



A NEW PATH TO GROWTH

on
asystem

CONTRIBUTION METHODOLOGIQUE A L'UTILISATION DE LA SIMULATION DANS LE CADRE DU DEPLOIEMENT DE L'EVALUATION D'ARCHITECTURE POUR LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES DE BASE

SOMMAIRE

1	Périmètre du sujet	3
2	Sujet technique : cas d'application	4
3	Verrous et Axes de recherche	5
4	Organisation des Tâches	6
4.1	Etat de l'art et collecte des retours d'expérience issus du terrain	6
4.2	Intégrer les démarches existantes : utilisation, complémentarité et continuité des modélisations et des activités de V&V d'architectures lors de la transition entre Architecting et Ingénierie système, cartographie des données afférentes.....	7
4.3	Identifier, cartographier et détourner le périmètre des outils de simulation pertinents, en intégrant les enjeux de V&V dont la sûreté et la sécurité des installations nucléaires visées	7
4.4	Etendre le cadre d'architecture à la simulation	7
4.4.1	Mettre en œuvre des cas-test industriels	8
4.4.2	Réfléchir à la genericité du cadre	8
4.4.3	Réaliser un démonstrateur.....	8
4.4.4	Publication.....	8
5	Encadrement / Financement	8
6	Candidature	9
7	Références	9
8	Annexes	10
8.1	Contexte des travaux : La chaire CIMES (Critical Infrastructures Model based system Engineering and early verification and validation by Simulation).....	10
8.2	Domaine des travaux : Les infrastructures nucléaires (critiques)	11
8.3	Enjeux des travaux : la vérification et la validation au plus tôt par simulation	12

GLOSSAIRE

<i>Abréviation</i>	<i>Définition</i>
SE	Systems Engineering [1]
MBSE	Model Based Systems Engineering [2]
MBSSE	Model Based Systems and Software Engineering
JN / DT	Jumeau Numérique / Digital Twin [3]
SJN / DTS	Système Jumeau Numérique / Digital Twin System [5]
V&V	Vérification et Validation
Early V&V	Vérification et Validation au plus tôt
IC / CI	Infrastructure Critique / Critical Infrastructure
INB	Installation Nucléaire de Base

Proposition de sujet de thèse

Contribution méthodologique à l'utilisation de la simulation dans le cadre du déploiement de l'évaluation d'architecture pour les installations nucléaires de base

1 PERIMETRE DU SUJET

Le sujet de thèse proposé s'inscrit dans une démarche MBSE déjà initiée (voir annexe 8.1). Il s'agira d'étendre un cadre d'architecture d'évaluation d'architectures de systèmes complexes, ici des installations critiques (IC) nucléaires – voir annexe 8.2 (fondé sur les principes et les concepts de l'ingénierie système basée modèles (MBSE [2][9]) et issu des travaux de thèse précédemment soumis par J. Bourdon [5]). Cette extension consiste à développer et déployer *in situ* une méthode promouvant et opérationnalisant l'usage simultané de la simulation et de l'analyse de données en évaluation d'architectures. Cette opérationnalisation doit tenir compte de différents facteurs qui freinent habituellement l'évaluation des alternatives d'architectures (fonctionnelle, logique et physique) d'un système à faire et de son système pour faire : travailler de proche en proche et donc au plus tôt, sur la base de modèles quelquefois partiels en garantissant l'évolution du niveau de maturité des architectures candidates telles que modélisées et la convergence vers une solution pouvant ensuite être optimisée en confiance.

Plus précisément, la base de ce sujet est constituée des travaux réalisés sur la conceptualisation des architectures et leur évaluation durant les phases d'Architecting et le début des phases d'ingénierie (APS, APD) proposés dans le cadre issu des travaux cités plus haut. Il s'agit en conséquence **d'étendre l'utilisation de ce cadre (i) d'un point de vue temporel, i.e. tout au long des phases de conception, (ii) d'un point de vue périmètre pour décrire avec une précision suffisante le Système à faire (SAF) sachant qu'à date, les travaux ont été concentrés sur le système pour faire (SPF), (iii) en l'enrichissant de l'apport d'une vérification et d'une validation au plus tôt (des modèles pris isolément, puis fédérés et des systèmes SAF et SPF) privilégiant l'usage de la simulation.** Il s'agit donc ici de coupler simulation et analyse des données structurées afférentes à l'un ou l'autre des deux systèmes afin de **simuler les conséquences sur un ensemble de paramètres de sortie (techniques ou non techniques) de choix de design s'effectuant via des paramètres d'entrée.** Ces simulations se baseront sur des outils logiciels et des standards industriels déjà utilisés, spécifiques ou non au domaine nucléaire, ainsi que des développements ad hoc.

L'ensemble de la méthode doit être développé et mis en pratique en tenant compte des spécificités propres à l'industrie nucléaire, notamment les contraintes, régulations et bonnes pratiques du domaine nucléaire issues des standards externes (AIEA, WANO, etc.) ou internes (doctrine qualité ASSYSTEM).

Le nouveau cadre d'architecture qui émergera et la méthode qui le mettra en œuvre devront mettre en exergue des concepts, des langages, une démarche opératoire et une continuité d'outils interopérables (de modélisation, de simulation, d'évaluation, ...) permettant de manipuler en cohérence et en confiance les éléments nécessaires des phases de conception en vue de définir ces paramètres d'entrée, et leurs relations afin d'obtenir les paramètres de sortie demandés (systèmes, interfaces, ...)

