



HAL
open science

Contribution méthodologique au déploiement de l'évaluation d'architecture pour les installations nucléaires de base: La méthode EVA-CIME

Jérémy Bourdon

► **To cite this version:**

Jérémy Bourdon. Contribution méthodologique au déploiement de l'évaluation d'architecture pour les installations nucléaires de base: La méthode EVA-CIME. Automatique. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2022. Français. NNT : 2022EMAL0005 . tel-03994413

HAL Id: tel-03994413

<https://theses.hal.science/tel-03994413>

Submitted on 17 Feb 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'INSTITUT MINES-TELECOM (IMT) –
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES D'ALÈS (IMT MINES ALÈS)**

En SYstèmes, Automatique et Micro-électronique

École doctorale I2S – Information, Structures, Systèmes portée par l'Université de Montpellier

Unité de recherche : Laboratoire des Sciences des Risques (LSR), IMT Mines Alès

**Contribution méthodologique au déploiement de
l'évaluation d'architecture pour les installations
nucléaires de base : la méthode EVA-CIME**

Présentée par Jérémy BOURDON

Le 07 Novembre 2022

**Sous la direction de Vincent CHAPURLAT
et de Pierre COUTURIER**

Devant le jury composé de :

Marija JANKOVIC, Professeure des Universités, Centrale-Supelec

Éric BONJOUR, Professeur des Universités, Université de Lorraine

Robert PLANA, Chief Technology Officer, Assystem

Victor RICHET, Ingénieur, Assystem STUP

Pierre COUTURIER, Maître assistant, IMT Mines Alès

Vincent CHAPURLAT, Professeur, IMT Mines Alès

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Co Directeur de thèse

Directeur de thèse



Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Vincent Chapurlat pour son rôle de directeur de thèse. Sa guidance, sa vision claire et ses précieux conseils ont été indispensables pour la réalisation de ce projet de thèse. Sa passion pour la recherche et son dévouement à l'enseignement sont une source d'inspiration pour moi.

Je tiens à remercier Pierre Couturier pour son rôle de co-encadrant de thèse. Son expertise, son soutien continu et ses précieux conseils ont été fondamentaux pour la réussite de ce projet. Sa patience, son engagement et son enthousiasme ont été d'une grande aide.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Victor Richet et Benjamin Baudouin pour leur rôle d'encadrants industriels dans ce projet de thèse. Leur expertise, leur soutien continu et leur conseil précieux ont été essentiels pour la réussite de ce projet. Leur engagement envers ce projet a permis une collaboration fructueuse entre le monde universitaire et le monde industriel.

Je tiens à exprimer ma plus sincère reconnaissance à Robert Plana en tant qu'examineur de ma thèse. Son expertise technique, son soutien continu et ses commentaires pertinents ont été précieux. Sa vision stratégique et son engagement envers l'innovation ont été une source d'inspiration pour moi.

Je remercie Eric Bonjour et Marija Jankovic pour leur rôle de rapporteurs de thèse. Leur expertise, leur évaluation rigoureuse et leur conseil constructif ont été essentiels pour l'amélioration de ce projet de thèse. Leur dévouement à l'excellence académique est inestimable.

Je suis reconnaissant envers Alan Gaignebet, Alexandre Weppe, Mouna El Alaoui, Emir Roumili et mes autres collègues. Leurs discussions passionnantes et leurs perspectives uniques ont largement nourri ma recherche et ont été un facteur clé dans la réalisation de ce projet. Je suis émerveillé par leur passion pour la recherche et leur détermination à résoudre les défis scientifiques.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les équipes d'Assystem pour leur accueil, pour leur contribution précieuse à ma recherche et à mes réflexions. Je remercie ainsi grandement Jean-Eude, Alexandre, Adrien, Cédric, Thibaut, Guillaume, Sarah, Eva, Jean, Antonio, Sébastien, Pauline, Chamane... Je ne saurais remercier convenablement tout le monde tant ils ont été nombreux à participer à cet effort. Leur engagement envers leurs projets, leur expertise technique et leur collaboration ont été essentiels. Je suis émerveillé par leur passion et leur dévouement à la résolution de défis complexes.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Emilie Barras pour son soutien précieux dans le cadre de ma thèse. Sa contribution à la correction de mes travaux a été utile. De plus, son talent pour la création de vidéos a permis de présenter mes résultats sous la forme d'une démonstration claire et attrayante.

Je remercie ensuite les personnels du LGI2P de l'IMT Mines Alès, particulièrement Edith et Anne-Catherine, et de l'école doctorale I2S qui m'ont soutenu au cours de ces travaux de thèse, ainsi que les membres de l'AFIS.

Enfin, je remercie Sophie, Amandine et Clémentine ainsi que les autres membres de ma famille pour leur soutien indéfectible, leur amour et leur compréhension pendant tout ce temps qui ont contribué d'une certaine manière à ces travaux.

Je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette thèse.

A tous, je vous remercie du fond du cœur pour votre soutien indéfectible et votre participation à ma formation et à ma réussite.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES.....	5
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX.....	12
LISTE DES ABREVIATIONS.....	15
INTRODUCTION	19
CHAPITRE 1ER - PROBLEMATIQUE INDUSTRIELLE	25
1ER - I. CONTEXTE	25
1er - I.1 <i>Projets d’Installations Nucléaires de Base.....</i>	<i>26</i>
1ER - II. PROBLEMATIQUES INDUSTRIELLES PERÇUES.....	32
1er - II.1 <i>Environnement Industriel.....</i>	<i>32</i>
1er - II.2 <i>Un cycle de vie réparti dans le temps et dichotomie entre système et bâtiment</i>	<i>32</i>
1er - II.3 <i>Discontinuité dans les données d’architecture et d’ingénierie</i>	<i>36</i>
1er - II.4 <i>Transformation de la manière d’exprimer l’architecture d’une INB</i>	<i>37</i>
1er - II.5 <i>Essor des solutions numériques.....</i>	<i>39</i>
1ER - III. CONCLUSION	41
CHAPITRE 2E - ÉTAT DE L’ART	43
2E - I. INGENIERIE SYSTEME	44
2e - I.1 <i>Un cadre pour la conception</i>	<i>44</i>
2e - I.2 <i>Les processus d’Ingénierie Système</i>	<i>45</i>
2e - I.3 <i>Intérêt du MBSE au plus tôt.....</i>	<i>59</i>
2E - II. ARCHITECTURE ET SYSTEME	61
2e - II.1 <i>Différents sens donnés au concept d’architecture.....</i>	<i>61</i>
2e - II.2 <i>Définition de l’architecture en amont de l’ingénierie.....</i>	<i>65</i>
2E - III. ANALYSE SYSTEME (AS) ET ÉVALUATION D’ARCHITECTURE (EA)	70
2E - IV. OBJECTIF DE LA RECHERCHE ET CONTRIBUTIONS	72
CHAPITRE 3E - PROPOSITION DE METHODE POUR DEPLOYER, CONDUIRE ET CLOTURER	
L’EVALUATION D’ARCHITECTURE SUR UN PROJET D’INB.....	75
3E - I. INTRODUCTION	75

3E - II.	FONDAMENTAUX D'EVA-CIME	75
3E - III.	DECLINAISON PROJET D'EVA-CIME	78
3e - III.1	<i>Principaux concepts d'EVA-CIME Projet</i>	78
3e - III.2	<i>Cadre de description en support à EVA-CIME Projet et langages de modélisation et..</i>	85
3e - III.3	<i>Démarche opératoire d'EVA-CIME Projet</i>	89
3E - IV.	CONCLUSION	123
CHAPITRE 4E - PROPOSITION D'UNE METHODE DE DEPLOIEMENT, DE CAPITALISATION ET		
D'AMELIORATION CONTINUE DES PRATIQUES D'EVALUATION D'ARCHITECTURE AU NIVEAU DE		
L'ENTREPRISE. 127		
4E - I.	INTRODUCTION	127
4E - II.	DECLINAISON ENTREPRISE D'EVA-CIME	127
4e - II.1	<i>Principaux concepts d'EVA-CIME Entreprise</i>	127
4e - II.2	<i>Extension du cadre de description en support à EVA-CIME Entreprise</i>	135
4e - II.3	<i>Démarche opératoire d'EVA-CIME Entreprise</i>	138
4e - II.4	<i>Déployer l'évaluation d'architecture en entreprise</i>	138
4e - II.5	<i>Gérer le référentiel d'expertises et de connaissances</i>	140
4e - II.6	<i>Gérer la maturité en évaluation d'architecture</i>	146
4E - III.	CONCLUSION	150
CHAPITRE 5E - APPLICATION D'EVA-CIME..... 153		
5E - I.	INTRODUCTION	153
5E - II.	PRESENTATION DU CAS D'APPLICATION.....	153
5E - III.	APPLICATION D'EVA-CIME PROJET	155
5e - III.1	<i>Application de l'étape de préparation d'EVA-CIME Projet</i>	155
5e - III.2	<i>Application de l'étape d'exécution</i>	161
5e - III.3	<i>Application de l'étape de clôture</i>	163
5E - IV.	APPLICATION D'EVA-CIME ENTREPRISE.....	164
5E - V.	CONCLUSION	165
CONCLUSION GENERALE : SYNTHESE, LIMITES ET PERSPECTIVES 167		
RÉFÉRENCES 173		
ANNEXE A. EXTRAITS DU META-MODELE D'EVA-CIME 187		
ANNEXE B. DEMARCHE OPERATOIRE EVA-CIME PROJET AVEC LES FLUX D'INFORMATIONS..... 199		
ANNEXE C. QUESTIONS ASSOCIEES AU MODELE DE MATURITE 201		
ANNEXE D. EXEMPLES DE DIAGRAMMES POUR REPRESENTER LES ELEMENT D'EVA-CIME PROJET		

ANNEXE E. FORMULAIRE POUR CAPTURER LES CONNAISSANCES EN EVALUATION	
D'ARCHITECTURE	209
E.1.	FORMULAIRE POUR CAPTURER DES CONNAISSANCES INTERNES EN EVALUATION D'ARCHITECTURE 209
E.2.	SYNTHESE DES REPOSES AU FORMULAIRE POUR CAPTURER DES CONNAISSANCES INTERNES EN EVALUATION
D'ARCHITECTURE	229

Liste des Figures

Figure 1 : Séquencement des activités de recherche durant la thèse	23
Figure 2. Répartition des métiers par domaines (Assystem Energy and Operations Services 2021)	29
Figure 3: Cycle de vie d'un projet d'INB avant la livraison	33
Figure 4. Comparaison dans le temps du cycle imposé par la loi MOP et du cycle en V	35
Figure 5 : Exemple d'interconnexions entre les différentes arborescences associées à un composant	38
Figure 6. ISO/IEC/IEE 15 288 Processus du cycle de vie système et processus étudiés	46
Figure 7. Interaction des processus techniques et de soutien d'Ingénierie Système.....	47
Figure 8: Contexte d'une description d'architecture selon (ISO, IEC, and IEEE 2011)	48
Figure 9. Modèle conceptuel simplifié d'une description d'architecture (ISO, IEC, and IEEE 2011)	49
Figure 10. Exemple de représentation statique de l'architecture fonctionnelle d'un îlot nucléaire (Navas et al. 2018)	51
Figure 11. Exemple de représentation statique de l'architecture physique d'un îlot nucléaire (Navas et al. 2018).....	52
Figure 12. Modèle simplifié de la conception (Blanchard and Fabrycky 1981).....	53
Figure 13. Activités du processus d'évaluation de l'efficacité issues de (Lô 2013)	56
Figure 14. Modèle de décision et modèle de comportement d'après (Couturier et al. 2014)	57
Figure 15. Processus d'ingénierie système selon (IEEE 2005)	58
Figure 16. Lien entre les métaphores associées au concept d'architecture	64
Figure 17: Recoupement de l'Ingénierie de système et de l'Architecting	67
Figure 18. Quatre écoles de pensée de la place des activités d'architecture dans le cycle de vie (Muller 2011)	69
Figure 19: Phases d'architecting et d'engineering dans le cycle de vie projet.....	70
Figure 20: Périmètre de l'analyse système et de l'évaluation d'architecture.....	71
Figure 21 : Composants de la méthode EVA-CIME (Evaluation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering).....	76
Figure 22. Principaux concepts d'EVA-CIME Projet	79
Figure 23. Modèle conceptuel d'évaluation d'architecture simplifiée (ISO, IEC, and IEEE 2019b)	79
Figure 24. Modèle conceptuel simplifié des tiers d'évaluation d'architecture (d'après (ISO, IEC, and IEEE 2019b)).....	83
Figure 25. Modèle conceptuel simplifié liant le système, la description de son architecture et l'évaluation d'architecture	84
Figure 26. Modèle conceptuel simplifié liant l'évaluation d'architecture et la description d'architecture	85
Figure 27: Modèle conceptuel simplifié reliant l'évaluation de l'architecture et les concepts d'architecture d'entreprise	85
Figure 28. Cadre de description en support à EVA-CIME Projet	87
Figure 29. Démarche opératoire haut niveau d'EVA-CIME Projet.....	91
Figure 30. EVA-CIME Projet dans le cycle de vie d'une INB	92

