'un utilisateur pratiquant une vérification "Model- and Human-In-The-Loop" immersive

A ce stade, comme montré dans la Figure 89, l'utilisateur est alors immergé dans une scène virtuelle dans laquelle il stimule un système dont il observe le comportement simulé par un logiciel de simulation. Il peut également ressentir les efforts appliqués par le système grâce à des dispositifs haptiques (dans la main gauche sur la photo). Enfin, il visualise l'état des exigences décrites dans le modèle de spécification.

Si nous pouvons dire à la fin de cette étape que le comportement de l'utilisateur face au système est proche de celui qu'il aurait avec le système réel, le comportement du système, lui, reste entièrement simulé, et des écarts entre la simulation et le fonctionnement en conditions réelles peuvent exister. C'est pourquoi la prochaine étape vise à intégrer des composants réels dans la boucle de simulation.

5.4.4 Intégration de composants physiques

Pour améliorer le réalisme dans le comportement du système il est également possible de limiter les écarts entre la simulation et le comportement réel. Ainsi, certains éléments simulés jusqu'ici, comme la carte de commande, sont remplacés par des composants réels (Figure 80).

Du côté du moteur de rendu, il n'y a alors aucune différence avec l'étape précédente, et des changements sont apportés uniquement dans le logiciel de simulation. Pour reprendre l'exemple de la carte de commande, les calculs sont réalisés par une vraie carte de commande connectée au logiciel de simulation, qui lui envoie alors des signaux pour piloter les moteurs. Le reste du comportement est entièrement simulé. Les grandeurs physiques simulées dont la carte de commande a besoin pour ses calculs lui sont alors envoyées en retour.

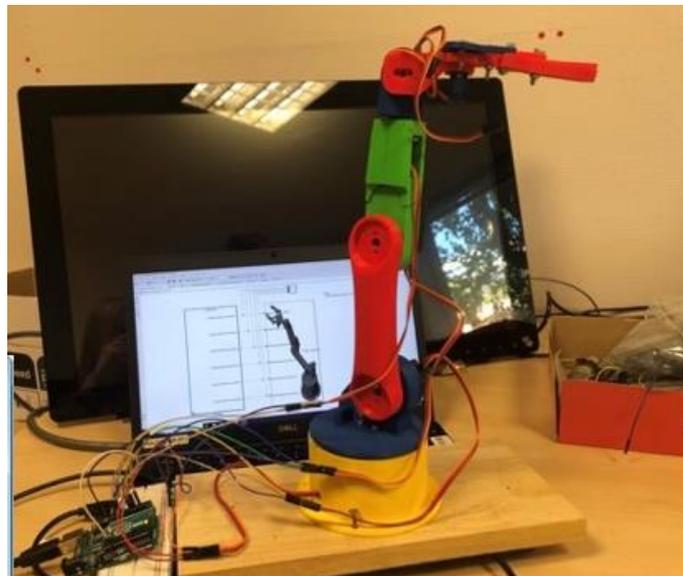


Figure 90 : Prototype physique du système développé

L'objectif à terme est de remplacer l'intégralité des éléments simulés par les véritables composants physiques, tout en les laissant instrumentés, pour obtenir alors un premier prototype fonctionnel (Figure 90), entièrement relié au logiciel de simulation même si le comportement n'est plus simulé, mais qui permet toujours d'envoyer les sorties au moteur de rendu. Il est alors possible de tester le système physique en réalité virtuelle, ce qui peut être utile dans le cadre de tests sur des systèmes potentiellement dangereux pour l'utilisateur. De plus, il est alors toujours possible de visualiser l'état des exigences fonctionnelles en temps réel (Figure 91).

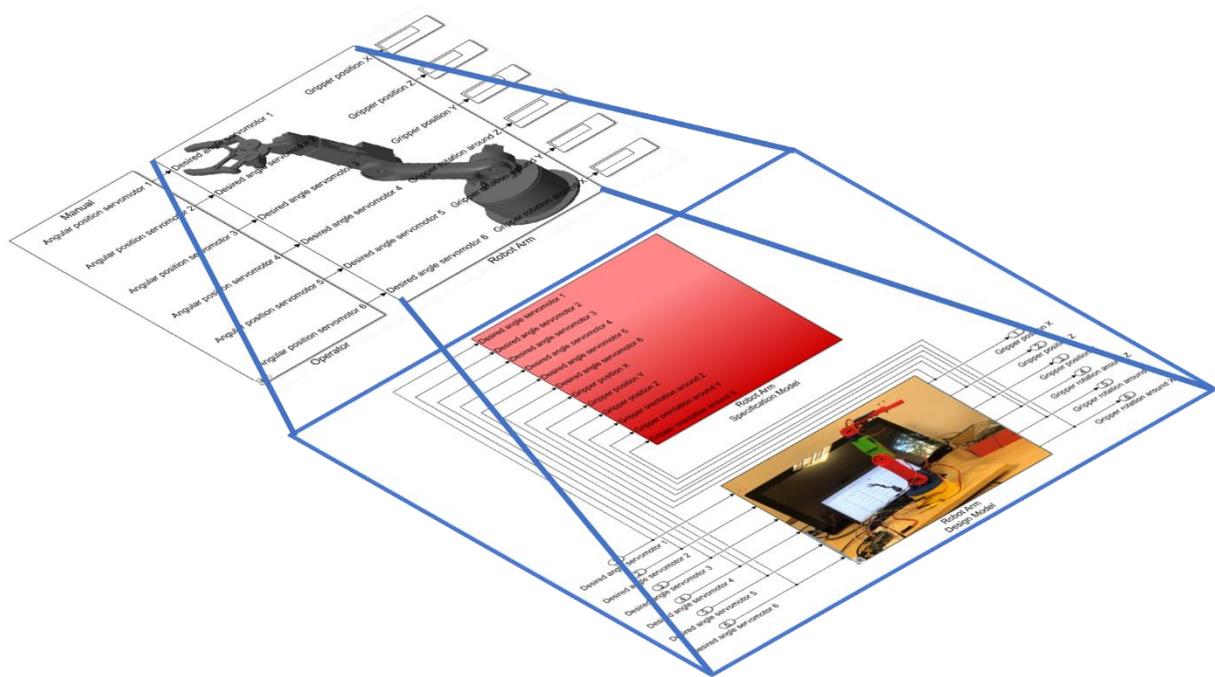


Figure 91 : Prototype dans la boucle de simulation. Ici le système est toujours piloté par un utilisateur dans un environnement virtuel et le modèle de spécification du système supervise le prototype fonctionnel du système

Dans cette section nous proposons donc de s'affranchir progressivement de la simulation en remplaçant des éléments simulés par des composants réels, tout en les laissant instrumentés (c'est-à-dire supervisés par des capteurs de façon à pouvoir continuer à vérifier que le comportement de chaque sous-système respecte les exigences (dans le logiciel de simulation) et de façon à pouvoir stimuler le système depuis une scène virtuelle (grâce au moteur de rendu) pour éviter tout risque lié à la manipulation de systèmes potentiellement dangereux.