Ce cadre d'architecture devra donc s'inspirer du principe du Digital Thread illustré Figure 1 qui donne une idée d'un espace de solutions à la fois techniques et organisationnelles (processus) potentiellement impactés par cette thèse. Elle synthétise en effet la cohabitation attendue entre processus d'IS, données et modèles. Le résultat attendu des modélisations doivent permettre de

converger dans un premier temps vers une maquette numérique de chaque système (donc spécifique à chaque système mais interopérable avec l'autre) répondant aux besoins de conception et de réalisation. Chaque maquette numérique devrait alors naturellement faciliter la construction ensuite de Jumeaux Numériques (JN - Digital Twins, DT) du Système-Projet (SPF) et du Système-Produit (SAF). En particulier le JN du Système-Produit émerge à l'issue de la réalisation, puis de la livraison, de l'installation et de la mise en exploitation du SAF. Il doit remplir des besoins en exploitation, MCO (Maintenance en Conditions Opérationnelles) et fin de vie, ou encore en tant que support de formation pour des opérateurs, ou que support à l'optimisation et au paramétrage du système cible. Le JN du Système-Projet apparait pour sa part dès le lancement du projet, en amont du JN du système-Produit et permet effectivement de piloter le projet, d'en évaluer et d'agir sur les écarts, etc.

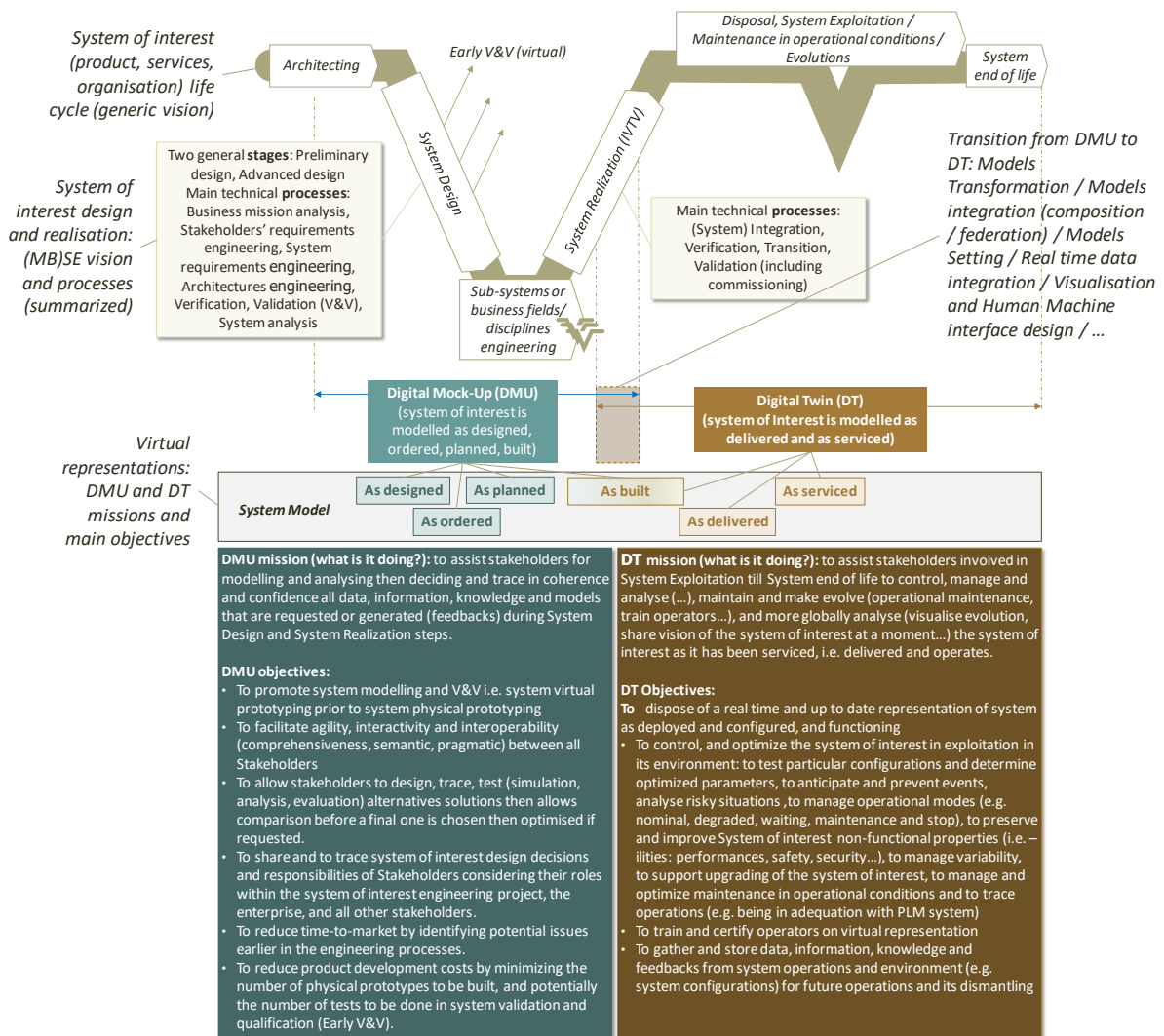


Figure 1: cycle de vie système, Ingénierie Système (basée modèles) et représentations numériques

2 SUJET TECHNIQUE : CAS D'APPLICATION

La thèse disposera de trois champs applicatifs :

- Le projet **Generative System Engineering**, qui vise à mettre en œuvre opérationnellement l'ingénierie système dans le but d'automatiser certains contrôles de conformité sur le design et raccourcir les temps de cycle de validation d'un design ;

- Le projet **Réplication**, projet d'innovation interne porté par Assystem et notamment initié sur le SMR (Small Modular Reactor) UK de Rolls Royce. Ce projet vise à développer un outil de design paramétrique d'une source froide de petit réacteur modulaire ;
- Le projet **NAAREA**, projet de petit réacteur modulaire à sels fondus (MSR : Molten Salt Reactor), pour lequel Assystem est chargé de la spécification, de la réalisation et de mise en œuvre du jumeau numérique des installations, incluant le prototype de réacteur, ainsi que les infrastructures afférentes ;
- Le projet **Sizewell C**, actuellement en démarrage, pour lequel le scope d'Assystem reste à définir finement, mais pour lequel des attendus importants en termes d'optimisation de design sur la base des modèles précédents déployés à Flamanville et Hinkley Point et de la simulation sont attendus.