Figure 31. Interaction entre les processus de développement et la démarche opératoire EVA-CIME Projet.....	93
Figure 32. Définition de l'activité de préparation et planification de l'évaluation d'architecture	95
Figure 33. Proposition de séquençement pour la description initiale de l'évaluation d'architecture ..	96
Figure 34. Modèle conceptuel simplifié pour décrire les motivations de l'évaluation d'architecture..	97
Figure 35. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Business Motivation Model	97
Figure 36. Modèle conceptuel simplifié pour décrire la mission l'évaluation selon la dimension Mission	101
Figure 37. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Business Motivation Model	102
Figure 38. Modèle conceptuel simplifié pour décrire les processus	104
Figure 39. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Software & Systems Process Engineering and Management	105
Figure 40. Modèle conceptuel simplifié pour décrire le réseau opérant	107
Figure 41. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Software & Systems Process Engineering and Management	107
Figure 42. Modèle conceptuel simplifié pour décrire le planning de l'évaluation d'architecture	110
Figure 43. Exemple simplifié de modèle d'évaluation d'architecture	112
Figure 44. Définition de l'activité de réalisation et pilotage de l'évaluation d'architecture	113
Figure 45. Evolution des différents tiers d'évaluation d'architecture dans le cadre	114
Figure 46. Cycle en V des efforts d'évaluation d'architecture suivant les tiers.....	115
Figure 47. Concepts en exécution pour assister les activités de réalisation (inspired by (Object Management Group (OMG) 2008b))	115
Figure 48. Concepts reliant les concepts de l'étape de préparation à l'étape d'exécution.....	116
Figure 49. Concepts ajoutés en exécution pour comparer les données de planning.....	117
Figure 50. Définition de l'activité de préparation et planification de l'évaluation d'architecture	119
Figure 51. Concepts ajoutés en clôture pour récolter le retour d'expérience.....	121
Figure 52. Concepts ajoutés en clôture pour proposer des généralisations et des améliorations	122
Figure 53. Concepts fondamentaux pour la description d'une unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture	126
Figure 54. Principaux concepts d'EVA-CIME Entreprise.....	128
Figure 55. Méta-modèle du contenu du REC	129
Figure 56. Concepts de pattern utilisés dans EVA-CIME Entreprise.....	130
Figure 57. Exemple d'instanciation du concept de définition de patron pour un processus d'approbation.....	133
Figure 58. Exemple d'instanciation du concept d'instance de patron pour un processus d'approbation de modèle	134
Figure 59. Cadre de description d'EVA-CIME Entreprise sous la forme d'un parallélépipède	136
Figure 60. Lien entre le cadre EVA-CIME Projet et le cadre EVA-CIME Entreprise.....	136
Figure 61. Cadre EVA-CIME du point de vue EVA-CIME Entreprise.....	137
Figure 62. Cadre EVA-CIME du point de vue EVA-CIME Projet avec EVA-CIME Entreprise mise en œuvre	137
Figure 63. Démarche opératoire haut niveau d'EVA-CIME Entreprise	138

Figure 64. Processus de déploiement proposé par (Cornu 2012) et adaptation de ce processus pour le déploiement de l'évaluation d'architecture.....	140
Figure 65. Exemple de réseau de définition de patron dans le niveau de conseil	141
Figure 66. Extrait de la définition de patron pour les activités d'évaluation de l'efficacité.....	142
Figure 67. Concepts des niveaux de conseil et de référence permettant de capitaliser sur les suggestions d'amélioration et de généralisation	143
Figure 68. Exemple d'insertion d'une amélioration d'une définition de tâche en préparation	144
Figure 69. Analyse du REC EVA-CIME Projet menant à la définition d'un patron dans le REC EVA-CIME Entreprise.....	144
Figure 70. Utilisation d'éléments définis dans le niveau de conseil pour construire le niveau opérationnel.....	144
Figure 71. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de conseil conforme à un patron du niveau de référence	145
Figure 72. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de référence	145
Figure 73. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de conseil	146
Figure 74. Extrait d'un patron de structuration de projet de modélisation d'évaluation d'architecture.	156
Figure 75. Exemple de modèle avec les informations d'activités radiologique d'une salle qui est le couloir	162
Figure 76. Modèle d'évaluation d'architecture pour le cas d'application	163
Figure 77. Extrait du méta-modèle centré sur le REC et sa structure.....	189
Figure 78. Méta-modèle pour la description d'architecture.....	190
Figure 79. Méta-modèle pour un cadre de description d'architecture	191
Figure 80. Méta-modèle pour les décisions d'architecture	192
Figure 81. Méta-modèle pour l'évaluation d'architecture.....	193
Figure 82. Meta-model Pour décrire les relation d'une unité d'organisation.....	194
Figure 83. Méta-modèle des principaux concepts de la dimension processus.....	195
Figure 84. Méta-modèle des principaux concepts pour la dimension Mission.....	196
Figure 85. Méta-modèle des principaux concepts pour la description des motivations.....	197
Figure 86. Méta-model des relations entre les étapes d'évaluation d'architecture	198
Figure 87. Démarche opératoire EVA-CIME Projet avec les flux d'information	200
Figure 88. Missions de l'évaluation d'architecture et périmètres des parties prenantes impliquées, instanciation d'un type de modèle du point de vue mission, personnalisé pour le cas d'application.	205
Figure 89. Extrait du réseau opérant de l'évaluation d'architecture, instanciation d'un type de modèle du point de vue réseau opérant personnalisé pour le cas d'application.....	206
Figure 90: Extrait du séquençement des activités de l'évaluation d'architecture, instanciation d'un type de modèle du point de vue planning personnalisé pour le cas d'application.....	207
Figure 91. Formulaire pour capturer les connaissances interne en évaluation d'architecture	209
Figure 92. Synthèse des réponses au formulaire pour capturer des connaissances internes en évaluation d'architecture.....	211

Liste des Tableaux

Tableau 1. Synthèses de types de modèles, éléments représentés et conventions de modélisation associés au point de vue logique	50
Tableau 2. Synthèse des prismes de lecture inspirée de (Smolander 2002).....	62
Tableau 3. Recoupement des concepts d'une description d'architecture avec les prismes.....	64
Tableau 4. Principales différences entre l'architecting et l'ingénierie.	66
Tableau 5. Synthèse des challenges à relever et des contributions associées.....	73
Tableau 6. Points de vue et exemples de types de modèles utilisés en support d'EVA-CIME projet....	89
Tableau 7. Exemple de personnalisation de VP-WHO-PRE du cadre en support d'EVA-CIME Projet ...	90
Tableau 8. Concepts de modélisation et exemples utilisés pour décrire la démarche opératoire EVA-CIME Projet.....	94
Tableau 9. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire les motivations de l'évaluation d'architecture	98
Tableau 10. Liste de tâches associée à l'activité de description des motivations pour l'évaluation d'architecture	99
Tableau 11. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour la dimension mission	102
Tableau 12. Liste de tâches associée à l'activité de description des missions pour l'évaluation d'architecture	103
Tableau 13. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples pour décrire les processus	105
Tableau 14. Liste des tâches associée à l'activité de description des process pour l'évaluation d'architecture	106
Tableau 15. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire le réseau opérant	108
Tableau 16. Liste des tâches associée à l'activité de description du réseau opérant pour l'évaluation d'architecture	109
Tableau 17. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire le planning ..	110
Tableau 18. Liste des tâches associée à l'activité de description du planning pour l'évaluation d'architecture	111
Tableau 19. Synthèse des concepts de patrons et définitions associées.....	131
Tableau 20. Exemples de nature de relation entre patron	133
Tableau 21. Quelques exemples de patron pour chaque cellule du prisme EVA-CIME dans le niveau de conseil	141
Tableau 22. Modèle de maturité pour l'évaluation d'architecture (inspiré par (Gouyon et al. 2009))	148
Tableau 23. Lexique du cas d'application.....	154
Tableau 24. Personnalisation du cadre de modélisation fourni en support à EVA-CIME pour le cas d'application.....	156
Tableau 25. Synthèse des éléments de modèle de la préparation de l'évaluation d'architecture	157
Tableau 26. Synthèse des informations nécessaires et possibles modèles pour y accéder	158
Tableau 27. Activité et diagramme associé pour ESTRADÉ.....	160

Tableau 28 Résultats de la réalisation d'ESTRADE sur le cas d'application.....	162
Tableau 29. Ensemble de définition de patrons réalisable à partir du développement d'ESTRADE...	165
Tableau 30. Liste de questions pour l'axe organisation du modèle de maturité	201
Tableau 31. Liste de questions pour l'axe méthode du modèle de maturité	201
Tableau 32. Liste de questions pour l'axe processus du modèle de maturité	202
Tableau 33. Liste de questions pour l'axe compétences du modèle de maturité.....	202
Tableau 34. Liste de questions pour l'axe moyens du modèle de maturité	203

Liste des Abréviations

ABREVIATION	TERME FRANÇAIS	TERME ANGLAIS
ACT	Assistance pour la passation des Contrats de Travaux	/
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique	/
AMDEC	Analyse des Modes De Défaillance Et de Criticité	/
AoA	Analyse des alternatives	Analyse of Alternatives
AOR	Assistance Opérations de Réception	/
APD	Avant-Projet Définitif	/
APS	Avant-Projet Sommaire	/
AS	Analyse Système	/
ASN	Autorité de Sécurité Nucléaire	/
ASTRID	Réacteur technologique avancé au sodium pour la démonstration industrielle	Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration
ATAM	Méthode d'analyse des choix d'architecture	Architecture Tradeoff Analysis Method
BPMN	Business Process Modelling and Notation	/
CEDIP	Centre d'Évaluation de Documentation et d'Innovation Pédagogiques	/
CIME	Critical Infrastructures Model based system Engineering	/
CSP	Mesures de coût, de calendrier, de performance	Cost, Schedule, Performance
CSPR	Mesures de coût, de calendrier, de performance et de risques	Cost, Schedule, Performance, Risks
CVC	Chauffage, Ventilation, Climatisation	/
DET	Direction de l'Exécution des Travaux	/
EA	Évaluation d'Architecture	/
EPR	/	Evolutionary Power Reactor
ESQ	Esquisse	/

ESTRADE	Étude de Scenarios de TRAitement de Déchets	/
EVA-CIME	EVALuation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering	/
EXE (Loi MOP)	Exécution	/
EXE (EVA-CIME)	Étape d'Exécution	/
FBS	Arborescence de Décomposition Fonctionnelle	Functional Breakdown Structure
FIN	Étape de Clôture	/
GBS	Arborescence de Décomposition Topologique	Geographical Breakdow Structure
IEC	Commission électrotechnique internationale	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INB	Installation Nucléaire de Base	/
IS	Ingénierie Système	/
ISO	Organisation Internationale de Normalisation	International Organization for Standardization
ITER	Réacteur Thermonucléaire Expérimental International	International Thermonuclear Experimental Reactor
IVTV	Intégration, Vérification, Transfert et Validation	/
IVV	Intégration, Vérification et Validation	/
Loi MOP	Maitrise d'ouvrage Publique	/
MBSE	Ingénierie Système Basée Modèle	Model Based System Engineering
MOA	Maîtrise d'ouvrage	/
MOE	Maitrise d'œuvre	/
OMG	/	Object Management Group
OPC	Ordonnancement, Coordination et Pilotage du chantier	/
PBS	Arborescence de Décomposition Produit	Product Breakdown Structure
PnF	Propriétés Non Fonctionnelles	/
PREP	Étape de Préparation	/
PRO	Projet	/
QUASAR	Évaluation de la qualité des architectures de systèmes à forte composante logicielle	Quality Assesment of Software-Intensive System Architectures

REC	Référentiel d'Expertises et de Connaissances	/
REX	Retour d'Expérience	/
SEBoK	Corpus de connaissances d'Ingénierie Système	System of Engineering Body of Knowledge
SMM	/	Structured Metrics Metamodel
SPEM	/	Software and System Process Engineering Management
STEEPLED	Social, Technologique, Économique, Environnemental, Politique, Juridique, Éthique et Démographique	Social, Technological, Economic, Environmental, Political, Legal, Ethical, Demographics
SWOT	Force, Faiblesse, Opportunité, Menace	Strength, Weakness, Opportunity, Threat
TBS	Arborescence de Décomposition Technologique	Technological Breakdown Structure
TRL	Niveau de maturité technologique	Technology Readiness Level
V & V		/
<u>XBS</u>	Arborescence de Décomposition X	X Breakdown Structure

Introduction

Les étapes successives qui jalonnent l'ingénierie d'un système tel qu'une Installation Nucléaire de Base (INB) impliquent de devoir croiser les compétences et les usages de plusieurs métiers. Elles concernent, impliquent ou influencent de nombreuses parties prenantes dont les attentes peuvent en permanence évoluer. Certaines de ces parties prenantes portent de plus une part d'autorité au regard du cadre légal construit autour du domaine nucléaire. Toutes sont cependant très conscientes de leurs responsabilités et sont exigeantes en conséquence. Elles doivent en effet essayer de maîtriser au mieux la complexité de l'INB comme celle du contexte organisationnel dans lequel cette ingénierie doit être menée à bien. Elles doivent de plus tenir compte des contraintes de sûreté, de sécurité, d'environnement, etc. pour répondre aux craintes du public vis-à-vis du domaine du nucléaire en général.