5.5 VALIDATION DE LA PROPOSITION ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre un processus de vérification assistée par ordinateur a été présenté (section 5.2) puis appliqué à un cas d'étude (section 5.4). L'objectif avec ce travail est de convaincre les industriels des avantages de cette méthode de validation et de ce processus. Si ce qui a été présenté dans ce chapitre démontre la faisabilité technique, et explique les avantages de l'implémentation que nous proposons, rien ne quantifie le travail nécessaire pour passer d'une étape à l'autre.

Le Tableau 3 détaille la liste des tâches qu'il est nécessaire de réaliser pour atteindre chacune des phases du processus, ainsi que les ressources nécessaires et l'effort d'implémentation à fournir par rapport à ce qu'il est normal d'investir dans une conception de système complexe. Les durées de chaque tâche sont approximativement celles dont nous avons eu besoin pour déployer le processus sur le bras de robot qui a illustré ce chapitre. La plupart des tâches ne représentent qu'un faible effort supplémentaire, mais trois d'entre elles demandent un travail plus poussé :

- L'implémentation d'un modèle de spécification dans le logiciel de simulation
- L'implémentation des interactions dans la scène virtuelle avec le modèle 3D
- L'instrumentation du prototype physique pour le connecter au logiciel de simulation.

| Phase | Tache | Ressource | | | Effort |
|--|---|---|------------|--------------|---------------------|
| | | Physique | Logiciel | Compétences | |
| Model-In-The-Loop | Fabrication d'un modèle CAO | -PC | CAO | CAO | Normal (3h) |
| | Exporter le modèle CAO en format STEP | | CAO | CAO | Très Faible (0,25h) |
| | Importer le modèle CAO dans le logiciel de simulation | | Simulation | Simulation | Très Faible (0,25h) |
| | Implémenter une solution dans le logiciel de simulation | | Simulation | Simulation | Normal (4h) |
| | Implémenter un modèle de spécification | | Simulation | Simulation | Elevé (5h) |
| Immersive Model-In-The-Loop | Envoyer les positions depuis la simulation | -PC -Réseau | Simulation | Simulation | Normal (1h) |
| | Envoyer des informations depuis la spécification | | Simulation | Simulation | Faible (0,5h) |
| | Importer le modèle CAO (en format OBJ) | | RV | RV | Faible (0,25h) |
| | Paramétrer la communication pour le modèle CAO | | RV | RV | Faible (0,25h) |
| | Paramétrer la communication pour le modèle de spécification | | RV | RV | Faible (0,25h) |
| Immersive Model- and Human-In-The-Loop | Implémenter des interactions avec le modèle 3D | -PC -Réseau -Casque de RV -Dispositifs d'interaction | RV | Code (C#) | Très élevé (12h) |
| | Envoyer des données depuis le moteur de rendu | | RV | Code (C#) | Très Faible (0,25h) |
| | Utiliser les données du moteur de rendu comme entrée | | Simulation | Simulation | Faible (0,5h) |
| Immersive Model-, Human-, and Hardware-In-The-Loop | Fabriquer les sous-systèmes | -PC -Réseau -Casque de RV -Dispositifs d'interaction -Prototypes physiques -Capteurs | | Mécanique | Normal (20h) |
| | Instrumentation des systèmes physiques | | | Electronique | Normal (3h) |
| | Connecter les sous-systèmes au logiciel de simulation | | Simulation | Simulation | Elevé (7h) |

Tableau 3 : Résumé des tâches à réaliser pour suivre le processus que nous proposons et de l'effort que demande leur réalisation

Ce chapitre présente un démonstrateur qui cherche à répondre à l'objectif 2 de cette thèse, à savoir : Améliorer le processus de vérification de systèmes complexes. Avec la présentation de ce démonstrateur fonctionnel, La troisième phase du carré de validation est validée. En effet, après avoir montré qu'il existe un besoin dans les chapitres 2 et 3, puis avoir montré que l'utilisation des logiciels

de simulation et des dispositifs de réalité virtuelle pouvait apporter une solution à ce besoin, nous avons prouvé avec ce démonstrateur la faisabilité technique de notre proposition. Il est à noter que les résultats présentés dans ce chapitre ont d'ailleurs fait l'objet d'une publication dans la revue *Computer in Industry* (Romero et al., 2022).

Plusieurs questions restent tout de même en suspens. Tout d'abord, rien ne prouve ici que suivre cette méthode permet d'améliorer efficacement le processus de vérification de systèmes complexes. Pour cela, il faudrait par exemple réaliser des expérimentations qui permettraient de comparer formellement le résultat d'une conception ayant utilisé ce processus et celui d'une conception ne l'ayant pas pratiqué. Une autre façon de valider l'utilité et l'efficacité de notre proposition serait de la faire adopter par les concepteurs dans l'industrie. Pour cela, nous avons donné des éléments pour les convaincre dans cette thèse.

Une autre question que nous pouvons nous poser est celle de la spécification d'un niveau de réalisme au juste besoin. En effet, nous avons fait l'hypothèse tout au long de cette étude que plus nous augmentons le niveau de réalisme, que ce soit dans les interactions ou que ce soit dans le comportement, plus la vérification sera efficace. Toutefois, si nous sommes convaincus qu'il est nécessaire d'augmenter le réalisme de la simulation, nous pouvons nous demander jusqu'à quel niveau ? Il existe en robotique le phénomène de la vallée de l'étrange (Mori, 1970). Plus un robot humanoïde a une apparence humaine, plus les personnes interagissent naturellement avec, mais il existe une limite à partir de laquelle ce n'est plus vrai, et les utilisateurs iront même jusqu'à se sentir mal à l'aise, avant de ne plus faire de différence entre l'humanoïde et une personne. Un phénomène identique a été identifié dans le domaine des interactions haptiques (Berger et al., 2018) et nous pouvons alors nous imaginer qu'il existe un stade à partir duquel l'augmentation du réalisme ne signifie pas une amélioration de l'efficacité de la vérification. Cette nouvelle hypothèse de recherche est illustrée par la Figure 92. De plus, l'augmentation du niveau de réalisme nécessite toujours un effort supplémentaire, et si nous sommes capables de quantifier approximativement cet effort, nous ne montrons pas dans notre recherche à quel point l'efficacité de la vérification est augmentée en retour.