3 VERROUS ET AXES DE RECHERCHE

De par son REX industriel, ASSYSTEM a identifié un ensemble de problématiques et de verrous relatifs à la mise en œuvre de la simulation dans un cadre de design paramétrique, en support en général à la démarche de conception, et plus spécifiquement aux processus de V&V afférents. Dans ce cadre, les verrous associés peuvent être regroupés en quatre catégories :

- Les verrous associés à l'organisation, la structuration et l'accessibilité des données. En effet, sur les projets d'ingénierie complexe, sont observés (i) un silotage des données au sein des équipes en charge de la définition du design tout au long des phases de conception (pouvant résulter de l'intervention de multiples entités, d'un manque d'interopérabilité des outils ou des approches, d'une fédération des modèles partielles) et (ii) une déperdition d'information entre les équipes en charge du design et les équipes en charge de la V&V (pouvant s'expliquer par des raisons similaires) ;
- Les verrous liés à la formalisation des attendus. En effet, sur les projets d'ingénierie d'infrastructures critiques en particulier nucléaire, un manque de formalisation des attendus liés à la vérification et à la validation des systèmes à différent niveau a été observée. Ce verrou découle à la fois d'une intégration méthodologique partielle à date de la V&V dans les référentiels et processus, d'une complexité à consolider une vision holistique du système dont la V&V est attendue à ses différents niveaux de découpage, et d'un manque de vision, par les acteurs en charge de la V&V des possibilités de vérification et de validation offerte notamment par la simulation ;
- Les verrous liés à la construction de la plateforme de simulation (maquette numérique ou jumeau numérique). En effet, à date, et en particulier du fait des verrous précédents, l'impact des choix d'ingénierie opérés par les équipes en charge du design à la fois sur les autres équipes et sur la V & V n'est pas maîtrisé. Il en résulte que les outils de simulation utilisés aujourd'hui le sont sur un périmètre restreint, souvent mono-domaine et sans intégration d'une approche V & V ;
- Les verrous liés à la capitalisation des connaissances et au retour d'expérience. En effet, sur les projets d'ingénierie d'infrastructures critiques en particulier nucléaire, les connaissances et compétences liées à la mise en œuvre de la simulation et des modèles subséquents est peu formalisées, très dépendante des individus et faiblement capitalisée. En résulte une difficulté significative à mettre en œuvre de l'amélioration continue sur ces sujets.

Les causes des verrous listés ci-dessus peuvent être brièvement identifiées ici :

- Absence de démarche structurée et documentée de continuité des données en fonction des classiques facteurs d'évolution de ces données dans le temps du projet (notions dites de 5V actuellement à l'étude dans le cadre d'une autre thèse en cours : Variété et Variabilité des données, Volume grandissant, Véracité questionable, Vitesse d'évolution) ;
- Absence de démarche structurée et documentée de continuité et d'interopérabilité pourtant requises des outils ;
- Faible maîtrise des principes même d'une organisation des parties prenantes selon les modèles d'entreprise étendue ou d'entreprise virtuelle, l'un et l'autre étant prometteurs mais sans réelle exploration des impacts sur le projet;
- Absence ou connaissances ponctuelles et parcellaires, voire confusion de notions de maquette numérique et de jumeau numérique sans réelle prise en compte de la continuité numérique pourtant attendue ;
- Absence d'échelon consolidé combinant une vision holistique des systèmes et une prise en compte des enjeux de V&V ;
- Absence de démarche structurée et documentée de fédération ou a minima de composition des modèles ;
- Absence de démarche structurée et documentée de partage et collaboration autour de modèles et de données (approches MBSE et DBSE encore isolées) ;
- Absence de démarche structurée et documentée d'utilisation de la simulation ;
- Absence de démarche structurée et documentée de V&V des modèles en qualité, plausibilité et crédibilité.

Il s'agit donc de verrous conceptuels, méthodologiques, techniques, mais aussi organisationnels et humains.

4 ORGANISATION DES TACHES

Pour lever ces verrous et assurer une mise en œuvre efficace et structurée de la modélisation en support à l'évaluation d'architecture et la V&V tout au long des phases de conception, les objectifs du travail de recherche, et les grandes tâches à mener à bien, sont donc :

4.1 Etat de l'art et collecte des retours d'expérience issus du terrain

Il s'agit ici, et durant la totalité des travaux, d'acquies et parfaire les connaissances du candidat autour des travaux de référence dans le domaine du MBSE, de l'Ingénierie Système, des cadres d'architectures, de l'IVTV, de la simulation et l'analyse de données. Un effort particulier sera porté sur les travaux portant sur :

- La notion d'architecture, la systémique, la complexité, les systèmes de systèmes, les modèles d'organisation, ... ;
- Les techniques et stratégies d'IVTV, souvent couplées avec celles de commissioning telles que décrites dans les travaux de thèse d'A. Gaignebet [6] ;
- Les techniques, approches, modèles et cadres pour la modélisation et l'évaluation d'architectures de systèmes complexes ;
- Les standards dans les domaines concernés dont ISO29110, ISO/IEC 42020, ISO/IEC 42030, ISO 26641, FMI/FMU, HAL, référentiels ASN, référentiels internes ASSYSTEM, etc. ;