L'ingénierie va servir les objectifs de la totalité des actions humaines entreprises pendant la vie de cette INB. Elle vise donc d'abord à réfléchir sur l'INB en fonction des attentes, des contraintes et des valeurs de ces parties prenantes. Elle vise ensuite à concevoir et à décider, à réaliser puis à livrer et maintenir en conditions opérationnelles, et aller jusqu'au démantèlement futur de l'INB souhaitée.

Les acteurs métier, architectes et ingénieurs qui mènent cette ingénierie à bien doivent pouvoir alors comprendre ces attentes, contraintes et valeurs, proposer des solutions, les tester, décider, argumenter et tracer tous les événements susceptibles d'être à l'origine de nouvelles décisions. Entre autres faits marquants, cette ingénierie fait émerger de nombreuses alternatives de solutions possibles sur la base desquelles ces décisions doivent être prises en confiance et assumées. Nous parlons ici en particulier des solutions d'architectures de l'INB, allant de la plus abstraite en début d'ingénierie jusqu'à la plus concrète lorsque la réalisation peut alors démarrer.

Les architectes et les ingénieurs à l'origine de ces alternatives de solution doivent donc les décrire sans ambiguïté, sélectionner celles qui correspondent aux attentes des parties

prenantes, optimiser et justifier les choix pour faire apparaître les solutions les plus satisfaisantes jusqu'à converger vers la solution la plus satisfaisante retenue.

La vision abstraite de l'ensemble, en début d'ingénierie, est une première description de l'architecture. Ce dernier terme est commun dans les domaines du génie civil et de la construction. Néanmoins, le terme d'architecture a été plus récemment introduit dans les domaines de l'ingénierie de produit et de système en réponse à la complexité grandissante des systèmes qui font l'objet de projets de conception (Prun 2022). Or, 80 % des coûts d'un projet sont engagés dans ces premières étapes de l'élaboration du système (Blanchard and Fabrycky 1981; Galinier and Laporte 2018; Haskins et al. 2006). Il est donc crucial d'aider et guider les concepteurs à progresser en conscience (au regard des valeurs, contraintes et besoins) et en confiance (progressivement, collaborativement, de façon argumentée et tracée) lorsqu'ils prennent des décisions, font des choix et doivent ensuite les assumer. Cette aide à la décision doit considérer les recommandations provenant de différentes parties prenantes telles que les architectes et les ingénieurs, mais également les autorités de régulation ou encore les utilisateurs finaux impliqués dans les différentes phases du cycle de vie de l'INB, plus généralement de tout système en cours de conception. Elle encourage l'examen et la comparaison des différentes alternatives de solution pour la recherche d'un compromis et oriente de fait les différentes décisions et orientations en matière de conception. Cependant, plusieurs points cruciaux doivent être soulevés :

- Un grand projet tel qu'une INB nécessite plusieurs examens et comparaisons d'alternatives de solutions tout au long du cycle de développement de l'INB : il est nécessaire de s'assurer que ces activités sont cohérentes et servent le même objectif ;
- De nombreuses techniques et approches d'analyse et de comparaison d'alternatives de solution existent avec leurs avantages et leurs inconvénients, et les acteurs du projet doivent pouvoir utiliser les plus efficaces au cas par cas ;
- Leur mise en œuvre systématique sur un projet suppose un niveau de maturité suffisant de l'organisation dans ce domaine ;
- Leur mise en œuvre implique d'avoir accès aux moyens et ressources nécessaires ou de les acquérir.

Pour y répondre, il faut tenir compte du fait que les projets de conception d'INB impliquent une variété et un nombre important de parties prenantes. Toutes les parties prenantes qui interviennent sont impliquées dans des travaux propres à leur organisation qu'il est délicat d'unifier pour réaliser des examens et comparaisons cohérentes tout au long du projet. Enfin, lors des phases préliminaires de conception, peu de modèles sur lesquels il est possible et pertinent d'appuyer ces examens et comparaisons sont disponibles. Ils se limitent d'ailleurs souvent à des diagrammes d'arborescences, que ce soit pour l'aspect fonctionnel ou structurel. Ces types de diagrammes sont insuffisants pour identifier et caractériser finement les alternatives d'architecture, les examiner et sélectionner la plus prometteuse. Ce manque de modèles décrivant les architectures lors des phases amont entrave la mise en œuvre de ces activités.

L'objet de ce manuscrit est de retracer un travail de R&D en thèse visant tout particulièrement l'évaluation d'architectures pour la prise de décision engageant la responsabilité des acteurs des projets de conception d'INB, des coûts, du temps et des risques.

Ce travail de thèse s'inscrit au sein du partenariat qui est la Chaire CIME. La Chaire CIME (Critical Infrastructures Model based system Engineering) a été initiée en juin 2019 pour une durée de 5 ans. Elle est portée par IMT Mines Alès, la Fondation Mines-Alès sous égide de la fondation Mines-Télécom et la société ASSYSTEM Engineering and Operation Services.

Le Laboratoire des Sciences des Risques de l'IMT Mines Alès et, tout particulièrement, l'axe Ingénierie de Systèmes Complexes pour les activités à Risques, travaille sur le développement des aspects conceptuels, méthodologiques et techniques pour soutenir des activités d'ingénierie d'un système complexe. Ce développement vise à définir et réaliser un ensemble d'artefacts jugés satisfaisant pour répondre à l'ensemble des besoins, contraintes et usages des parties prenantes impliquées, affectées ou concernées par ces activités d'ingénierie. L'objectif est de leur permettre de comprendre, d'exprimer des besoins, de modéliser, de comparer des solutions et de progresser en confiance (Vérification & Validation (V&V) et évaluation).

Le Groupe Assystem, quant à lui, intervient dans l'ingénierie, l'assistance à ingénierie et la gestion de projets complexes portant, entre autres, sur des infrastructures nucléaires, depuis plus de 50 ans. Il intervient aussi dans les domaines de l'énergie conventionnelle, des

transports, de l'industrie et de la défense, en étant présent dans 15 pays d'Europe, du Moyen-Orient, d'Afrique et d'Asie. Ce groupe constitue la 2^e ingénierie nucléaire indépendante en taille dans le monde, et est notamment présent dans les domaines de la sûreté, de la sécurité, de la numérisation et de l'ingénierie des systèmes. Son rôle est d'accompagner ses clients dans la conception, la supervision de la construction, la mise en service et l'exploitation de ces installations, en mettant tout particulièrement l'accent sur la sûreté et la performance. Assystem participe à l'élaboration et au déploiement d'outils numériques en support à l'ingénierie ainsi qu'au développement de solution pour la gestion des services de terrain.

Le groupe Assystem développe enfin continuellement ses expertises dans le domaine des infrastructures et agit pour la transformation numérique. Sa contribution sur cette dernière est de mettre au point des moyens pour exploiter les données générées dans ces infrastructures, d'améliorer la sûreté, la sécurité, la conception et le pilotage des projets.

La Chaire de Recherche CIME se concentre sur la thématique de l'Ingénierie Système fondée sur des modèles (ou Model Based System Engineering - MBSE) appliqués à des projets de conception d'Infrastructures Critiques, tout particulièrement dans le domaine nucléaire.

Dans ce cadre, le projet de recherche présenté dans la suite a croisé une approche descendante (de la théorie des standards et de la littérature à leur mise en œuvre sur les projets) et une approche montante (des pratiques sur les projets avec leurs limitations et freins jusqu'à la théorisation par remontée). Dans l'approche remontante, mon rôle d'ingénieur modélisation a permis de recueillir et d'analyser les documents propres aux différents projets, d'expérimenter différentes approches de modélisation et d'obtenir en direct les besoins concrets des acteurs projets.

La Figure 1 montre la démarche de travail mise en application pour mener les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit.

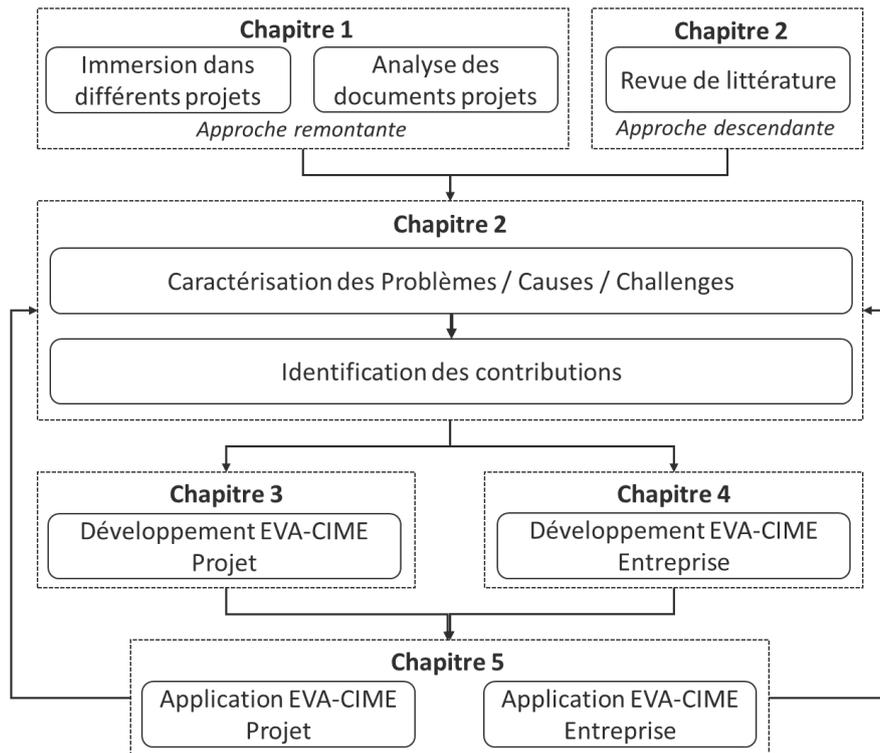


Figure 1 : Séquencement des activités de recherche durant la thèse

Tout d’abord, le Chapitre 1 procède à une analyse du contexte industriel pour en tirer une caractérisation plus précise des problèmes auxquels fait face l’industrie nucléaire.

Ensuite, sur la base de ces problèmes, le Chapitre 2 propose un état de l’art pour identifier l’existant et les manques pour apporter des solutions.

Le Chapitre 3 se concentre d’abord sur les premières contributions s’appliquant essentiellement à l’opérationnalisation de l’évaluation d’architecture à l’échelle d’un projet de conception d’INB.

Le Chapitre 4 décrit les contributions s’appliquant à l’échelle de l’entreprise afin de mettre en place un environnement en support aux projets de conception d’INB pour l’évaluation d’architecture.

Enfin, le Chapitre 5 présente sur un projet concret la façon dont une des parties des contributions précédentes s’articulent ensemble.

Chapitre 1er - Problématique industrielle

1er - I. Contexte

La demande énergétique mondiale est en constante augmentation, alors que les signataires de l'Accord de Paris doivent atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 (Foley et al. 2017). Dans un tel contexte, l'énergie nucléaire devrait avoir un rôle à jouer dans le mix énergétique (van der Zwaan 2013; IPCC 2022) avec la capacité de fournir une énergie massive à un coût abordable et pour une longue période (plus de 40 ans) (Berthélemy et al., 2016) bien qu'elle soit toujours confrontée au manque de confiance du public (Rao, 2020).