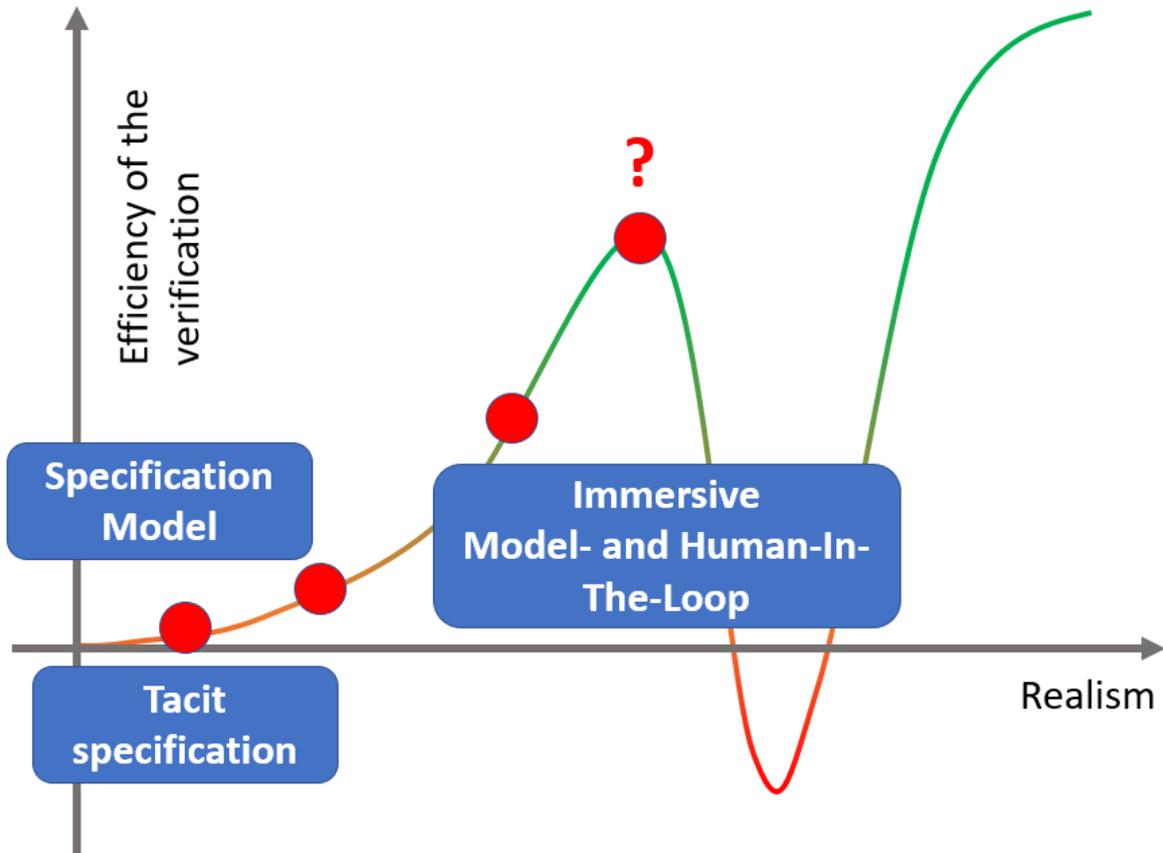


Figure 92 : Une tentative de conceptualisation du concept de la vallée de l'étrange appliqué à des vérifications immersives

CHAPITRE 6. QUE RETENIR ?

Cette thèse contribue à la recherche dans l'utilisation d'outils de visualisation immersive et interactive pour les activités de l'ingénierie système. Ce chapitre résume ces contributions et apporte quelques perspectives pour la recherche future.

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.1 | Des outils de visualisation immersive et interactive pour les activités de l'ingénierie système basée sur les modèles | 114 |
| 6.2 | L'utilisation de technologies de visualisation immersive et interactive peut-elle améliorer la qualité de la prise de décision lors de MBSE ? | 115 |
| 6.3 | Vers quelles pistes d'amélioration ? | 116 |

6.1 DES OUTILS DE VISUALISATION IMMERSIVE ET INTERACTIVE POUR LES ACTIVITES DE L'INGENIERIE SYSTEME BASEE SUR LES MODELES

Les principes d'une ingénierie basée sur des modèles ont été introduits en se concentrant en particulier sur les activités réalisées en revues de conception. La littérature en la matière est encore pauvre, une étude sur les pratiques actuelles et leurs limites est alors venue la compléter. La revue de littérature montre également que l'utilisation d'outils de visualisation immersive et interactive tend à faciliter des opérations telles que la fouille de données ou encore la prise de décision. A partir de là, une décomposition des revues MBSE en tâches élémentaires est proposée. Des solutions techniques y sont associées pour qu'elles soient réalisables dans des environnements virtuels utilisables par des outils de visualisation immersive et interactive. Plus précisément, deux types de revues sont identifiées, pour lesquelles des solutions sont proposées. Pour la première, l'objectif est d'améliorer la qualité de la compréhension du système conçu, et de faciliter le maintien de la cohérence des modèles. Dans ce cas la proposition repose sur un environnement virtuel immersif interactif et collaboratif dont l'utilité a été en partie validée par une expérimentation menée sur une trentaine de participants. Un second type de revue sont celles dont l'objectif est la vérification de système, c'est-à-dire vérifier que le système satisfait les exigences spécifiées. Dans ce cas, la proposition est un processus visant à augmenter de façon progressive le réalisme, tant dans la visualisation et les interactions que dans le comportement. Elle est illustrée par un second environnement virtuel.

De ces travaux, quatre contributions se dégagent.

- **UNE ENQUETE SUR LES REVUES MBSE**

Cette enquête sur les pratiques actuelles et leurs limites a été menée pour combler le manque dans la littérature, dans laquelle très peu de recherches documentent les revues de conception dans le contexte en particulier du MBSE (Chapitre 2). Ses résultats montrent que les acteurs de ces revues présentent le plus souvent leurs modèles via des captures ou des partages d'écran. Ils commentent oralement les liens entre les vues, ou les rendent explicites sur des présentations du type PowerPoint. Ces pratiques engendrent des difficultés de compréhension des modèles par l'ensemble des parties prenantes et des difficultés à maintenir la cohérence entre les différentes vues métier.