Ces investigations porteront fortement aussi sur les aspects métier (domaine des infrastructures critiques nucléaires) et techniques (nécessaires pour le développement des démonstrateurs supportant les méthodes proposées dont : outils et techniques de transformation de

modèles, de développement, d'accès à des bases de données distantes et hétérogènes, de simulation, ...). Le retour d'expérience des équipes impliquées dans les phases initiales des projets PVM et NAAREA est essentiellement détenu par les équipes opérationnelles. Ce retour d'expérience sera complété par une recherche bibliographique sur les cadres d'architecture d'entreprise existant et une analyse élargie au niveau des acteurs de l'industrie nucléaire permettant d'appréhender la problématique 'simulation' de manière globale et générique.

4.2 Intégrer les démarches existantes : utilisation, complémentarité et continuité des modélisations et des activités de V&V d'architectures lors de la transition entre Architecting et Ingénierie système, cartographie des données afférentes

Il s'agit ici de prendre connaissance et de s'imprégner des démarches déjà initiées dans le cadre de la chaire CIME, en particulier :

- Concernant l'utilisation des architectures, des principes déjà définis en termes (i) de formalisation des architectures, (ii) d'évaluation des architectures, (iii) d'organisation, de rôles et de responsabilités. Il s'agit ici de voir comment ces travaux peuvent être étendus aux phases ultérieures de conception, comment les éléments de simulation peuvent permettre d'apporter des réponses à certains des points évoqués, et comment cela peut être formalisé pour intégration dans une démarche de V&V. Une attention particulière sera à apporter au cas-test ESTRADÉ, pour lequel des investigations préliminaires ont été menées.
- Concernant la cartographie des données, des principes déjà définis en termes (i) d'accès aux données et (ii) de mise en place d'un modèle de données. Entendu que dans le cadre de la simulation, l'accès efficient à des données organisées est critique pour permettre des résultats probants, il apparaît nécessaire de s'appuyer sur ce qui a été développé pour durant les phases initiales des projets, assurer une bonne connaissance et compréhension du paysage en termes de données.

4.3 Identifier, cartographier et détourner le périmètre des outils de simulation pertinents, en intégrant les enjeux de V&V dont la sûreté et la sécurité des installations nucléaires visées

Sur la base de l'état de l'art et la poursuite du travail avec les projets, identification des domaines et outils permettant de réaliser la simulation. Une attention particulière sera à porter aux problématiques de V&V et de qualification afférentes, ainsi qu'aux différents niveaux de fédération des modèles possibles pour converger vers la notion de maquette numérique.

4.4 Etendre le cadre d'architecture à la simulation

Il s'agit ici de compléter (pour le volet modélisation) et de rechercher, de définir, d'identifier, de caractériser et de formaliser l'ensemble des objets pertinents (pour le volet simulation) les éléments du cadre de modélisation et d'analyse prenant en compte l'utilisation de la simulation et ses prérequis dans le cadre d'une installation nucléaire, et couvrant les besoins et verrous identifiés ci-dessus. Plus spécifiquement, il s'agira :

- De compléter les concepts existants avec ceux qui seront requis pour intégrer les dimensions simulation et V&V, en particulier pour décrire avec suffisamment de précision le système à faire ainsi que les attributs et les relations entre ces concepts permettant de les organiser, de les manipuler et de les partager en confiance
- D'intégrer ces concepts au sein du langage déjà formalisé en y apportant les modifications nécessaires
- De compléter la démarche opératoire existante à la lumière des nouveaux attendus identifiés,

- en particulier dans l'étape précédente, et des nouveaux concepts à prendre en compte
- De confirmer (ou d'infirmier) l'utilisation des outils précédemment identifiés en support à la démarche
 - De transcrire non seulement l'état de l'art industriel, mais aussi l'inventaire des outils, logiciels et bonnes pratiques liées à la simulation sous forme de référentiel de connaissances

Cette phase du travail sera à mener en parallèle et continu, compte-tenu (i) de son évolutivité au regard des pratiques, techniques et projets et (ii) de son caractère transverse.

4.4.1 Mettre en œuvre des cas-test industriels

En parallèle en particulier de la phase précédente, il s'agit ici de confronter les concepts, et étapes de démarche opératoire (en particulier) aux pratiques et contextes concrets de projets industriels en vue de :

- Confirmer la faisabilité pratique de la démarche (vis-à-vis des données disponibles, de leur structuration, des phasages et temporalités projet, de la position d'ingénieur, ...)
- Confirmer son apport vis-à-vis d'attendus concrets
- Confirmer la capacité à convaincre des acteurs projets (lisibilité de l'approche, conviction des plus apportés) sur les sujets qui les impactent
- Enrichir le cadre à la lumière d'éléments remontés 'du terrain', plus particulièrement le référentiel de bonnes pratiques
- Valider, éventuellement sur des périmètres restreints, le cadre d'architecture proposé

4.4.2 Réfléchir à la généricité du cadre

L'idée n'est pas d'obtenir un modèle descriptif de la mise en œuvre d'une démarche de simulation, de maquette numérique ou de jumeau numérique dans le cadre de l'un des cas d'application identifiés ou à venir, mais, en repartant des travaux précédents, de définir un modèle générique de mise en œuvre de cette approche pour une installation nucléaire tout en le confrontant et en validant sur la base des cas pratiques constitués par les deux exemples concrets.