L'industrie nucléaire est, de fait, sollicitée pour concevoir et réaliser différents types d'installations. Citons, par exemple, des réacteurs électronucléaires pour la production d'énergie, des installations du cycle du combustible nucléaire, des installations de recherche, ou encore des centres de stockage de déchets radioactifs. Cependant, concevoir puis construire de nouvelles installations restent des activités difficiles, longues et coûteuses par la complexité même de celles-ci et des processus à mettre en œuvre. De nouvelles approches sont nécessaires pour faciliter et supporter les projets de la conception jusqu'à la livraison de ces futures installations. En particulier, l'hétérogénéité des parties prenantes concernées ou impliquées dans ces projets et l'évolutivité de leurs besoins, contraintes et valeurs tout au long de ces projets nécessitent d'analyser, d'évaluer et de justifier les différents choix de solutions qui émergent en cours de conception tout au long du développement.

Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéresserons uniquement aux installations répertoriées dans la réglementation française sous l'appellation d'Installations Nucléaires de Base (INB). Il s'agit donc ici de se focaliser sur les installations de recherche, les réacteurs électronucléaires fixes, les installations où sont pratiquées la préparation, l'enrichissement, la fabrication, le traitement ou l'entreposage de combustibles nucléaires, ou bien aussi le traitement, l'entreposage ou le stockage de déchets radioactifs dans un contexte non militaire.

1er - I.1 Projets d'Installations Nucléaires de Base

La conception, la construction et la livraison d'INB sont dans le monde entier des projets complexes à très longue échéance et sujets à de nombreuses évolutions et modifications en cours d'exécution (Alsharif and Karatas 2016). Nous proposons d'utiliser le cadre d'appréciation de la complexité d'un projet proposé par (Bakhshi, Ireland, and Gorod 2016) qui propose de catégoriser les facteurs influençant cette complexité tels que le contexte et la taille du projet, le besoin d'interconnexion entre les organisations, la diversité tant des activités que des acteurs métier, le phénomène d'émergence, et l'autonomie de ces acteurs du projet.

1er - I.1.A. Les facteurs de complexité dans la dimension contexte projet

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. De plus, la construction d'une nouvelle INB soulève des questions politiques tant au niveau local, plus sensible, qu'au niveau national. Il est courant que les intérêts politiques locaux et nationaux soient différents et parfois antagonistes. Par ailleurs, il est fréquent que les représentants politiques s'emparent du sujet, par exemple, lors des campagnes à l'élection présidentielle française. L'avenir de la filière nucléaire a été largement influencée par une attention politique particulière et constante. Ainsi, le projet ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration* (Varaine et al. 2017)) démarré en 2006, visait la conception et la réalisation d'un prototype de réacteur de 4^e génération pour démontrer la possibilité d'industrialisation des réacteurs à neutrons rapides refroidi au sodium. Fin 2019, le lancement de la construction du démonstrateur a été refusé par l'État français, préférant se concentrer sur les réacteurs de 3^e génération (Gassilloud and Piednoir Stéphane 2021). De plus, selon la volonté politique, l'enveloppe financière accordée au projet ou les parties à impliquer peuvent varier et de fait affecter le déroulement du projet.

- **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. Le public, et plus spécifiquement les communautés locales, comme la communauté industrielle, doit, en effet, être consulté. Ces projets font l'objet d'informations dédiées au public ainsi que de débats qui affectent à fortiori le projet. À titre d'exemple, depuis les années 1970, la question de la gestion des déchets nucléaires est devenue cruciale, ce n'est néanmoins qu'à partir de la loi Bataille de 1991 que l'intégration du public sera rendue obligatoire dans les discussions relatives aux recherches sur ce sujet. Par ailleurs, cette loi est à l'origine de la création de la Commission Nationale d'Évaluation qui doit, entre autres choses, être composée de deux personnes proposées par l'Académie des sciences morales et politiques. Les sites étudiés pour l'entreposage ou de retraitement ont nécessité ont du faire l'objet d'un débat contradictoire avant leur approbation. Des échanges avec le public ont donc été organisés tels que le débat qui eut lieu en 2013 (Leyrit 2014) aboutissant à la sélection finale du site de Bure. Cela a donné naissance au projet Cigéo sur ce site de Bure choisi notamment pour l'intérêt de ses propriétés géologiques.
- **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 (LAFON et al. 2018), aux questions de gestion des déchets nucléaires et à l'acceptation par le public. En France, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) assure le rôle d'autorité administrative indépendante et réalise un ensemble de missions (Autorité de Sûreté Nucléaire 2021) ayant un impact sur les dispositions légales à l'égard des INB ainsi que sur la perception du public vis-à-vis de ces installations et plus généralement de l'industrie nucléaire. En tant qu'organisme de contrôle de référence, l'ASN fixe les prescriptions jugées nécessaires pour assurer la sécurité, la santé du public et la protection de l'environnement, sur l'ensemble du cycle de vie de l'installation. Les projets d'INB sont, par conséquent, sanctionnés par des phases de contrôle/validation par cette autorité, de la conception à la mise en service de l'INB, puis de l'exploitation jusqu'à leur démantèlement.

- **Économique** : Les projets de conception d'INB nécessitent un investissement important limitant le nombre d'acteurs pouvant supporter l'apport d'un tel capital. Le coût de la mise en service de l'Evolutionary Power Reactor (EPR) est estimé à plus de 19 milliards d'euros (Cour des comptes 2020). De plus des paramètres sont considérés au-delà du simple coût de construction. Le cycle de vie global est pris en considération sur cet aspect prenant en compte, entre autres, les coûts de maintien ou de prolongement en fonctionnement et les coûts de démantèlement. Les exigences économiques autour de ce type de production ont un impact constant sur l'évolution du parc actuel, et donc sur les projets de construction de nouvelles installations de production, de démantèlement ou encore de prolongement de la durée d'exploitation (projet de Grand Carénage¹ initié depuis 2008 par EDF).
- **International** : Certains projets s'inscrivent dans un contexte international. L'un des plus emblématiques est le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) dont l'installation est en cours de construction en France. Ce projet implique la collaboration de l'Union européenne, des États-Unis, du Japon, de la Corée du Sud, de la Chine, de la Russie et de l'Inde, sur les plans du financement, de la réalisation des études (R & D, ingénierie), de la livraison d'équipements, etc. Au-delà de la collaboration internationale sur des projets technologiquement innovants, le secteur nucléaire est ancré dans un marché international. Le fonctionnement de ce marché et les échanges au sein de ceux-ci (technologie, matière...), nécessitent le respect de référentiels internationaux, tels que les traités liés à la non-prolifération, sous le contrôle de l'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique).

1er - I.1.B. 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 (voir *Figure 2*) sur ces

¹ Voir <https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-l-avenir-de-l-energie/r-d-un-savoir-faire-mondial/toutes-les-actualites-de-la-r-d/la-r-d-et-le-grand-carenage>

projets, qu'il s'agisse des domaines du contrôle-commande, de la mécanique, du génie-civil ou CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation).

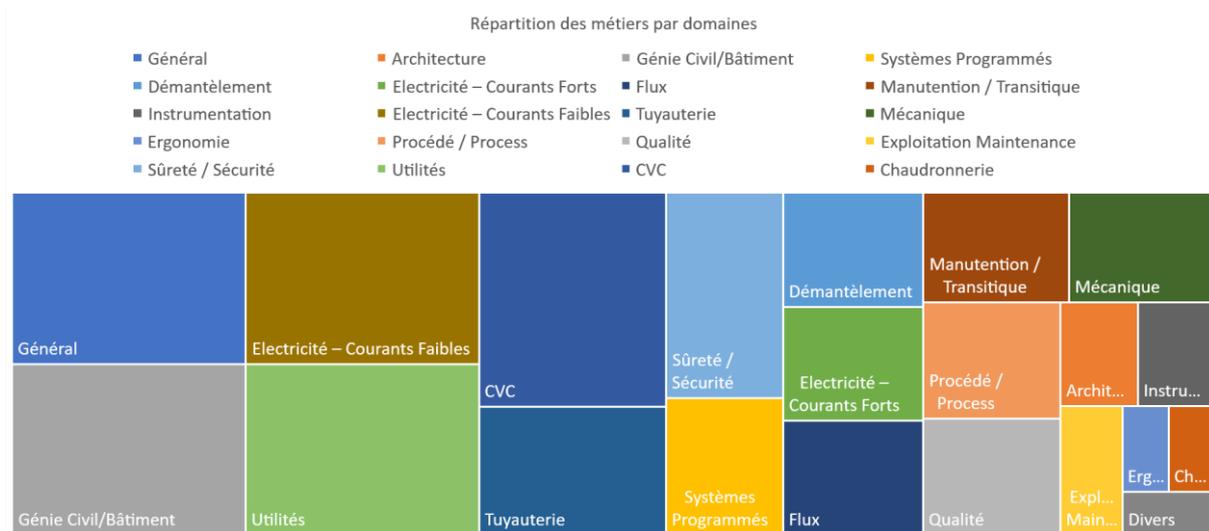


Figure 2. Répartition des métiers par domaines (Assystem Energy and Operations Services 2021)

À titre d'exemple, une étude d'avant-projet d'une installation de traitement de déchets nucléaires de 14 000 m² répartie sur 3 étages et regroupant 200 locaux, mobilise une quarantaine de rôles projets distincts. Les projets d'INB impliquent également de nombreuses parties prenantes telles que les futurs exploitants, les opérateurs et les propriétaires de l'INB, les équipes projets impliquées dans le cycle de vie du système, le système de maintenance en conditions opérationnelles ou encore les organismes de contrôle comme l'ASN. La multiplicité de ces parties prenantes (Cameron 2013) entraîne une variété d'attentes que l'on peut elles-mêmes classer selon l'approche STEEPLED (Social, Technological, Economic, Environmental, Political, Legal, Ethical, Demographics) c'est-à-dire en tenant compte des facteurs d'origine : social, technique, économique, environnemental, politique, juridique, éthique et démographique (Nandonde 2019).

En complément à cette diversité organisationnelle vient s'ajouter la complexité technique inhérente à l'INB à concevoir. Pour réaliser un îlot nucléaire, il faut, par exemple, dans le cas de l'EPR de Flamanville, intégrer 8 000 capteurs d'instrumentation (Folz 2019) et donc 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. Dans le cas de l'EPR de Flamanville, d'après (Folz, 2019), il s'agit de : « 400 000 tonnes de béton, 47 000 tonnes d'armature, un radier de 4 mètres d'épaisseur, des taux de ferrailage dépassant 500 kg/m³ dans certaines zones, plus de 1000 salles dans l'ensemble des bâtiments, 150 km de tuyauterie pour le seul îlot nucléaire, environ 15 000 vannes, 4 000 km de câble, 8 000 capteurs d'instrumentation, 300 armoires de contrôle-commande [...] »

De plus, ce sont de grands projets qui durent plusieurs années, voire des dizaines d'années. Si l'on reprend l'exemple de Cigéo cité plus haut, les premières études ont démarré en 1994 et l'on considère aujourd'hui que 25 ans de recherche ont été nécessaires. De plus, l'INB visée est, elle-même, caractérisée par un cycle de vie extrêmement long, l'exploitation de Cigéo durera à première vue un peu plus de 100 ans. De plus, la seule exploitation de l'électronucléaire dure en général entre 40 et 60 ans. Enfin, le parc nucléaire français avait, en 2021, une moyenne d'âge de 34 ans, les réacteurs de la centrale du Bugey étant les plus anciens avec 43 ans.

1er - I.1.C. Les facteurs de complexité dans les dimensions interconnexion entre organisations

Pour traiter de tels projets, les exploitants font systématiquement appel à la sous-traitance. Celle-ci doit permettre d'adresser des éléments comme la gestion des coûts, des expertises, encore de la flexibilité pour la gestion de la main d'œuvre (Syndex 2015). En 2010, la sous-traitance représentait les trois quarts de la masse salariale des projets nucléaires. Le recours à la sous-traitance, bien que répondant au moins partiellement aux préoccupations des exploitants, augmente significativement le nombre d'acteurs avec lesquels interagir, induit des difficultés de coordination des prestataires, de contrôle de l'avancée du projet ou encore de la cohérence des solutions proposées avec les attentes (Folz 2019). De plus, il y a des lacunes dans la transmission et le contrôle de ces attentes à tous les maillons de la chaîne de sous-traitance. La complexité contractuelle qui règne dans la chaîne de sous-traitance ainsi que la difficulté à définir le partage des rôles et responsabilités entre maîtrise d'œuvre (MOE)

et maîtrise d'ouvrage (MOA) sont source d'interfaces, de coûts supplémentaires et d'incohérences (Folz 2019).