- **UN BENCHMARK POUR VALIDER DE NOUVELLES PROPOSITIONS**

Tout au long de cette thèse, la question de la validation des travaux est posée. Différents moyens de valider scientifiquement une contribution sont identifiés, notamment, dans notre domaine, via des expérimentations. Cependant, si les chercheurs proposent systématiquement des expérimentations différentes, sur des cas d'études différents, il est difficile de comparer plusieurs solutions entre elles, même lorsqu'elles sont validées rigoureusement. La deuxième contribution de cette thèse est donc la proposition d'un benchmark, dont le but est de mettre en commun les moyens de validation. A l'heure actuelle, ce benchmark est composé d'un jeu de données (le cas d'étude du télescope) et d'une expérimentation pour évaluer à quel point un environnement permet à un utilisateur de comprendre la définition d'un système en cours de conception via une exploration des données issues des modèles conçus.

- **UN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF ET INTERACTIF POUR LES MBSE**

Pour dépasser les limites identifiées par l'enquête sur les pratiques en revues MBSE, un environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif, dans lequel il est possible de visualiser les données relatives à la conception est proposé. Les données de conception pertinentes sont stockées dans une base de données orientée graphe, et c'est également sous cette forme qu'elles sont visualisables dans l'environnement. L'objectif est ici d'améliorer la compréhension individuelle de chaque participant de la revue, et de faciliter le maintien de la cohérence des modèles fabriqués dans le cadre de la conception. Pour le premier point, la proposition a été soumise à l'expérimentation détaillée dans le benchmark. Les choix de conception de cet environnement conduisent à une qualité de résultat similaire à des outils usuels, alors même que les participants ne connaissent pas l'application, et souvent ne maîtrisent que très peu la technologie. Cela laisse entrevoir des opportunités d'amélioration significative en améliorant les métaphores et interactions proposées.

- **UN PROCESSUS DE VERIFICATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR**

Ce processus démarre par la mise en place d'une vérification basée sur la co-simulation d'un modèle de comportement, ou modèle de solution et d'un modèle de spécification, qui regroupe l'ensemble des exigences fonctionnelles. Sont ajoutés par la suite, des moyens de visualisation et d'interactions permettant un test plus réaliste qu'un ensemble de scénarios pré-enregistrés. C'est ensuite le réalisme du comportement qui est amélioré en remplaçant progressivement des sous-systèmes simulés par des composants réels. Ce processus est illustré par un second environnement virtuel immersif et interactif, qui a fait l'objet d'un démonstrateur. L'environnement est une illustration du processus proposé, dont on valide la faisabilité. Cette étude fait l'objet d'une publication dans la revue *Computer In Industry*, et gagnera à être validée par son utilisation dans un contexte industriel. Ainsi cette publication doit permettre de convaincre les industriels de la valeur ajoutée de la méthode.

6.2 L'UTILISATION DE TECHNOLOGIES DE VISUALISATION IMMERSIVE ET INTERACTIVE PEUT-ELLE AMELIORER LA QUALITE DE LA PRISE DE DECISION LORS DE MBSE ?

Nous avons fait l'hypothèse qu'améliorer la compréhension d'un système, faciliter le maintien de la cohérence des modèles, et faciliter la vérification sont autant de facteurs qui ont un impact sur la qualité de la prise de décision. Il est pourtant difficile, à la suite des propositions présentées dans les deux chapitres précédents, d'apporter une réponse définitive à la question de recherche. En effet, si l'expérimentation montre que l'environnement virtuel immersif, interactif et collaboratif présenté dans le chapitre 4 permet effectivement d'améliorer certains aspects de la compréhension d'un système, rien ne prouve que ce soit grâce à l'utilisation de technologies immersive et interactive. En effet, il est possible que seul la base de données regroupant l'ensemble des informations soit à l'origine

de cette progression par exemple. De plus, bien que la littérature laisse penser que les deux autres objectifs également puissent être améliorés par l'utilisation des propositions des chapitres 4 et 5, nous ne pouvons émettre de conclusion définitive.

S'il n'est pas possible de donner une réponse définitive à la question de recherche, il faut quand même souligner les avancées que contiennent ces travaux. D'abord, à notre connaissance, cette thèse est la première qui propose d'utiliser des outils de visualisation immersive pour des activités de MBSE. Ensuite, si l'expérimentation ne confirme pas les hypothèses, elle ne les infirme pas non plus. L'environnement n'améliore pas la compréhension des utilisateurs mais elle ne la détériore pas. Ces résultats montrent alors que sur un tout premier prototype d'environnement pour les revues MBSE, les technologies utilisées permettent de réaliser les mêmes activités, avec le même degré de réussite, et dans des conditions moins lourdes pour l'utilisateur. Il est donc possible ici de conclure que l'utilisation dans le cadre du MBSE de ces outils et technologies est prometteuse. Les futures recherches doivent maintenant trouver de nouvelles pistes pour confirmer ce potentiel, et améliorer effectivement la prise de décision en revue MBSE.

6.3 VERS QUELLES PISTES D'AMÉLIORATION ?

Dans ce but, nous identifions trois principales pistes d'améliorations à court terme.

- **AMENDER, COMPLETER ET EPROUVER LE BENCHMARK.**

A court terme, la priorité est le benchmark. En effet, celui proposé dans cette thèse ne permet de valider que certains aspects des environnements virtuels pour les revues MBSE. Pour le compléter il est nécessaire d'ajouter des moyens de valider d'autres buts de revues de conception, comme celui du maintien en cohérence des modèles abordés dans les chapitres 3 et 4.

Ensuite, pour valider des travaux en suivant la méthode du carré de validation, il est nécessaire de se baser sur des cas d'études représentatifs de la réalité du monde industriel. Celui du télescope est un début, mais il reste encore pauvre : le modèle d'architecture se compose seulement de trois niveaux systémiques, les modèles CAO et de comportements sont primitifs, et les autres sont inexistantes (sûreté de fonctionnement, simulation par éléments finis, etc.). L'ajout de données complexifiant la tâche d'un utilisateur qui explore les vues modélisées peut d'ailleurs grandement influencer les résultats de l'expérimentation proposée dans le chapitre 4. L'ajout de diapositives éparpillant un peu plus les données peut être plus pénalisant pour la compréhension que l'ajout de nœuds dans un graphe.