4.4.3 Réaliser un démonstrateur

Il s'agit là de mettre en œuvre une déclinaison outillée du cadre d'architecture proposé. Sur la base d'un outil à définir, le démonstrateur devra donc pouvoir être mis en œuvre dans le cadre d'un projet concret et permettre (i) la modélisation en particulier du système à faire, (ii) la description de l'architecture de la plateforme de simulation (jumeau numérique, maquette numérique, ...) à mettre en œuvre et (iii) la mise en œuvre concrète de cette plateforme via l'orchestration de différents outils afin d'obtenir des données de sorties sur la base de données d'entrée. Il pourra, ou non, se baser sur les démonstrateurs déjà réalisés dans le cadre de la chaire CIME.

4.4.4 Publication

Durant la période de thèse, il sera nécessaire de mener à bien une politique de publication a minima basée sur deux conférences Internationales (une en fin de première année, une en cours ou en fin de deuxième année ou début de troisième année) à choisir dans les communautés concernées (IS, Mécatronique, V&V) et une soumission dans une revue internationale en fin de troisième année.

5 ENCADREMENT / FINANCEMENT

L'École Doctorale de rattachement est l'ED I2S de l'Université Montpellier. La thèse se déroulera au sein de l'entreprise ASSYSTEM (Paris, la Défense) et à l'IMT Mines Alès (7 rue Jules Renard, 30319 Alès)

- <http://www.mines-ales.fr/>) dans le cadre de la Chaire Industrielle CIMES « Critical Infrastructures Model based system Engineering and early verification and validation by Simulation » (Ingénierie Système Basée sur des modèles et Vérification et Validation au plus tôt par la Simulation des Infrastructures Critiques)

Elle sera sous la Direction de M. Vincent Chapurlat (Professeur IMT Mines Alès) et par M. Victor Richet (ASSYSTEM).

Contacts :

- Victor Richet : vrichet@assystem.com
- Vincent Chapurlat : vincent.chapurlat@mines-ales.fr

La durée du CDD est de 36 mois.

6 CANDIDATURE

Ce projet concerne un(e) étudiant(e) possédant un diplôme de Master ou d'Ingénieur. Sans les considérer comme des pré requis stricts, les compétences suivantes seront fortement appréciées pour mener à bien les travaux :

- Approche Système
- Simulation
- Ingénierie Système et MBSE : principes, processus, mise en pratique
- Modélisation multi paradigmes et multi langages / Méta modélisation
- Ouverture d'esprit et curiosité, autonomie et force de proposition (juger, décider, convaincre)
- Développement informatique

Tout(e) candidat(e) intéressé(e) est prié(e) de faire parvenir au plus vite son dossier de candidature par courrier électronique à :

- Victor Richet : vrichet@assystem.com
- Vincent Chapurlat : vincent.chapurlat@mines-ales.fr

Ce dossier doit être constitué des pièces suivantes :

- Un CV détaillé ;
- Une lettre de motivation décrivant l'intérêt et les souhaits au regard du domaine et du sujet proposés ;
- Des pièces attestant son niveau de diplôme (obtenu ou en cours d'obtention) ;
- Tous documents jugés nécessaires dont, en particulier, lettres de recommandation avec coordonnées précises des personnes signataires, présentation des travaux de R&D menés à bien durant la scolarité et/ou dans le cadre d'expériences professionnelles antérieures.

Une entrevue entre le (la) candidat(e) et les parties prenantes de cette thèse sera organisée très rapidement. Pour cela, le (la) candidat(e) devra présenter son projet de recherche et de développement au regard du sujet de thèse proposé.

Date limite de candidature : 30 Juillet 2024

7 REFERENCES

- [1] ISO/IEC, ISO/IEC/IEEE 15288:2023 Systems and software engineering - System life cycle processes. 2023.

- [2] ISO/IEC, ISO/IEC/IEEE 24641:2023 Systems and Software engineering - Methods and tools for model-based systems and software engineering. 2023.
- [3] ISO, ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing - Part 1: Overview and general principles. 2021.
- [4] ISO/IEC, ISO/IEC 30173:2023 Digital twin - Concepts and terminology. 2023.
- [5] Jérémy Bourdon, Pierre Couturier, Vincent Chapurlat, Robert Plana, Victor Richet, Benjamin Baudouin, Model-Based Architecting Evaluation Method for the Delivery of Complex Nuclear Projects, International Journal Systems, INCOSE Ed., 2023, 10.1002/sys.21705
- [6] Alan Gaignebet, Vincent Chapurlat, Grégory Zacharewicz, Victor Richet, Robert Plana. A Model Based System Commissioning Approach for Nuclear Facilities. Sustainability, MDPI, 2021, 13 (19), pp.10520. <10.3390/su131910520>
- [7] M. El Alaoui, V. Chapurlat, S. Rabah, V. Richet, R. Plana, An approach for ontology-based research and recommendation on systems engineering projects, 27th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2023), Procedia Computer Science, 10.1016/j.procs.2023.10.123
- [8] Emir ROUMILI, Jean-François BOSSU, Vincent CHAPURLAT, Nicolas DACLIN, Robert PLANA, Jérôme TIXIER,, Collaborative safety requirements engineering: an approach for modelling and assessment of nuclear safety requirements in MBSE context, 22nd IFIP/SOCOLNET Working Conference on Virtual Enterprises PRO'VE 2021, Saint Etienne, November 2021
- [9] Vincent Chapurlat, Blazho Nastov, Jérémy Bourdon, A conceptual, methodological and technical contribution for Modeling and V&V in MBSE context, 8th IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2022, Vienna, Austria, October 24-26, 2022