Les échanges entre et au sein des différentes organisations qui représentent certaines des parties prenantes se font historiquement au travers de documents, dont certains sont d'ailleurs opposables, c'est-à-dire peuvent être considérés comme preuves dans le cas de règlement de litiges devant la justice ou les autorités de sûreté. La quantité de livrables documentaires reflète dans les faits l'ensemble des facteurs de complexité présentés ici et croit même considérablement selon les cas. Ceux-ci remplissent des fonctions de communication, de mémoire, et donc de preuve (Tricot, Sahut, and Lemarié 2016).

Une autre conséquence de l'externalisation massive des différentes études qui ont lieu tout au long du cycle de vie est la nécessité du partage de ceux-ci. Ces livrables permettent tout autant de suivre la bonne avancée du projet que de tracer des éléments d'entrée pour des études postérieures. Or, il est fréquent que deux études distinctes soient menées par deux organisations distinctes rendant rapidement la quantité de nouvelles informations à assimiler difficilement gérable. De surcroît, s'ajoute à ceci la difficulté que peut avoir une organisation à accéder aux données générées par une autre organisation. En effet, de multiples causes à ce manque d'accessibilité existent telles qu'une interface mal définie entre les deux organisations, le fait que l'une des organisations n'ait pas encore commencé les études, que les périmètres de travail sont peu clairs, etc. Par ailleurs, le décalage dans le temps, dans l'espace et dans la forme de ces livrables entre l'auteur et le lecteur augmente le risque de mécompréhension et d'ambiguïté. Enfin, les documents constituent un support ne facilitant pas la recherche rapide d'information et la cohérence de celle-ci dans le corpus. Finalement, ce sont des milliers de pages qui sont nécessaires pour mettre à disposition l'ensemble des informations, reflet de la difficulté technique et des attendus de sûreté. Ce sont pourtant ces informations qui doivent être accessibles et assimilées sans ambiguïtés avant le démarrage de certaines activités de conception.

En synthèse, 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.

1er - II. Problématiques industrielles perçues

1er - II.1 Environnement Industriel

Par son positionnement historique dans l'industrie nucléaire, Assystem a été amené à travailler spécifiquement sur des systèmes et infrastructures critiques. Parallèlement, du fait de responsabilités d'ingénieur, les sujets/projets traités par Assystem sont également en ligne avec les sujets d'ingénierie système et de définition générale de solution.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons donc tout particulièrement aux projets de conception d'INB. Puis, nous essaierons de généraliser nos propositions à des projets de conception de systèmes de plus en plus complexes dans des environnements eux-mêmes évolutifs et instables. Dans ces projets, nous nous focaliserons sur les activités de définition générale du système qui est un des enjeux majeurs du métier d'Assystem.

En effet, Assystem souhaite sécuriser la livraison de systèmes vers ses clients, en s'assurant de la gestion des risques, délais, coûts et ressources nécessaires aux projets de définition et modélisation de l'architecture d'une INB.

1er - II.2 Un cycle de vie réparti dans le temps et dichotomie entre système et bâtiment

Les projets d'INB se déroulent dans des contextes fortement contraints et évolutifs (e.g. nouveaux besoins, nouvelles contraintes de sûreté, impacts sur l'évolution des exigences, disponibilité de nouvelles technologies matures ayant un niveau TRL (Technology Readiness Level) reconnu, nouvelles hypothèses de dimensionnement...). Une contrainte particulière est, par exemple, légale : la conception et le suivi de réalisation d'un bâtiment nucléaire doit suivre la loi dite loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Public) (Loi N° 85-704 Du 12 juillet 1985 Relative à La Maîtrise d'ouvrage Public et à Ses Rapports Avec La Maîtrise d'œuvre Privée, 1985). Cette loi définit les différentes missions de la maîtrise d'œuvre, illustrées par le cycle de vie de la Figure 3 avec les phases suivantes :



Figure 3: Cycle de vie d'un projet d'INB avant la livraison

- Les études d'esquisse (ESQ) consistent à proposer une ou plusieurs solutions, à en préciser les délais de réalisation, leur accord avec le budget fixé ainsi que la faisabilité au regard des contraintes établies ("Article D2171-5 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d'esquisse ESQ" 2019).
- Les études d'Avant-Projet Sommaire (APS) consistent à spécifier la composition générale en plan et volume, proposer les dispositions techniques envisageables, préconiser des études complémentaires et vérifier le calendrier de réalisation ainsi que la cohérence des éléments techniques et économiques de la définition globale de la solution ("Article D2171-6 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d'avant-Projet Sommaire APS" 2019).
- Les études d'Avant-Projet Définitif (APD) consistent à déterminer les surfaces détaillées, fixer les plans, coupes, façades et dimensions de l'ouvrage, définir les principes de construction et vérifier la cohérence des éléments du projet ("Article D2171-7 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d'avant-Projet Définitif APD" 2019).
- Les études de Projet (PRO) consistent à préciser les éléments de construction, les caractéristiques des matériaux, à déterminer l'implantation et l'encombrement de tous les éléments de structure et de tous les éléments techniques, à clarifier les tracés des flux, transmettre au maître d'ouvrage les éléments pour estimer les coûts d'exploitation et vérifier la cohérence des éléments du projet ("Article D2171-10 Marchés Globaux : Études de Projet PRO" 2019).
- Le stade d'assistance pour la passation des contrats de travaux (ACT) consiste à préparer la consultation des entreprises ainsi que la sélection des candidats, analyser l'offre des entreprises et ses variantes, et organiser les mises au point pour la passation des contrats ("Article 6 Du Décret N°93-1268 Du 29 novembre 1993 Relatif Aux

Missions de Maîtrise d'œuvre Confiées Par Des Maîtres d'ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé," 2019).

- La direction de l'exécution du ou des contrats de travaux (DET) consiste, entre autres, à s'assurer que les documents d'exécution respectent les études effectuées, s'assurer que les documents à produire par le titulaire sont conformes aux contrats, procéder aux constats contradictoires et d'assister le maître d'ouvrage en cas de différend sur l'exécution des travaux ("Article 9 Du Décret N°93-1268 Du 29 novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d'œuvre Confiées Par Des Maîtres d'ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé," 2019).
- Les études d'exécution (EXE) permettent la réalisation de l'ouvrage et consistent à établir les plans d'exécution et spécifications à l'usage du chantier ("Article D2171-11 Marchés Globaux : Objet Des Études d'exécution EXE" 2019).
- L'ordonnancement, la coordination et le pilotage du chantier (OPC) consistent à analyser les tâches élémentaires portant sur les études d'exécution, harmoniser dans le temps et dans l'espace les actions des intervenants, mettre en application les mesures d'organisation au titre de l'ordonnancement et de la coordination ("Article 10 Du Décret N°93-1268 Du 29 Novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d'œuvre Confiées Par Des Maîtres d'ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé" 2019).
- L'assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des opérations de réception (AOR) consiste à organiser les opérations préalables à la réception des travaux, assurer le suivi des réserves formulées lors de la réception jusqu'à leur levée, procéder à l'examen des désordres, constituer le dossier des ouvrages exécutés nécessaires à leur exploitation ("Article 11 Du Décret N°93-1268 Du 29 novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d'œuvre Confiées Par Des Maîtres d'ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé," 2019).

Ce cycle, imposé par la loi MOP, est adapté lorsqu'il s'agit d'une infrastructure. Néanmoins, dans le nucléaire, il est impossible de dissocier l'infrastructure et le système hébergé. Cela nécessite alors de considérer l'installation comme un système, le seul paradigme du bâtiment n'étant plus suffisant. D'une manière complémentaire, le classique

cycle de développement produit en V (ou Vee-Cycle²) apporte cette vision en considérant l'installation comme un système. Ces deux cycles sont comparés dans la Figure 4.

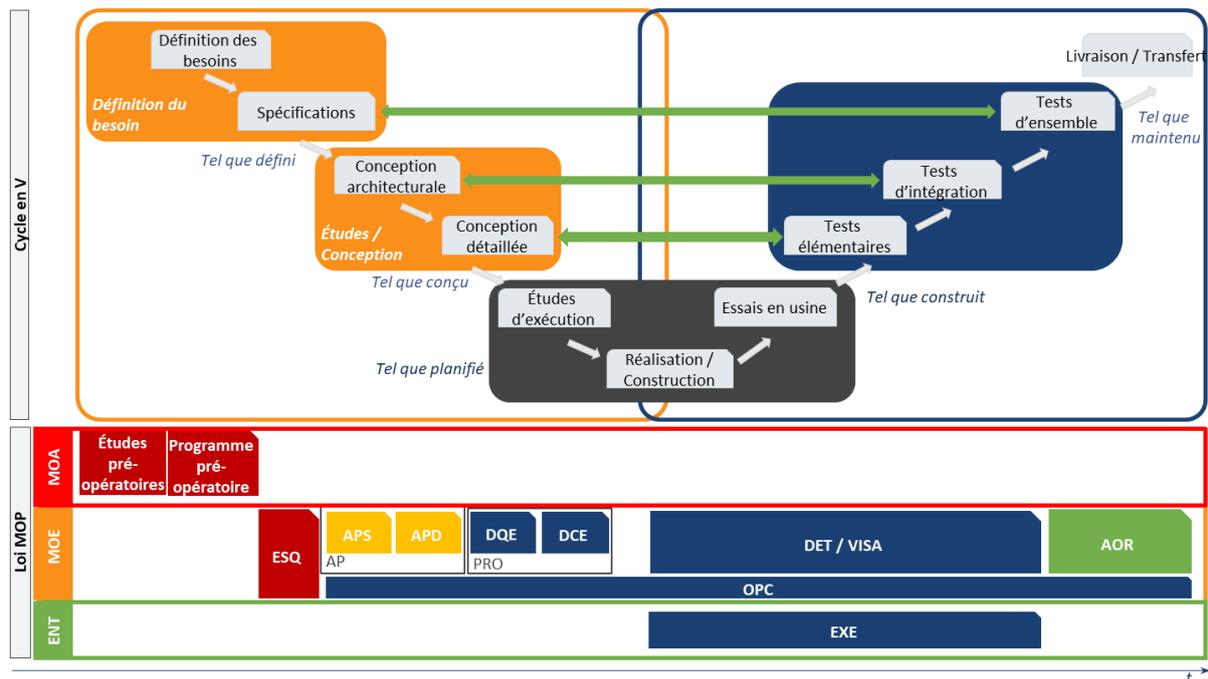


Figure 4. Comparaison dans le temps du cycle imposé par la loi MOP et du cycle en V

Les projets d'INB doivent donc traiter avec cette ambivalence, qui est de considérer l'INB comme un bâtiment conçu en suivant la loi MOP et comme un système devant être conçu en s'appuyant sur les principes de la systémique. Cette ambivalence doit ainsi évoluer vers une complémentarité.

De plus, le projet suit un allotissement suivant les phases précédemment définies. Cet allotissement entraîne des complexités qui doivent être encadrées. La phase de spécification peut être confiée à une équipe A tandis que la phase de conception architecturale est confiée à une équipe B différente. Or, les responsabilités et échanges entre ces équipes sont difficilement définis, dirigés et entretenus tout au long du cycle de vie projet. Il existe un risque de rupture de la continuité des données d'ingénierie qui doivent être échangées. Cette rupture est exacerbée par des différences d'outils, de concepts, de formats ou encore en raison des divers acteurs impliqués qui ont des usages et des pratiques différents. Ces données sont enfin dispersées dans différents documents, livrables (appelées connaissances explicites

² Voir https://www.sebokwiki.org/wiki/System_Lifecycle_Process_Models:_Vee

(Poulin-Dubois and Rakison 1999)), ou même parfois dans la tête des précédents acteurs impliqués (appelées connaissances implicites (Poulin-Dubois & Rakison, 1999)). Les phases peuvent enfin subir des retards ce qui aggrave le risque de perte d'informations, mais également de compétences de certains de ces acteurs en cours de route. Il est donc nécessaire de bien définir les rôles et responsabilités, de converger sur des processus applicables pour finalement, sur cette base, construire une organisation qui puisse développer le système d'intérêt.

1er - II.3 Discontinuité dans les données d'architecture et d'ingénierie

La vision abstraite d'ensemble d'une INB est définie dès les premières étapes de son développement et est précisée au travers de l'affinement et de la concrétisation de ses spécifications. Deux phases se distinguent dans le développement de systèmes complexes : la phase correspondant aux phases pré Avant-Projet Sommaire (APS) et la phase correspondant aux phases à partir de l'APS.

Dès la phase d'esquisse (ESQ), les prémices d'une architecture apparaissent puis se façonnent, s'affinent jusqu'à ce qu'elle soit matérialisée par la solution réalisée en phase PRO. Le maintien en cohérence des évolutions de l'architecture au cours du cycle de vie suppose une continuité dans les données qui la caractérisent. Ceci n'est pas toujours évident dans le contexte d'un projet d'INB. Cela est exacerbé lors du cycle de vie de l'INB, particulièrement pendant son développement par une répartition distribuée entre les organisations de la responsabilité et de l'architecture.