Enfin, un benchmark a besoin d'être éprouvé pour trouver les éléments qui lui manquent. Il est donc nécessaire de tester de nouveaux environnements, réaliser de nouvelles expérimentations pour identifier des éventuels problèmes.

- **RECHERCHER DE NOUVELLES METAPHORES VISUELLES**

L'environnement proposé dans le chapitre 4 utilise la métaphore du graphe pour représenter les données de conception et les liens entre ces données. Les nœuds et les liens ont des couleurs et des formes simples pour que le type de donnée qu'ils représentent soit facilement identifiable de loin. Ce choix est motivé par la littérature, mais peut être critiqué. En effet, la représentation choisie est alors symbolique : elle ne partage aucune caractéristique physique avec la donnée qu'elle représente. Pourtant, il est montré que les représentations iconiques, qui partagent des caractéristiques physiques avec ce qu'elles représentent, sont plus facilement compréhensibles par un utilisateur car plus transparentes sémantiquement.

Ces différents moyens de représenter les données mettent en avant la problématique du choix des métaphores visuelles. Elles sont certainement l'un des facteurs qui influence le plus la compréhension de l'utilisateur. La recherche doit donc se pencher sur ces métaphores, non seulement pour identifier les plus adaptées, mais également pour comprendre pourquoi elles le sont, de façon à construire progressivement des règles de conception de métaphores visuelles.

- **RECHERCHER DE NOUVELLES INTERACTIONS.**

De la même façon, l'environnement proposé dans cette thèse base principalement ses interactions sur un système de pointeur laser, proche du principe de la souris sur un environnement 2D. Si cela semble efficace dans ce contexte, d'autres moyens existent comme toucher des éléments avec l'avatar des mains ou manettes par exemple. Il est donc dans ce cas également possible que certaines interactions permettent de faciliter l'exploration des données plus que d'autre.

D'un point de vue technologique, les dispositifs physiques qui servent d'interacteurs, aujourd'hui le plus souvent des manettes, évoluent rapidement. Il est possible que dans quelques années le moyen principal d'interaction soit les mains de l'utilisateur, reconstruites dans l'environnement virtuel par analyse d'image. Les interactions peuvent donc encore beaucoup évoluer, mais il faut attendre que les dispositifs eux-mêmes arrivent à maturité pour lancer des recherches approfondies dans le but, comme pour les métaphores visuelles, de dégager des règles de conception d'interactions en fonction du contexte d'utilisation de l'environnement virtuel. D'autres sens que la vue peuvent d'ailleurs être sollicités pour ces nouvelles interactions. Par exemple, le toucher peut être stimulé par des dispositifs haptiques, comme des bras à retour d'effort, ou simplement par des vibrations des manettes.

REFERENCES

- Adwernat, S., Wolf, M., & Gerhard, D. (2020). Optimizing the Design Review Process for Cyber-Physical Systems using Virtual Reality. *Procedia CIRP*, 91, 710–715. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.115>
- Alper, B., Hollerer, T., Kuchera-Morin, J., & Forbes, A. (2011). Stereoscopic Highlighting: 2D Graph Visualization on Stereo Displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(12), 2325–2333. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2011.234>
- Andaluz, V. H., Chicaiza, F. A., Gallardo, C., Quevedo, W. X., Varela, J., Sánchez, J. S., & Arteaga, O. (2016). Unity3D-MatLab Simulator in Real Time for Robotics Applications. In L. T. De Paolis & A. Mongelli (Eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (Vol. 9768, pp. 246–263). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3_19
- Aromaa, S., Leino, S.-P., Viitaniemi, J., Jokinen, L., & Kiviranta, S. (2012). Benefits of the use of virtual environments in product design review meeting. *Proceedings of DESIGN 2012, the 12th International Design Conference*, 10. <https://www.designsociety.org/publication/32002/BENEFITS+OF+THE+USE+OF+VIRTUAL+ENVIRONMENTS+IN+PRODUCT+DESIGN+REVIEW+MEETING>
- Averbukh, V., Averbukh, N., Vasev, P., Gvozdev, I., Levchuk, G., Melkozerov, L., & Mikhaylov, I. (2019). Metaphors for Software Visualization Systems Based on Virtual Reality. In L. T. De Paolis & P. Bourdot (Eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (Vol. 11613, pp. 60–70). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25965-5_6
- Bach, C., & Scapin, D. L. (2005). *Critères Ergonomiques pour les Interactions Homme-Environnements Virtuels: Définitions, justifications et exemples* (p. 48) [Rapport de recherche].
- Bajaj, M., Backhaus, J., Walden, T., Waikar, M., Zwemer, D., Schreiber, C., Issa, G., Intercax, & Martin, L. (2017). Graph-Based Digital Blueprint for Model Based Engineering of Complex Systems. *INCOSE International Symposium*, 27(1), 151–169. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2017.00351.x>
- Bajaj, M., & Hedberg, T. (2018). System Lifecycle Handler—Spinning a Digital Thread for Manufacturing. *INCOSE International Symposium*, 28(1), 1636–1650. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2018.00573.x>
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). *Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale*. 4(3), 10.
- Basole, R. C., Qamar, A., Park, H., Paredis, C. J. J., & McGinnis, L. F. (2015). Visual Analytics for Early-Phase Complex Engineered System Design Support. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(2), 41–51. <https://doi.org/10.1109/MCG.2015.3>
- Bayer, T. (2018). Is MBSE helping? Measuring value on Europa Clipper. *2018 IEEE Aerospace Conference*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396379>
- Bayer, T., Buffington, B., Castet, J.-F., Jackson, M., Lee, G., Lewis, K., Kastner, J., Schimmels, K., & Kirby, K. (2017). Europa mission update: Beyond payload selection. *2017 IEEE Aerospace Conference*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943832>
- Bayer, T., Cooke, B., Gontijo, I., & Kirby, K. (2015). Europa Clipper mission: The habitability of an icy moon. *2015 IEEE Aerospace Conference*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7118943>