8 ANNEXES

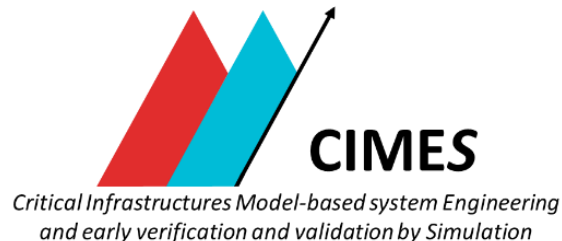
8.1 Contexte des travaux : La chaire CIMES (Critical Infrastructures Model based system Engineering and early verification and validation by Simulation)

Dans le cadre de ses activités de R&D et de ses activités contractuelles de service auprès de ses clients, AEOS et IMT Mines Alès ont développé ensemble la Chaire Industrielle CIMES. AEOS souhaite faire perdurer ses efforts passés au sein d'une précédente chaire de R&D baptisée CIME ([6][7][8]) et mieux maîtriser le cadre méthodologique MBSE (Model Based Systems Engineering, aujourd'hui étendu au MBSE - Model Based Systems and Software Engineering [2]), pouvoir l'appliquer en confiance et avec succès sur des projets concrets. Pour cela, la chaire CIME avait pour objectifs de :

- **Développer des méthodes** sur les principes MBSE. Il s'agit dans ce cas de créer, adapter ou intégrer des concepts, techniques, démarches opératoires, référentiels de données, d'informations et de connaissances et des outils supports (de modélisation, d'analyse, de vérification, de validation, d'évaluation, de gestion, de navigation, ...). Ces méthodes visent à entraîner les collaborateurs d'AEOS à maîtriser le MBSE dans leurs secteurs d'ingénierie ;
- **Déployer ce cadre méthodologique MBSE** chez AEOS et vers ses clients répondant aux besoins d'ingénierie d'Infrastructures Critiques de ces clients. Le but est ici d'appliquer concrètement les méthodes sur des cas spécifiques.
- **Faire reconnaître le niveau de maturité de l'entreprise et démontrer sa maîtrise du MBSE** auprès de ses partenaires comme pour mener à bien ses différentes activités internes. Le but

est ici de conférer à l'entreprise un avantage concurrentiel et de maximiser la valeur ajoutée des activités de R&D (d'architecting, d'ingénierie, de conseil et d'accompagnement) de AEOS.

La Chaire CIMES se concentre aujourd'hui sur l'importance et l'intérêt d'une Vérification et d'une Validation au plus tôt et de la maîtrise du développement de moyens de simulation auprès de ses partenaires, de ses clients et de ses collaborateurs.



8.2 Domaine des travaux : Les infrastructures nucléaires (critiques)

La conception, la construction et la livraison d'INB (Installation Nucléaire de base) sont dans le monde entier des projets complexes à très longue échéance et sujets à de nombreuses évolutions et modifications en cours d'exécution.

L'organisation autour du projet et l'environnement dans lequel celui-ci se déroule constituent son contexte et affectent inévitablement chaque projet. Cet environnement est lui-même caractérisé par les facteurs suivants d'influence qui sont d'ordre :

- **Politique** : La mise en œuvre d'un programme nucléaire et les choix technologiques associés dépendent au premier d'ordre d'une stratégie industrielle et énergétique élaborée à un échelon politique.
- **Sociologique** : Les projets d'INB sont à l'origine de différents débats. Les besoins de groupes spécifiques parmi les parties prenantes doivent faire l'objet d'une attention particulière.
- **Réglementaire** : Les projets de conception d'INB doivent, en effet, accorder une attention stricte et particulière aux exigences de sûreté, de sécurité, d'environnement et de démantèlement, aux questions de gestion des déchets nucléaires et à l'acceptation par le public.
- **Économique** : Les projets de conception d'INB nécessitent un investissement important limitant le nombre d'acteurs pouvant supporter l'apport d'un tel capital.
- **International** : La plupart des projets s'inscrivent dans un contexte international. Les facteurs de complexité dans les dimensions diversité et taille de projet

Les projets de conception d'une INB font appel à une grande diversité d'activités et nécessitent puis impliquent des ressources ayant des natures et des rôles variés. Cela se traduit notamment par l'implication de différents corps de métiers sur ces projets, qu'il s'agisse des domaines du contrôle-commande, de la mécanique, du génie-civil ou CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation) par exemple. De plus, ce sont de grands projets qui durent plusieurs années, voire des dizaines d'années.

En complément à cette complexité organisationnelle vient s'ajouter la complexité technique inhérente à l'INB à concevoir. Pour réaliser un îlot nucléaire, il faut faire face à une grande hétérogénéité technologique et une diversité des métiers à impliquer pour l'intégration de ces équipements. Associées à ces équipements, ce sont des millions de données d'ingénierie à encadrer et manipuler. La majorité de ces données sont interdépendantes rendant particulièrement difficile la traçabilité et la

gestion de tout changement dans la conception et l'identification des éléments affectés. Au-delà des facteurs de diversité, la taille des projets d'INB reste sensiblement conséquente.

Parallèlement, le nombre d'acteurs, la durée du cycle de vie et l'incertitude inhérente au contexte projet (évolution et changement des attentes des acteurs, connaissance des installations...) complexifient la collecte, la caractérisation et l'utilisation (valuation, paramétrage, partage...) de l'ensemble des données d'ingénierie.