En effet, les missions de conception d'INB peuvent démarrer avec deux séries d'hypothèses différentes, conciliables au sein d'un même projet, pour le concepteur :

- Le client a déjà spécifié certaines lignes directrices présentant le système à développer, éventuellement en collaboration avec divers autres sous-traitants. Une architecture dite de référence peut alors être prescrite et servira de base de travail pour les activités d'ingénierie. Comme telle, cette architecture restera plus ou moins stable tout au long du cycle de vie du projet, à moins que des changements structurels ne soient identifiés à la suite d'une analyse plus détaillée (par le biais d'études techniques, de modifications de la précision des données d'entrée, etc.). L'entreprise missionnée sera chargée de détailler cette architecture (conformément au référentiel des exigences)

par le biais d'activités de définition d'architecture, contractées en activités d'architecture dans la suite du manuscrit, et d'ingénierie jusqu'à ce que le niveau de détail soit suffisant (au travers de notions de faisabilité, de cohérence, de respect des exigences prescrites...) et que la solution fasse l'objet d'un consensus accepté et partagé par toutes les parties prenantes (notion de confiance).

- Le client arrive avec un problème, un désir, propose un ensemble d'attentes ou de défis, mais ne promet aucun type de solution. Il s'attend à ce que la société en charge du projet puise dans son propre retour d'expérience pour identifier et se fonder sur des architectures similaires issues de l'état de l'art industriel (comme cela a été le cas pour la définition de l'EPR de Flamanville). Dans ce cas, la société sera responsable de la définition d'une architecture cible au travers de grandes orientations, de principes à respecter, de lignes directrices, etc. Celles-ci doivent également être validées et différentes études doivent alors être conduites afin d'affiner les solutions architecturales jusqu'à atteindre le niveau de détails jugé suffisant pour passer aux phases de conception suivantes.

Ces deux hypothèses influencent la façon de définir et de justifier chaque solution d'architecture potentielle de l'INB. La difficulté réside dans la rupture organisationnelle et temporelle entre les différents stades qui cadencent la définition de l'architecture et qui augmente en conséquence le risque de discontinuité dans les données d'architecture et d'ingénierie. Pour pallier cela, la problématique est de formuler l'architecture dans un langage compréhensible par l'ingénierie.

1er - II.4 Transformation de la manière d'exprimer l'architecture d'une INB

Dès la phase d'esquisse du projet, l'expression de l'architecture s'appuie sur les principes de la systémique. Sa mise en œuvre peut néanmoins rencontrer quelques freins :

- Les normes et standards prescrivent les objectifs à atteindre, mais n'explicitent pas nécessairement la façon de réussir les activités telles que la capture du besoin, la spécification en exigences ou la conception des architectures ;
- Il subsiste des difficultés de compréhension entre parties prenantes le plus souvent dû à une absence de vocabulaire commun ;

- Les données générées par les activités d'ingénierie sont généralement disséminées dans un océan documentaire, ce qui complexifie leur maintien en cohérence, tout au long de la phase de développement du système.

Une ingénierie basée documents s'avère inadaptée, voire insuffisante, compte tenu de la complexité globale autant du système à faire que du projet de développement de ce dernier, i.e. le système pour faire. C'est un point important dans le domaine nucléaire et, plus particulièrement, tel qu'il a été vécu par l'entreprise Assystem dans son rôle d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage dans ce domaine. Pour une meilleure compréhension d'ensemble, il est ainsi courant de décrire, lors des phases amont, l'INB au travers de plusieurs arborescences. Assystem s'intéresse particulièrement à quatre d'entre elles : l'arborescence fonctionnelle ou Functional Breakdown Structure (FBS), l'arborescence produit ou Product Breakdown Structure (PBS), l'arborescence d'implantation géographique ou Geographical Breakdown Structure (GBS) et l'arborescence technologique ou Technological Breakdown Structure (TBS). Toutes ces arborescences sont interconnectées comme illustré dans la Figure 5 signifiant que l'élément codifié VVP1210VV est le Système Principal de Vapeur situé Room X – Bâtiment de protection 1, qu'il isole la génération de vapeur de l'îlot conventionnel sur la base d'une technologie Robinet-Valve.

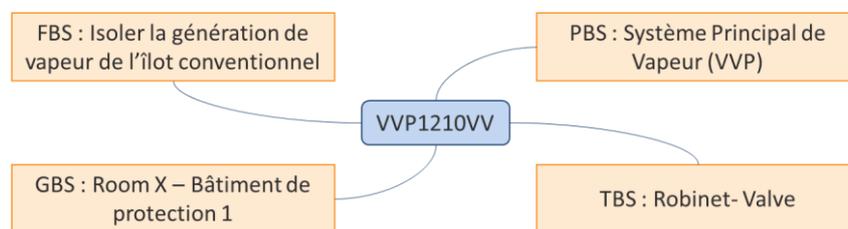


Figure 5 : Exemple d'interconnexions entre les différentes arborescences associées à un composant

Ces représentations sous forme d'arborescence ne suffisent pas à répondre aux préoccupations des ingénieurs telles que :

- Encadrer la traçabilité entre les différents éléments d'une description d'architecture ;
- Identifier les points critiques d'une architecture (ex. local dans lequel passe un grand nombre de flux différents) ;
- Élaborer des descriptions intelligibles et cohérentes avec le niveau de connaissances actuel sur l'architecture ;

- Gérer la grande quantité, la variabilité et la multiplicité des données ;
- S'assurer que l'architecture est correctement dimensionnée ;
- Mettre en évidence des alternatives de conception ;
- S'assurer du respect des propriétés non fonctionnelles.

Le nombre d'éléments mis en avant dans chacune de ces arborescences (notées alors xBS pour X Breakdown Structure) peut devenir très important au fur et à mesure et dans des l'avancement de la conception. Certains d'entre eux n'apparaissent qu'à des niveaux de détail très fins, et pourtant ont des impacts, sur d'autres éléments du système, difficiles à identifier en amont. Dans la définition de telles installations, de nombreux corps de métier sont impliqués et chacun d'eux, pour contribuer à bâtir une solution la plus satisfaisante possible pour les clients, doit atteindre des objectifs propres tout en respectant les contraintes imposées par les autres corps de métier. Il est alors nécessaire d'identifier au plus tôt les influences que ces éléments ont les uns sur les autres.

Si les arborescences permettent de fournir une vision globale, intelligible et suffisante selon les usages (à condition qu'elles soient correctement structurées), elles ne sont pas suffisantes pour discriminer des alternatives d'architecture. Certaines installations, bien qu'étant fonctionnellement identiques, peuvent organiser leurs flux différemment ou conduire à des solutions organiques ou technologiques différentes. De plus, les différents éléments des arborescences ne sont pas nécessairement liés les uns aux autres. Par conséquent, il est quasiment impossible de comparer ces différentes alternatives de solution (notamment parce que la formalisation précise des flux d'interaction et l'approche comportementale sont inexistantes à ce stade).

Il est donc nécessaire de trouver d'autres moyens de représentation afin de couvrir ces diverses préoccupations.

1er - II.5 Essor des solutions numériques

Enfin, les projets menés chez Assystem ne requièrent pas toujours un haut niveau d'innovation. Le plus souvent, les projets s'établissent sur la réutilisation de solutions déjà éprouvées et consistent surtout en des adaptations, des modifications ou des améliorations

de solutions reconnues pour répondre aux besoins d'Assystem, démontrant un intérêt pour la réutilisation de solutions passées et éprouvées.

C'est pourquoi Assystem se dote depuis plusieurs années de méthodologies privilégiant plus la modélisation et l'usage de modèles tel que le MBSE (Model Based System Engineering) et des outils numériques supportant généralement des activités du MBSE. Assystem décline ces outillages en applications pratiques sur les projets (théorie vers projets) puis les fait évoluer en fonction des retours et attentes projets (projets vers théorie). Cependant, dans le domaine nucléaire, il reste courant de partager un grand nombre de documents textuels de diverses natures. Ces documents sont nécessaires dans le contexte réglementaire qui est celui des INB. En effet, l'exploitant se doit de remettre des dossiers réclamés par l'ASN et d'assurer, non sans difficulté, que tous les éléments remis sont cohérents. Par exemple, un projet passé a produit 200 documents pour un total d'environ 16000 pages en un an. De plus, très peu de modèles sont disponibles pour définir les architectures et pour effectuer des jugements sur ces architectures. Ainsi, les ingénieurs d'Assystem doivent concilier approche documentaire et approche basée modèles. C'est pourquoi pour chaque projet se posent les questions suivantes :

- Selon le stade du cycle de vie de développement du système d'intérêt, et selon les préoccupations des parties prenantes à traiter, quels types de modèles doivent être construits et avec quel(s) langage(s) de modélisation ?
- Comment procéder en confiance avec les parties prenantes, de façon progressive et pour converger vers une solution satisfaisant autant les besoins, contraintes que les valeurs ?
- À quels niveaux de détail les architectures des solutions candidates, ou certaines parties d'entre elles, doivent-elles être modélisées et analysées pour aider à prendre des décisions de conception sûres et efficaces ?
- Faut-il développer plusieurs descriptions d'architecture par branches et niveaux des xBS (voir exemple Figure 5) en prenant en compte les problèmes d'interopérabilité sémantique et technique (Commission and Informatics 2017), ou bien bâtir une description unique, mais complexe à construire et à appréhender ?

- Dans quel ordre et jusqu'à quelle profondeur doivent être élaborés les modèles architecturaux (par exemple, les XBS) tout en gérant les effets d'échelle induits par l'explosion du nombre d'éléments à considérer ?
- Comment construire et entretenir un référentiel de solutions globales ou partielles sur la base de projets antérieurs ?
- Comment mener des phases de rétro-ingénierie pour intégrer des éléments de solutions de projets antérieurs dans la définition d'une nouvelle installation ?
- Quand et comment impliquer les multiples corps de métier intervenant dans un projet pour prendre en compte au plus tôt leurs préoccupations propres dans la définition des architectures ?

Ces problèmes et leurs causes sont détaillés et exprimés dans le Chapitre 2, causes adressées par les travaux présentés dans ce manuscrit et faisant émerger les contributions présentées et illustrées dans les Chapitres 3, 4 et 5.

1er - III. Conclusion

Un projet d'INB est un projet complexe influencé par différents facteurs de complexité essentiels que sont :

- Le contexte politique, sociologique, réglementaire, économique et international qui doit tout particulièrement être appréhendé le plus tôt possible ;
- La taille et la diversité au sein du projet, qu'il s'agisse des multiples métiers impliqués durant le projet ou de l'hétérogénéité des technologies utilisées ;
- Les nécessaires interconnexions entre les différentes organisations impliquées ou affectées durant le projet, avec un impact sur la complexification de la collecte, la caractérisation et l'utilisation de l'ensemble des données d'ingénierie.

Pour améliorer la livraison de tels projets et fournir une solution architecturale adéquate, nous retiendrons les trois **challenges** importants que doit relever Assystem et pour lequel une organisation spécifique doit de même être mise en place :

- Le premier consiste en la capacité d'identifier des vues et des modèles utiles pour décrire sans ambiguïté des solutions alternatives d'architecture d'INB en particulier en respectant une approche systémique.
- Le second nécessite d'être **en capacité d'évaluer et de justifier au plus tôt le choix de la solution la plus satisfaisante** malgré des changements possibles dans les attentes et préoccupations des parties prenantes et d'être simultanément **capable d'identifier tous les éléments qui seront affectés par les décisions de conception** avec une exigence de traçabilité.
- Le troisième est un challenge de **capitalisation et de réutilisation des retours d'expérience des projets antérieurs, des compétences** développées ou acquises dans l'entreprise et des connaissances acquises dans l'élaboration d'architectures, leur vérification, leur validation et leur évaluation.

Afin qu'Assystem soit en mesure de relever ces challenges, nous allons examiner dans le Chapitre 2 quelles pistes de réflexion sont offertes dans la littérature autour des concepts d'architecture et d'évaluation d'architecture dans un contexte MBSE. Cet examen nous permettra d'identifier les manques à combler pour répondre aux problématiques industrielles d'Assystem.