- Bennett, R., Zielinski, D. J., & Kopper, R. (2014). Comparison of interactive environments for the archaeological exploration of 3D landscape data. *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, 67–71. <https://doi.org/10.1109/3DVis.2014.7160103>
- Berger, C. C., Gonzalez-Franco, M., Ofek, E., & Hinckley, K. (2018). The uncanny valley of haptics. *Science Robotics*, 3(17), eaar7010. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7010>
- Boujut, J. F., & Hisarciklilar, O. (2012). Using a semiotic classification to characterise objects involved in collaborative design. *J. of Design Research*, 10(3), 155. <https://doi.org/10.1504/JDR.2012.047921>
- Boujut, J.-F., & Laureillard, P. (2002). A co-operation framework for product–process integration in engineering design. *Design Studies*, 23(6), 497–513. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(01\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(01)00044-8)
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40(7), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>
- Boy, G. A. (2017). Human-centered design of complex systems: An experience-based approach. *Design Science*, 3, e8. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.8>
- Brahma, A., & Wynn, D. C. (2021). A Study on the Mechanisms of Change Propagation in Mechanical Design. *Journal of Mechanical Design*, 143(12), 121401. <https://doi.org/10.1115/1.4050927>
- Brooke, J. (1996). SUS - A quick and dirty usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & I. L. McClelland (Eds.), *Usability evaluation in industry* (p. 8). Taylor & Francis.
- Buffoni, L., & Fritzon, P. (2015). Expressing Requirements in Modelica: *SNE Simulation Notes Europe*, 25(3–4). <https://doi.org/10.11128/sne.25.tn.10314>
- Chen, J., Zucco, G., & Olechowski, A. (2019). A Survey of Design Reviews: Understanding Differences by Designer-Roles and Phase of Development. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 2745–2754. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.281>
- de Casenave, L., & Lugo, J. E. (2018). Effects of Immersion on Virtual Reality Prototype Design Reviews of Mechanical Assemblies. *Volume 7: 30th International Conference on Design Theory and Methodology*, V007T06A044. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85542>
- Drogemuller, A., Cunningham, A., Walsh, J., Thomas, B. H., Cordeil, M., & Ross, W. (2020). Examining virtual reality navigation techniques for 3D network visualisations. *Journal of Computer Languages*, 56, 100937. <https://doi.org/10.1016/j.cola.2019.100937>
- Eckert, C., Clarkson, P. J., & Zanker, W. (2004). Change and customisation in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 15(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00163-003-0031-7>
- Fabre, L., Gaurel, C., Martignago, N., Pandolfi, P., Paper, P., Razafimahefa, T., & Micouin, P. (2020). *Advances in Property Model Methodology (PMM)*. Vertical Flight Society Annual Forum & Technology Display - Forum 76. <https://doi.org/10.4050/F-0076-2020-16360>
- Freeman, I. J., Salmon, J. L., & Coburn, J. Q. (2016). CAD Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engineering Model Interaction. *Volume 11: Systems, Design, and Complexity*, V011T15A006. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66948>
- Friedenthal, S., Moore, A., & Steiner, R. (2012). *A practical guide to SysML: The systems modeling language* (2nd ed). Morgan Kaufmann.

- Fruchterman, T. M. J., & Reingold, E. M. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience*, 21(11), 1129–1164. <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>
- Gericke, K., Eckert, C., Campean, F., Clarkson, P. J., Flening, E., Isaksson, O., Kipouros, T., Kokkolaras, M., Köhler, C., Panarotto, M., & Wilmsen, M. (2020). Supporting designers: Moving from method menagerie to method ecosystem. *Design Science*, 6, e21. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.21>
- Gero, J. S. (1990). Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. *AI Magazine*, 11(4), 11.
- Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies*, 25(4), 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- Góngora, H. G. C., Ferrogallini, M., & Moreau, C. (2015). How to Boost Product Line Engineering with MBSE - A Case Study of a Rolling Stock Product Line. In F. Boulanger, D. Krob, G. Morel, & J.-C. Roussel (Eds.), *Complex Systems Design & Management* (pp. 239–256). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11617-4_17
- Graf, S., & Schwind, V. (2020). Inconsistencies of Presence Questionnaires in Virtual Reality. *26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1–3. <https://doi.org/10.1145/3385956.3422105>
- Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). How Many Interviews Are Enough?: An Experiment with Data Saturation and Variability. *Field Methods*, 18(1), 59–82. <https://doi.org/10.1177/1525822X05279903>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hassannezhad, M., Cassidy, S., & Clarkson, P. J. (2021). *Predicting Decision Propagation in Complex Sociotechnical System* [Preprint]. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.13536485>
- Hedberg, T. D., Jr., Bajaj, M., & Camelio, J. A. (2019). Using Graphs to Link Data Across the Product Lifecycle for Enabling Smart Manufacturing Digital Threads. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1115/1.4044921>
- Hedberg, T., Lubell, J., Fischer, L., Maggiano, L., & Barnard Feeney, A. (2016). Testing the Digital Thread in Support of Model-Based Manufacturing and Inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 16(2), 021001. <https://doi.org/10.1115/1.4032697>
- Heidrich, D., Meinecke, A., & Schreiber, A. (2021). Towards a Collaborative Experimental Environment for Graph Visualization Research in Virtual Reality. *EuroVis 2021 - Posters*, 3 pages. <https://doi.org/10.2312/EVP.20211068>
- Helbig, C., Bauer, H.-S., Rink, K., Wulfmeyer, V., Frank, M., & Kolditz, O. (2014). Concept and workflow for 3D visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. *Environmental Earth Sciences*, 72(10), 3767–3780. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3136-6>
- Herzog, E., & Pandikow, A. (2005). 2.3.1 SysML - an Assessment. *INCOSE International Symposium*, 15(1), 293–305. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2005.tb00670.x>
- Hoffmann, H. P. (2011). *Model-based systems engineering with rational rhapsody and rational harmony for systems engineering: Vol. Deskbook Release 4.1*. IBM Corporation. https://jazz.net/library-content/wp-content/uploads/2020/11/ibm_rational_harmony_deskbook_rel_4.1.pdf