AEOS souhaite continuer l'acquisition, l'acculturation et le déploiement du MBSE dans tous ses projets d'ingénierie d'infrastructures critiques. L'objectif est toujours de parfaire sa palette de compétences, de méthodes et de moyens techniques pour assister ses collaborateurs et gagner encore en autonomie, maîtrise et performance durant leurs activités d'ingénierie. Il s'agit aussi de prendre en compte les grands enjeux de la décennie à venir.

L'objectif global vise à développer, valider et déployer de nouveaux moyens méthodologiques et techniques qui seront ainsi à la disposition de ses ingénieurs et architectes système, de ses managers de projets et, plus globalement, de ses collaborateurs directs ou indirects pour :

- **Conforter le déploiement de la modélisation et la continuité méthodologique** en cohérence avec les besoins de modélisation et de simulation système, en fédérant et tenant compte des modélisations et des simulations venant des ingénieries métiers, en privilégiant un travail collaboratif toujours dans un contexte MBSE et avec les principes (approche et vision système, concepts de l'IS et du MBSE, travaux déjà engagés en MBSE dans le cadre de la précédente Chaire CIME, ...) et des processus de l'ingénierie système ;

- **Intégrer les ingénieries de métier et le MBSE qui sont indubitablement liés lors de projets d'ingénierie d'infrastructures critiques nucléaires**, notamment vis-à-vis des exigences de sûreté et de sécurité via des modélisations et des simulations, et en visant une meilleure traçabilité des données et des décisions. Il s'agit donc de tenir compte des spécificités liées à ce domaine (durée, nombre de parties prenantes, impacts des réglementations, exigences, ...) et de l'environnement existant (via par exemple des modèles de comportement, simulations multi-physiques, ...) ;

- **Favoriser et promouvoir une vision intégrée et une culture système produit / système projet** (intégrant notamment des environnements de modélisation partagés) en se concentrant sur la dépendance inévitable et donc la nécessaire convergence entre, d'une part, la conception puis la réalisation de l'infrastructure cible elle-même (le système à faire), et d'autre part, le projet lui-même (i.e. les étapes, le planning, les ressources, les livrables, ... i.e. le système pour faire). Ce dernier vise à mener à bien cette conception et cette réalisation du système pour faire en vue d'une livraison conforme aux attentes du client et de toutes ces parties prenantes (respect des délais, des coûts, des contraintes de sûreté, de sécurité, des facteurs humains et organisationnels dont les usages, ...).

8.3 Enjeux des travaux : la vérification et la validation au plus tôt par simulation

La **Vérification** est définie comme « *a set of activities that compares a system or system element against the required characteristics. This includes, but is not limited to, specified requirements, design description and the system itself. The system was built right* ». Il s'agit ici aussi bien de vérification d'un modèle du système d'intérêt que du système d'intérêt tel qu'il est modélisé.

La **Validation** est définie comme « *The set of activities ensuring and gaining confidence that a system is able to accomplish its intended use, goals and objectives (i.e., meet stakeholder requirements) in the intended operational environment. The right system was built* ». C'est la validation du système d'intérêt qui est bien entendu l'enjeu sachant que la validation d'un modèle est définie comme « *The process of ensuring the model correctly represents the domain or system-of-interest* ».

En opérant itérativement au cours des processus techniques de l'Ingénierie système, la V&V doit être

pratiquée au plus tôt et on parle alors d'**Early V&V**. C'est un passage obligé pour guider, s'assurer ou à défaut se rassurer, pour progresser dans la conception en : (i) Aidant pas à pas à détecter des erreurs, oublis, omissions ou ambiguïtés, d'anticiper et de tester des situations en ne mettant en jeu que des modèles, de tester la non-régression de la solution, ... ; (ii) Argumentant l'atteinte d'un niveau de maturité de la solution ; (iii) Argumentant et démontrant tout particulièrement l'atteinte et le respect des exigences de sûreté et de sécurité ; (iv) S'assurant que l'on progresse en conformité avec les réglementations, usages et coutumes métier et domaine sans pour autant se couper de possibles innovations.

En contexte MBSE et MBSSE, la prédominance de la modélisation et donc l'usage privilégié de modèles nécessite de préciser deux objets cibles : le modèle et le système. On peut alors parler de :

- **Vérification du modèle** (ou contrôle de la qualité du modèle) : "Ai-je bien fait le modèle ?" ou encore "ai-je procédé et suivi les règles et pratiques pour modéliser le système d'intérêt ?" ;

- **Validation du modèle** : "ai-je fait le bon modèle ?" ou au moins "ai-je modélisé le système d'intérêt que j'ai à l'esprit de manière à pouvoir affirmer avec confiance que ce système d'intérêt est une bonne solution ? » ;

- Analyse de modèle pour la vérification du système (ou **vérification système au plus tôt**) : "ai-je modélisé correctement le système d'intérêt ?". Le système d'intérêt, tel qu'il est modélisé (c'est-à-dire représenté par un ensemble de modèles hétérogènes, fédérés ou simplement composés), est-il cohérent, non ambigu, conforme aux règles de l'entreprise et du domaine, et répond-il à certaines des exigences spécifiées pour le système d'intérêt à condition que celles-ci soient analysables à travers ces modèles ?

- Analyse de modèle pour la validation du système (ou la **validation système au plus tôt**) : "ai-je modélisé le bon système d'intérêt ?" avec trois questions essentielles :

- Le système d'intérêt, tel que modélisé dans le modèle de système, répond-il à toutes les exigences qui lui sont attribuées dans toutes les situations opérationnelles qui ont été spécifiées ?
- Le système d'intérêt, tel que modélisé dans le modèle de système, agit-il et inter agit-il comme souhaité avec les systèmes mis en interfaces avec lui dans ses différents contextes opérationnels et dans toutes les situations qui ont été spécifiées ?
- Le système d'intérêt, tel que modélisé dans le modèle de système, est-il apte et capable de réagir, avec une maîtrise supposée suffisante de son comportement, face à l'émergence potentielle de phénomènes imprévisibles ?