Chapitre 2e - État de l'art

Ce chapitre fournit une vision d'ensemble sur les travaux, techniques, pratiques et usages existants pour répondre aux trois challenges industriels essentiels présentés dans le chapitre précédent auxquels Assystem doit faire face, et que nous reformulons alors comme suit:

- Comment décrit-on une architecture, i.e. comment identifier les modèles et des moyens de modélisation (vues, langages, outils) décrivant sans ambiguïté, et en respectant les principes d'une approche système, des solutions d'architecture d'INB ?
- Comment choisit-on une architecture, i.e. comment évaluer et justifier au plus tôt le choix de la solution la plus satisfaisante malgré les évolutions possibles des besoins et avec une exigence de traçabilité ?
- Comment peut-on réutiliser des éléments de modélisation et d'organisation d'évaluation d'une architecture, i.e. comment capitaliser et réutiliser les retours d'expérience des projets antérieurs, les compétences présentes ou acquises dans l'entreprise et l'organisation mise en place lors de l'élaboration d'architectures, de leur vérification, de leur validation et de leur évaluation ?

Le but est donc ici de faire une synthèse des apports et limites de la littérature pour définir l'objectif principal de recherche et les contributions scientifiques afin de relever ces challenges industriels.

Cet état de l'art part du cadre conventionnel de **l'ingénierie système (IS)** et de l'apport du MBSE dans des projets de type INB dans lesquels les systèmes sont complexes à appréhender et la documentation à générer et à consulter est énorme. Il est rappelé que **l'approche MBSE** est en effet un moyen de fédérer les multiples corps de métiers dans un cadre unique et avec des représentations partagées. Dans ce cadre commun, il est possible de tenir compte des multiples parties prenantes (bénéficiaires du système à concevoir, mais aussi les acteurs d'Assystem) pour aider les décideurs, **grâce à l'analyse système**, processus support de l'IS, à faire les choix d'architecture les plus satisfaisants. Les évaluations des solutions

possibles sont à mener au plus tôt dans ces projet d'INB car les premières décisions sont critiques. Or, **la notion d'architecture** apparaît avant même les phases d'ingénierie et pose alors le problème de **l'évaluation des architectures**.

2e - I. Ingénierie Système

Une approche d'ingénierie système fondée sur les modèles fédère en effet les multiples corps de métiers dans un cadre unique et avec des représentations partagées.

2e - I.1 Un cadre pour la conception

Lors de la phase de conception du système, il est courant d'utiliser une approche cartésienne pour décomposer un système complexe en systèmes moins complexes (BKCASE Editorial Board INCOSE 2016) et ainsi répartir les études d'ingénieries entre différentes équipes. Cependant, certains aspects doivent être pris en compte comme le fait que le comportement global ne peut être déduit du comportement local (Sillitto 2010). De la même manière, le grand nombre de relations et d'échanges entre les parties d'un tout provoque un phénomène d'émergence (Luzaux and Ruault 2008). Ainsi, l'approche cartésienne n'est pas suffisante pour concevoir un système complexe. C'est pourquoi (Haskins et al. 2006) convient que l'IS doit être établie sur la pensée systémique (Ryan 2008) dont le thème dominant est l'holisme (Faisandier 2014).

L'IS fournit un cadre autant méthodologique, favorisant une compréhension holistique d'un système complexe et de son environnement (Bériot 2014), qu'organisationnel basé, entre autres, sur des processus adaptés pour développer, valider et maintenir en conditions opérationnelles la solution la plus satisfaisante à un problème complexe (ISO/IEC/IEEE 15288 2015; ISO/IEC 2016; BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; Haskins et al. 2006; Walden et al. 2015). Par solution la plus satisfaisante, nous entendons une solution résultant des choix de conception faits tout au long du projet et qui a été vérifiée, validée, évaluée, comparée, sélectionnée puis optimisée afin d'être proposée à toutes les parties prenantes puis réalisée concrètement avant d'être livrée, installée et maintenue en conditions opérationnelles.

Comme il a été vu dans le chapitre précédent, les facteurs de complexité à gérer pendant les projets de développement d'INB sont nombreux et s'influencent les uns les autres. La mise en œuvre des processus d'IS est un levier pour appréhender ces facteurs quand

on est dans la situation de concevoir, réaliser, livrer, maintenir, démanteler un système complexe.

2e - I.2 Les processus d'Ingénierie Système

L'IS couvre toutes les phases de développement d'un système complexe technique ou sociotechnique, induisant entre autres la prise en compte de facteurs humains et organisationnels plus ciblés. Cette couverture s'illustre particulièrement au travers des différents processus décrits dans (ISO/IEC/IEEE 2015; ISO/IEC 2016; BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; Faisandier 2014) dont la mise en œuvre est guidée dans (ISO/IEC/IEEE 2019a; 2018; Haskins et al. 2006; Walden et al. 2015; Sage and Rouse 2014). La norme (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) regroupe ces processus illustrés dans la Figure 6 en différentes catégories :

- Les **processus d'affaire** regroupent les processus d'acquisition et de fourniture de produits ou de services entre deux organisations de la même entreprise ou non ;
- Les **processus organisationnels de support projet** regroupent les processus permettant de fournir des ressources au projet et d'établir l'environnement dans lequel le projet est conduit, ils sont illustrés dans la Figure 6. En effet (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) établit que « *L'organisation établit les processus et les modèles de cycle de vie à utiliser pour les projets ; elle établit, réoriente ou annule les projets ; elle fournit les ressources nécessaires, y compris les ressources humaines et financières ; elle définit et contrôle les mesures de qualité pour les systèmes et autres produits livrables développés par les projets pour les clients internes et externes* » ;
- Les **processus de management technique** regroupent les processus pour gérer les ressources et atouts alloués au projet par l'organisation, ils sont illustrés dans la Figure 6. (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) établit qu' « *Ils sont utilisés pour établir et exécuter les plans techniques du projet, gérer l'information au sein de l'équipe technique, évaluer l'avancement technique par rapport aux plans pour les produits ou services du système, contrôler les tâches techniques jusqu'à leur achèvement et contribuer au processus décisionnel* » ;
- Les **processus techniques** regroupent les processus pour créer et utiliser le système, ils sont illustrés dans la Figure 6. (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) établit que « *Les processus*

techniques concernent les actions techniques tout au long du cycle de vie. Les processus techniques transforment les besoins des parties prenantes en un produit et un service. ».

Les processus techniques font appel à des processus soutien tels que les processus de vérification, de validation et d'analyse système. Ces processus techniques et de soutien ne sont pas mis en œuvre de manière linéaire, car le développement d'un système est itératif et récursif comme illustré Figure 7.

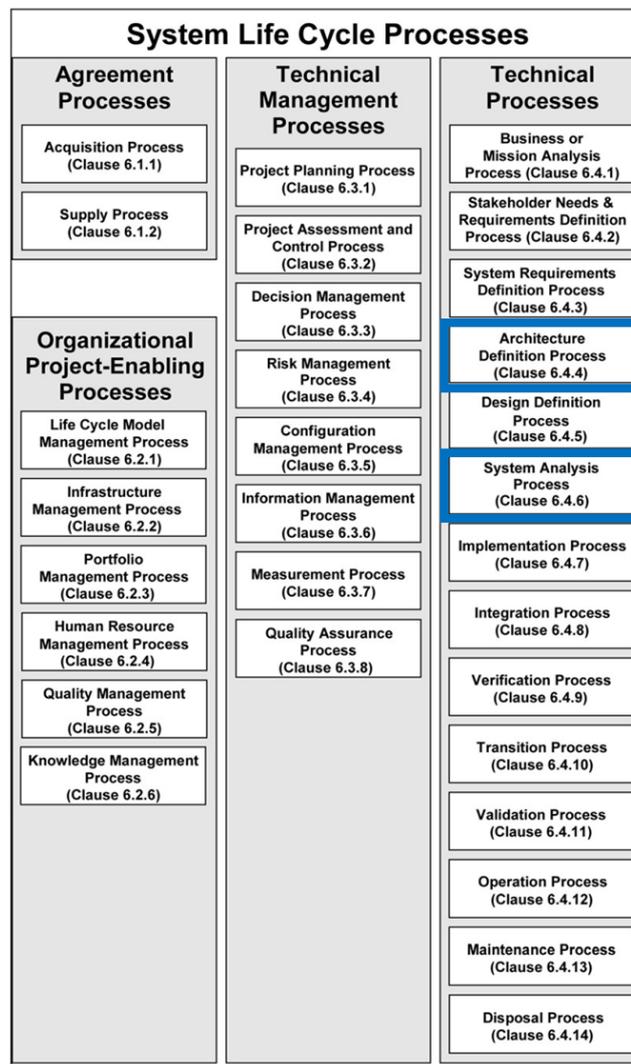


Figure 6. ISO/IEC/IEE 15 288 Processus du cycle de vie système et processus étudiés

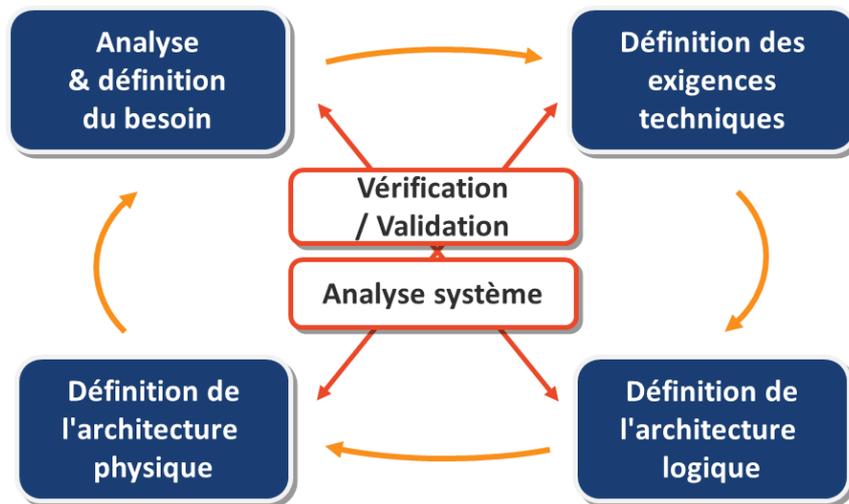


Figure 7. Interaction des processus techniques et de soutien d'Ingénierie Système

Ces travaux se focalisent sur l'évaluation d'architecture, donc aux challenges reformulés qui sont (i) comment sont exprimées les architectures (processus de définition des architectures) et (ii) comment celles-ci sont dans le détail évaluées (processus d'analyse système). Les processus de définition d'architecture et d'analyse système sont donc particulièrement concernés ici et sont maintenant approfondis.

2e - I.2.A. Processus de définition et modélisation d'architecture

Selon les normes (ISO, IEC, and IEEE 2011; ISO/IEC/IEEE 2019; ISO, IEC, and IEEE 2019a; ISO/IEC/IEEE 15288 2015), l'architecture désigne "*les concepts ou propriétés fondamentaux d'un système dans son environnement, incarnés dans ses éléments, ses relations et dans les principes de sa conception et de son évolution*". L'architecture et le processus pour la définir ont émergé comme indispensables pour la création de systèmes en IS mettant en avant la notion de description d'architecture.

Ce standard s'attèle à spécifier la manière dont les descriptions d'architecture doivent être organisées et exprimées. Le contexte d'une description d'architecture tel qu'il a été entendu par (ISO, IEC, and IEEE 2011) est illustré Figure 8.