- Horvat, N., Škec, S., Martinec, T., Lukačević, F., & Perišić, M. M. (2019). Comparing Virtual Reality and Desktop Interface for Reviewing 3D CAD Models. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1923–1932. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.198>
- Huet, G., McMahon, C. A., Sellini, F., Culley, S. J., & Fortin, C. (2007). Knowledge Loss in Design Reviews. In S. Tichkiewitch, M. Tollenaere, & P. Ray (Eds.), *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II* (pp. 277–291). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6761-7_19
- INCOSE. (2021). *INCOSE Systems Engineering Vision 2035*. INCOSE_CMS. <https://www.incose.org/about-systems-engineering/se-vision-2035>
- INCOSE, Walden, D. D., Roedler, G. J., Forsberg, K., Hamelin, R. D., & Shortell, T. M. (Eds.). (2015). *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities* (4th edition). Wiley.
- Johansson, J., Contero, M., Company, P., & Elgh, F. (2018). Supporting connectivism in knowledge based engineering with graph theory, filtering techniques and model quality assurance. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.07.005>
- Karpenko, M., & Sepehri, N. (2009). Hardware-in-the-loop simulator for research on fault tolerant control of electrohydraulic actuators in a flight control application. *Mechatronics*, 19(7), 1067–1077. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.01.008>
- Keller, R., Eger, T., Eckert, C. M., & Clarkson, P. J. (2005). Visualising change propagation. *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, Melbourne, Australia, 15.-18.08. 2005*. ICED.
- Kleiner, S., & Kramer, C. (2013). Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. In M. Abramovici & R. Stark (Eds.), *Smart Product Engineering* (pp. 93–102). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_10
- Kuhn, M. R., Otter, M., & Giese, T. (2015). *Model Based Specifications in Aircraft Systems Design*. 491–500. <https://doi.org/10.3384/ecp15118491>
- Kwon, O.-H., Muelder, C., Lee, K., & Ma, K.-L. (2015). Spherical layout and rendering methods for immersive graph visualization. *2015 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 63–67. <https://doi.org/10.1109/PACIFICVIS.2015.7156357>
- Larousse. (n.d.). Réalisme. In *Larousse*.
- Lewis, K. E., Chen, W., & Schmidt, L. C. (Eds.). (2006). The Validation Square: How Does One Verify and Validate a Design Method? In *Decision Making in Engineering Design* (pp. 303–313). ASME Press. <https://doi.org/10.1115/1.802469.ch25>
- Li, T., Lockett, H., & Lawson, C. (2020). Using requirement-functional-logical-physical models to support early assembly process planning for complex aircraft systems integration. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 242–257. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.001>
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2), 0–0. <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- Madni, A. M., & Sievers, M. (2018). Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities. *Systems Engineering*, 21(3), 172–190. <https://doi.org/10.1002/sys.21438>

- Martin, A., & Emami, M. R. (2011). Dynamic Load Emulation in Hardware-in-the-Loop Simulation of Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7), 2980–2987. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2072890>
- Martini, A., Colizzi, L., Chionna, F., Argese, F., Bellone, M., Cirillo, P., & Palmieri, V. (2015). A novel 3D user interface for the immersive design review. *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 175–176. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2015.7131757>
- Maurandy, J., Helm, A., Gill, E., & Stalford, R. (2012). 11.5.3 Cost-Benefit Analysis of SysML Modelling for the Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) Simulator. *INCOSE International Symposium*, 22(1), 1726–1745. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2012.tb01433.x>
- McIntire, J. P., & Liggett, K. K. (2014). The (possible) utility of stereoscopic 3D displays for information visualization: The good, the bad, and the ugly. *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/3DVis.2014.7160093>
- Mhenni, F., Choley, J.-Y., Penas, O., Plateaux, R., & Hammadi, M. (2014). A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design. *Advanced Engineering Informatics*, 28(3), 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.03.006>
- Michalos, G., Karvouniari, A., Dimitropoulos, N., Togiass, T., & Makris, S. (2018). Workplace analysis and design using virtual reality techniques. *CIRP Annals*, 67(1), 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.120>
- Micouin, P. (2008). Toward a property based requirements theory: System requirements structured as a semilattice. *Systems Engineering*, 11(3), 235–245. <https://doi.org/10.1002/sys.20097>
- Micouin, P. (2013). Model Based Systems Engineering using VHDL-AMS. *Procedia Computer Science*, 16, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.014>
- Micouin, P. (2014). Property-Model Methodology: A Model-Based Systems Engineering Approach Using VHDL-AMS. *Systems Engineering*, 17(3), 249–263. <https://doi.org/10.1002/sys.21267>
- Micouin, P., Fabre, L., Becquet, R., Paper, P., Razafimahefa, T., & Guérin, F. (2018). Property Model Methodology: A Landing Gear Operational Use Case. *INCOSE International Symposium*, 28(1), 321–336. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2018.00484.x>
- Mirhosseini, K., Sun, Q., Gurijala, K. C., Laha, B., & Kaufman, A. E. (2014). Benefits of 3D immersion for virtual colonoscopy. *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, 75–79. <https://doi.org/10.1109/3DVis.2014.7160105>
- Mori, M. (1970). The Uncanny Valley: The Original Essay by Masahiro Mori. *IEEE Spectrum*, 6.
- Morris, J., Ingham, M., Rasmussen, R., Starbird, T., & Mishkin, A. (2006, June 19). Application of State Analysis and Goal-Based Operations to a MER Mission Scenario. *SpaceOps 2006 Conference*. SpaceOps 2006 Conference, Rome, Italy. <https://doi.org/10.2514/6.2006-5981>
- Nguyen, T. (2014). FORM-L: A MODELICA Extension for Properties Modelling Illustrated on a Practical Example. *Proceedings of the 10 Th International Modelica Conference; March 10-12; 2014; Lund; Sweden*, 1227–1236. <https://doi.org/10.3384/ecp140961227>
- Noel, F., & Brissaud, D. (2003). Dynamic data sharing in a collaborative design environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 16(7–8), 546–556. <https://doi.org/10.1080/0951192031000115732>
- Noël, F., Sadeghi, M., & Chettaoui, H. (2008). A MODEL DRIVEN FRAMEWORK TO COMPARE DESIGN STUDIES FROM HETEROGENEOUS DISCIPLINES. *5th International Conference on Digital Enterprise Technology, DET 2008*, 9.