Cette V&V au plus tôt nécessite donc de développer concepts, méthodes et outils pour, au final, établir puis garantir cette confiance avec des gains notables de temps, financiers, de moyens et une réduction des risques liés aux erreurs ou omissions, lesquels ne peuvent être réalisés sans un recours significatif aux modèles dès lors que cette stratégie est possible. La V&V au plus tôt peut se faire au moyen de plusieurs dont la simulation qui est ici mise en avant.

La simulation repose sur l'exécution des modèles au moyen d'outils informatiques. C'est un moyen aujourd'hui reconnu, outillé et faisant l'objet de standards. Elle est utile dans les projets, par exemple, pour faciliter la compréhension d'un comportement, permettre de fait de vérifier que les comportements décrits correspondent bien aux exigences spécifiées et de valider partiellement une solution ou encore d'évaluer et donc alimenter ensuite le processus de comparaison et d'argumentation d'alternatives de solutions. Mettre en œuvre de la simulation nécessite plusieurs choses pour arriver à reproduire d'une manière jugée suffisante le comportement d'un système d'intérêt. Le but est bien de s'assurer que ce système d'intérêt, en tous cas tel qu'il est modélisé,

possède le comportement attendu et spécifié, possède les propriétés souhaitées telles que sûreté / sécurité / maintenabilité / etc. et respecte certaines exigences / contraintes / règles métier des parties prenantes jugées essentielles.

Sa mise en œuvre nécessite donc de lever des verrous conceptuels, méthodologiques, organisationnels et techniques : (i) de modélisation du système d'intérêt (rappelons qu'il s'agit ici, considérés séparément ou au contraire en interaction, du système à faire et du système pour faire), (ii) de modélisation des environnements opérationnels dans lesquels le système d'intérêt va devoir remplir sa mission et donc interagir avec les autres systèmes qui composent et tapissent ces environnements opérationnels, (iii) de fédération ou de composition de ces modèles qui sont par nature hétérogènes puisque conformes à des langages de modélisation différents et souvent non interopérables, mais qui participent tous à la description d'un même système avec des points de vue et des niveaux de détail propres, (iv) de liaison de ces modélisations ou d'irrigation de leur exécution au moyens des données, informations et connaissances disponibles mais elles aussi hétérogènes ou de qualité diverse, (v) de mécanismes (sémantique opérationnelle de langage de modélisation métier, principes de type moniteur ou fournis par des approches standardisées comme HLA ou FMI/FMU) et moyens d'exécution des fédérations de ces modèles hétérogènes, (vi) intégration d'outils de simulation métier ou domaine, donc plus ou moins spécifiques pour reproduire certains comportements particuliers, et (vii) de rendu et de contrôle, c'est-à-dire d'interaction utilisateurs / modèle(s) / simulation et de traçabilité/ d'évaluation de la valeur et d'argumentaire de la qualité des résultats.

Plus spécifiquement, et pour Assystem, la simulation a pour objectif de :

- **Disposer de mesures précises pour mieux maîtriser le projet et des conséquences des choix visant (entre autres) à détecter les déclencheurs des futures dérives.** Cette détection nécessite d'être faite au plus tôt en utilisant différentes stratégies de Vérification et de Validation basées sur la modélisation guidée, la simulation ou l'émulation, l'aide à l'expertise métier et, dans une moindre mesure ici, l'usage d'approches formelles ;

- **Identifier et agir au plus tôt sur les causes des dérives impactant la confiance dans la bonne réalisation des projets, de façon ciblée et adaptée. Les causes sont d'origines multiples et hétérogènes.** Il peut s'agir d'oublis, d'erreurs, de sur ou sous-spécifications ou encore de blancs ou de redites devant être désambiguïsées, qu'elles soient volontaires ou involontaires. Il peut aussi s'agir du résultat à une acculturation trop faible des acteurs à l'ingénierie système, d'incompréhensions sur les périmètres de responsabilité entre un MOA et un MOE, d'organisations de projet s'avérant friables, de problèmes de compétences à des moments clés du projet, de plannings irréalistes, d'un manque de communication général entre les acteurs. Ces causes sont alors liées parfois à des problématiques purement contractuelles. Toutes ces causes concernent de fait invariablement à la fois le système à faire et le système pour faire ;

- **Conforter la continuité numérique** en cohérence avec les outils (existants et ceux développés dans le cadre de la Chaire CIME, ...) et aller peu à peu vers une couverture numérique de l'ensemble des activités visées par AEOS d'un système (système à faire ou système pour faire ou les deux mis en interaction et vus alors comme un système de systèmes). Cette continuité numérique vise, via la mise en relation et en cohérence des outils et données relatifs à un système, **à constituer par agglomération une maquette numérique en conception, et/ou un jumeau numérique du système en réalisation**, exploitation ou démantèlement.

Plus largement, il s'agit d'impliquer, construire et maintenir de proche en proche la confiance dans la bonne réalisation des projets, et la conviction des parties prenantes d'effectivement 'mieux faire' qui y est associée. En effet, à l'échelle des filières concernées et du fait à la fois de l'accroissement de la complexité des projets, et de leur criticité, des dérives (surcoûts, délais, usages des ressources, ...)



pouvant induire une perte de confiance de l'ensemble des parties prenantes d'un projet, ont été observées.

A NEW PATH TO GROWTH