- Oberhauser, R., & Lecon, C. (2017). Immersed in software structures: A virtual reality approach. *Tenth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI 2017)*, 181–186.
- Oberhauser, R., Pogolski, C., & Matic, A. (2018). VR-BPMN: Visualizing BPMN Models in Virtual Reality. In B. Shishkov (Ed.), *Business Modeling and Software Design* (pp. 83–97). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94214-8_6
- Otter, M., Thuy, N., Bouskela, D., Buffoni, L., Elmqvist, H., Fritzson, P., Garro, A., Jardin, A., Olsson, H., Payelleville, M., Schamai, W., Thomas, E., & Tundis, A. (2015). *Formal Requirements Modeling for Simulation-Based Verification*. 625–635. <https://doi.org/10.3384/ecp15118625>
- Paredis, C. J. J., Bernard, Y., Burkhart, R. M., de Koning, H.-P., Friedenthal, S., Fritzson, P., Rouquette, N. F., & Schamai, W. (2010). 5.5.1 An Overview of the SysML-Modelica Transformation Specification. *INCOSE International Symposium*, 20(1), 709–722. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01099.x>
- Pausch, R., Proffitt, D., & Williams, G. (1997). *Quantifying immersion in virtual reality*. 6.
- Peirce, C. S. (1958). *Collected writings*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Piasczyk, C. (2011). Model Based Systems Engineering with Department of Defense Architectural Framework. *Systems Engineering*, 14(3), 305–326. <https://doi.org/10.1002/sys.20180>
- Pinquié, R., Micouin, P., Véron, P., & Segonds, F. (2016). Property Model Methodology: A case study with Modelica. *Proceedings of Tools and Methods for Competitive Engineering*. Tools and Methods for Competitive Engineering, Aix-en-Provence, France. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1925.1603>
- Pinquié, R., Romero, V., & Noel, F. (2022). Survey of Model-Based Design Reviews: Practices & Challenges? *Proceedings of the Design Society*, 2, 1945–1954. <https://doi.org/10.1017/pds.2022.197>
- Piques, J.-D. (2014). SysML for embedded automotive systems: SysCARS methodology. *Embedded Real Time Software and Systems*, 18.
- Rhodes, D. H., & Ross, A. M. (2016). A Vision for Human-Model Interaction in Interactive Model-Centric Systems Engineering. *INCOSE International Symposium*, 26(1), 788–802. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2016.00193.x>
- Robinett, W. (1992). Synthetic Experience: A Proposed Taxonomy. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 229–247. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.229>
- Romero, V., Pinquié, R., & Noël, F. (2022). A user-centric computer-aided verification process in a virtuality-reality continuum. *Computers in Industry*, 140, 103678. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103678>
- Roques, P. (2016). MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool. *The European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)*, 11. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01258014/>
- Sarhadi, P., & Yousefpour, S. (2015). State of the art: Hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software. *International Journal of Dynamics and Control*, 3(4), 470–479. <https://doi.org/10.1007/s40435-014-0108-3>
- Sarica, S., & Luo, J. (2019). An Infinite Regress Model of Design Change Propagation in Complex Systems. *IEEE Systems Journal*, 13(4), 3610–3618. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2899988>

- Satter, K., & Butler, A. (2015). Competitive Usability Analysis of Immersive Virtual Environments in Engineering Design Review. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15(3), 031001. <https://doi.org/10.1115/1.4029750>
- Schamai, W., Helle, P., Fritzson, P., & Paredis, C. J. J. (2011). Virtual Verification of System Designs against System Requirements. In J. Dingel & A. Solberg (Eds.), *Models in Software Engineering* (Vol. 6627, pp. 75–89). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21210-9_8
- Schreiber, A., Nafeie, L., Baranowski, A., Seipel, P., & Misiak, M. (2019). Visualization of Software Architectures in Virtual Reality and Augmented Reality. *2019 IEEE Aerospace Conference*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/AERO.2019.8742198>
- Shiratuddin, M. F., & Thabet, W. (2007). *INFORMATION-RICH VIRTUAL ENVIRONMENT (VE) FOR DESIGN REVIEW*. 9.
- Slater, M. (2004). How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 13(4), 484–493. <https://doi.org/10.1162/1054746041944849>
- Suh, N. (2001). Axiomatic design: Advances and applications. *Oxford University Press, USA*.
- Systems Engineering Vision Working Group of the INCOSE. (2007). *Systems Engineering Vision 2020*. International Council on Systems Engineering. http://www.cose.org/media/upload/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf
- Teyseyre, A. R., & Campo, M. R. (2009). An Overview of 3D Software Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(1), 87–105. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.86>
- Thomas, J. J., & Cook, K. A. (2006). A visual analytics agenda. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 26(1), 10–13. <https://doi.org/10.1109/MCG.2006.5>
- Tullis, T. S., & Stetson, J. N. (2004). A Comparison of Questionnaires for Assessing Website Usability. *Usability Professional Association Conference*, 12.
- Verlinden, J., Horváth, I., & Nam, T.-J. (2009). Recording augmented reality experiences to capture design reviews. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 3(3), 189–200. <https://doi.org/10.1007/s12008-009-0074-8>
- Vinck, D. (2011). Taking intermediary objects and equipping work into account in the study of engineering practices. *Engineering Studies*, 3(1), 25–44. <https://doi.org/10.1080/19378629.2010.547989>
- Vinck, D., & Laureillard, P. (1996). Coordination par les objets dans les processus de conception. *Représenter, Attribuer, Coordonner*, 289–295.
- Voirin, J.-L. (2018). *Model-based system and architecture engineering with the arcadia method*. ISTE Press ; Elsevier.
- Vu-Thi, H., Marin, P., & Noël, F. (2011). Integrating Product Model and Whiteboard to Ease Collaborative Work in Global Product Development. In A. Bernard (Ed.), *Global Product Development* (pp. 217–226). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15973-2_21
- Ware, C., & Mitchell, P. (2008). Visualizing graphs in three dimensions. *ACM Transactions on Applied Perception*, 5(1), 1–15. <https://doi.org/10.1145/1279640.1279642>
- Weiland, K. J. (2021). *Future Model-Based Systems Engineering Vision and Strategy Bridge for NASA* (E-19949). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210014025>
- Weilkiens, T. (2015). *SYSMOD - the systems modeling toolbox pragmatic MBSE with SysML*.

- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The Factor Structure of the Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *14*(3), 298–312. <https://doi.org/10.1162/105474605323384654>
- Wolfartsberger, J. (2019). Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction*, *104*, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018>
- Wymore, A. W. (2018). *Model-Based Systems Engineering* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203746936>
- Wynn, D. C., Caldwell, N. H. M., & John Clarkson, P. (2014). Predicting Change Propagation in Complex Design Workflows. *Journal of Mechanical Design*, *136*(8), 081009. <https://doi.org/10.1115/1.4027495>
- Yoon, B., Kim, H., Lee, G. A., Billinghamurst, M., & Woo, W. (2019). The Effect of Avatar Appearance on Social Presence in an Augmented Reality Remote Collaboration. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 547–556. <https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797719>