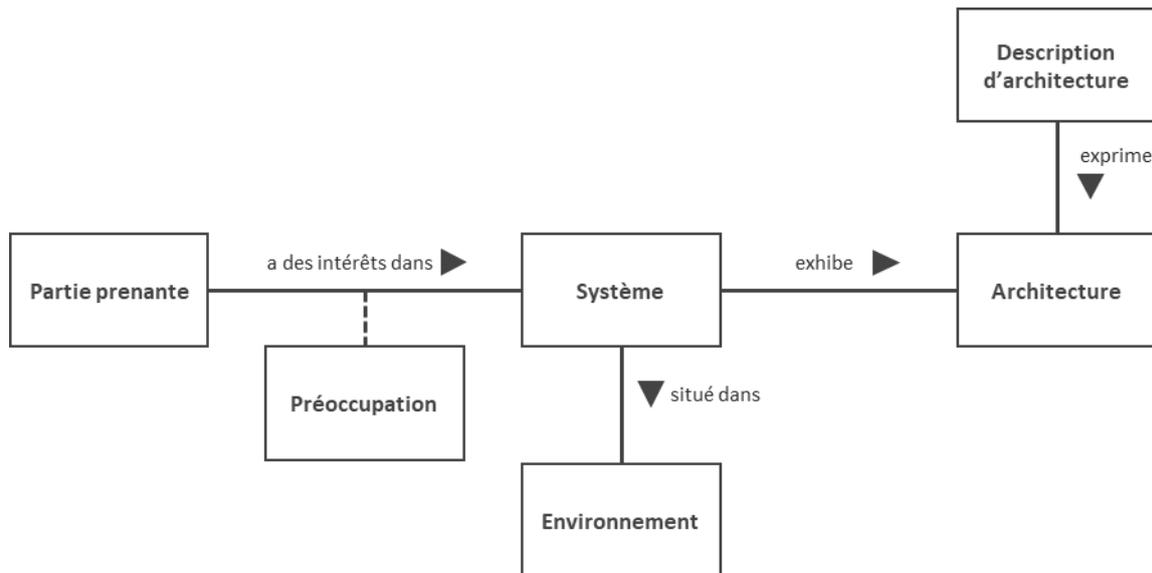


Figure 8: Contexte d'une description d'architecture selon (ISO, IEC, and IEEE 2011)

Une description d'architecture au sens de (ISO, IEC, and IEEE 2011) doit documenter tout ou partie d'une quantité définie d'éléments :

- Des informations pour son identification ;
- Les parties prenantes et leurs préoccupations à prendre en compte et effectivement prises en compte. Les préoccupations sont tout ce qui est matière à intérêt vis-à-vis du système pour une partie prenante, il peut s'agir de préoccupations de sûreté, de disponibilité, de performance, de coût, de maintenance, etc ;
- La définition de chacun des points de vue sélectionnés où un point de vue « *établit les conventions de construction, interprétation et utilisation d'une vue* ». Par exemple, une description d'architecture au sens de (Roques 2018; Voirin 2017) regroupe les points de vue opérationnels, systèmes, logiques, physiques et/ou IVV (Intégration, Vérification et Validation) ;
- La vue et les modèles associés pour chacun des points de vue sélectionnés où une vue exprime *l'architecture selon une perspective spécifique des préoccupations* et un modèle est une *représentation sélective de cette vue* ;
- Les relations (et règles les régissant) entre les éléments de la description d'architecture ;

- La documentation et justification de chacune des décisions clés qui ont été prises sur l'architecture.

Ces éléments sont illustrés Figure 9 extraite de (ISO, IEC, and IEEE 2011).

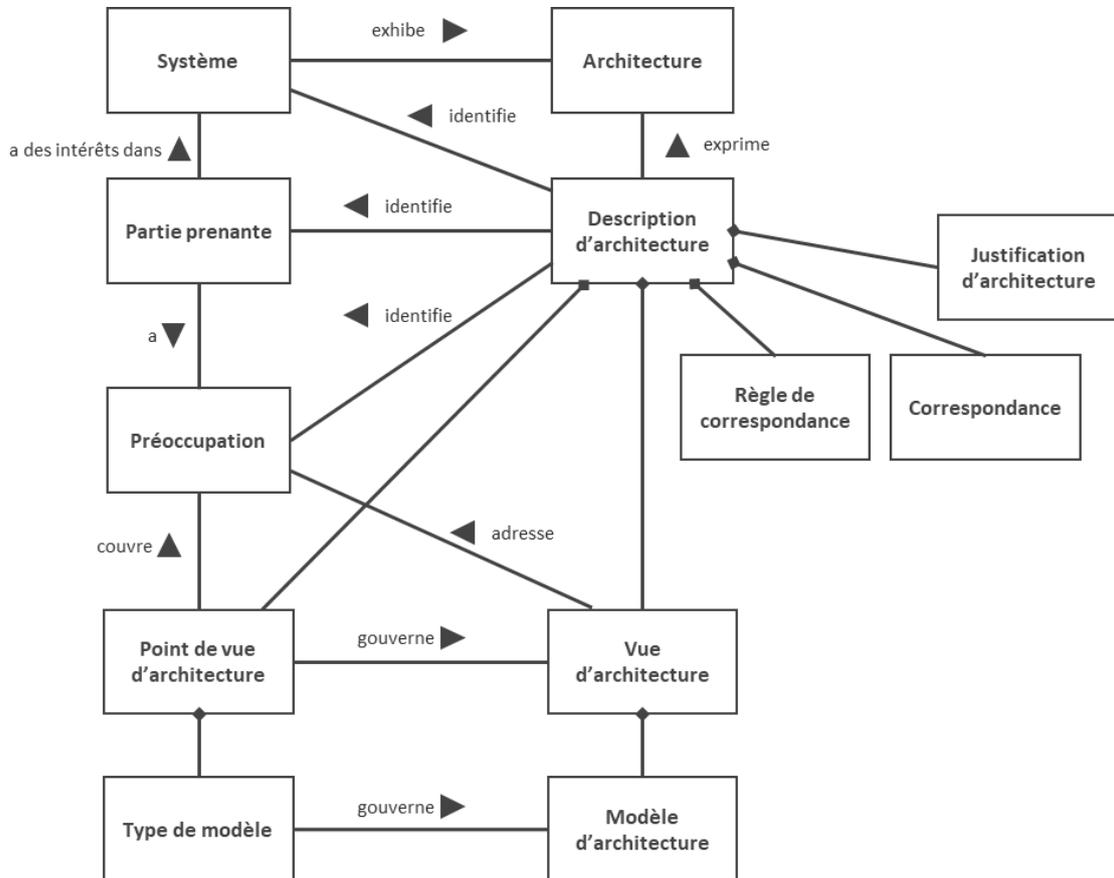


Figure 9. Modèle conceptuel simplifié d'une description d'architecture (ISO, IEC, and IEEE 2011)

Le processus de définition de l'architecture utilise divers modèles. La pratique traditionnelle de l'ingénierie des systèmes classe ces modèles selon les point de vue logique et physique. Les vues gouvernées par ces points de vue sont souvent peuplées de modèles dits d'architecture pour décrire les aspects nécessaires de l'architecture du système.

Le **point de vue logique de l'architecture du système** (concaténé en architecture logique ci-après) permet de décrire comment fonctionne le système. (BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; Faisandier 2014; ISO/IEC/IEEE 15288 2015; Sage and Rouse 2014) s'accordent à décrire l'architecture logique selon trois types de modèles tandis que (Fiorèse and Meinadier 2012) distingue les types de modèles structurels et comportementaux. Les types de modèles, les éléments représentés et les conventions de modélisation cités en exemple, sont

synthétisés dans le Tableau 1. De plus, un exemple de représentation statique de l'architecture logique est illustré Figure 10.

Tableau 1. Synthèses de types de modèles, éléments représentés et conventions de modélisation associés au point de vue logique

OUVRAGES	NOM DE TYPE DE MODELES	ÉLÉMENTS REPRESENTES	EXEMPLES DE CONVENTION ASSOCIEE
(Sage and Rouse 2014)	(a.1) Modèle de fonctionnement	(a.1) Représentation statique des fonctions, des flux fonctionnels et de la décomposition fonctionnelle du système	(a.1) Diagramme IDEF0 (Marca and McGowan 1987) et Diagramme de flux de données (Yourdon 1989)
	(a.2) Modèle de données	(a.2) Représentation de la structure des données et objets, portés par les flux fonctionnels, et leurs relations	(a.2) Diagramme IDEF1x (Mayer 1992) et Diagramme d'entité-relation (Yourdon 1989; Raymond McLeod Jr. 1994)
	(a.3) Modèle de règles	(a.3) Représentation de ce qui doit être fait quand un ensemble de conditions est validé, des états du système et des événements déclenchant une transition	(a.3) Arbre de décision (Sage and Rouse 2014), matrice de décision (Sage and Rouse 2014) et Diagramme d'état transition (Grosu et al. 1996)
(BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; Faisandier 2014; ISO/IEC/IEEE 15288 2015)	(b.1) Modèle fonctionnel	(b.1) Représentation de l'ensemble des fonctions, d'entrée/sortie, et leurs propriétés pour l'exécution des fonctions	(b.1) Tableau Entrées/Fonctions/Sorties (Faisandier 2014)
	(b.2) Modèle comportemental	(b.2) Représentation de l'ensemble des scénarios fonctionnels et modes opérationnels	(b.2) Diagramme FFBD (Faisandier 2014; Lemazurier, Chapurlat, and Grossetête 2017)
	(b.3) Modèle temporel	(b.3) Représentation de l'ensemble des niveaux temporels et décisionnels	(b.3) Aucun
(Fiorèse and Meinadier 2012)	(c.1) Modèle structurel	(c.1) Représentation de l'arrangement des fonctions et des flux échangés	(c.1) Diagramme de flux de données (Yourdon 1989) et diagramme de flux de contrôle (Dufresne and Martin 2003)
	(c.2) Modèle comportemental	(c.2) Représentation de l'enchaînement des fonctions	(c.2) Diagramme FFBD (Faisandier 2014; Lemazurier, Chapurlat, and Grossetête 2017)

La Figure 10 décrit, par exemple, la structure des fonctions et des flux échangés pour une fonction particulière d'un îlot nucléaire issu de (Navas et al. 2018). Ce modèle de la vue fonctionnel est de type modèle structurel et respecte les conventions de Functional Dataflow Blank diagram (Roques 2018). Les carrés verts représentent les fonctions du système, les carrés bleus les fonctions externes au système et les traits entre ces fonctions représentent les flux fonctionnels labellisés par la donnée, énergie ou matière échangée. Un flux particulier de matière, énergie ou information (ici la puissance thermique) est représenté par un ensemble d'éléments surlignés en bleu.

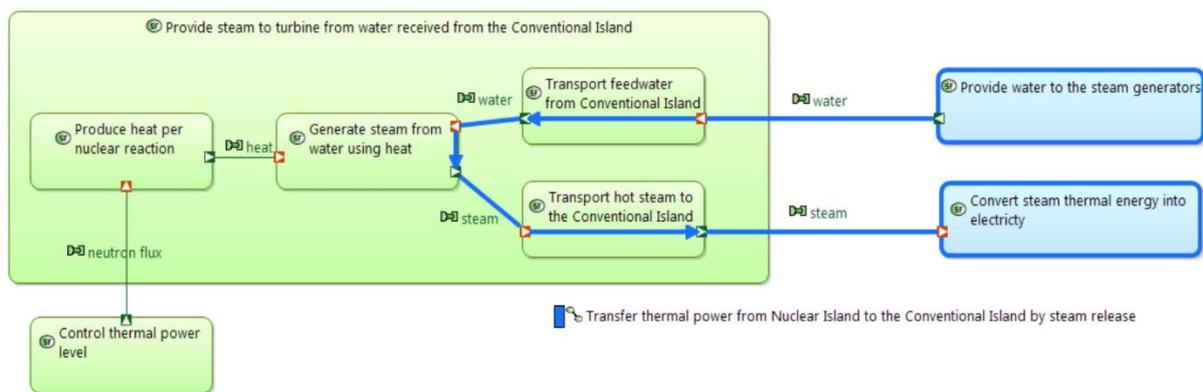


Figure 10. Exemple de représentation statique de l'architecture fonctionnelle d'un îlot nucléaire (Navas et al. 2018)

Le **point de vue physique de l'architecture du système** (concaténé en architecture physique ci-après) permet d'allouer les fonctions à des constituants (BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; Faisandier 2014; ISO/IEC/IEEE 15288 2015; Sage and Rouse 2014; Fiorèse and Meinadier 2012) s'accordent sur le fait qu'il existe autant de types de modèles que de préoccupations des parties prenantes à considérer. Néanmoins, il est possible de distinguer deux familles de types de modèles (Faisandier 2014). Les types de modèles dits structurels permettent de décrire les constituants technologiques, les interfaces physiques entre ces constituants et les propriétés de conception. Les types de modèles dits non fonctionnels permettent de décrire les Propriétés non Fonctionnelles (PnF) du système. Pour déterminer les types de modèles à élaborer, il sera nécessaire d'examiner les préoccupations des parties prenantes que ces modèles devront adresser. (ISO/IEC/IEEE 15288 2015), par exemple, décrit les types de modèles « masse » lorsqu'il s'agit de s'intéresser à la PnF de masse, ou encore les types de modèles « d'agencement » lorsqu'il s'agit de s'intéresser à la position géographique des constituants du système. D'autres types de modèles peuvent être considérés pour couvrir

des préoccupations telles que la maintenance, l'évolution, le retrait, les potentiels changements d'environnement, etc. Sur la base de l'exemple d'architecture logique illustrée Figure 10, un exemple de représentation d'une architecture physique correspondante est donné Figure 11. Ce modèle de la vue physique est de type modèle structurel et respecte les conventions de *Logical Architecture Blank diagram* (Roques 2018). Les carrés bleus représentent les constituants d'un îlot nucléaire. Les carrés verts représentent les fonctions que remplissent ces constituants et les traits entre les constituants représentent les flux physiques. Un flux particulier de matière, énergie ou information (ici la puissance thermique) est représenté par un ensemble d'éléments surlignés en bleu.

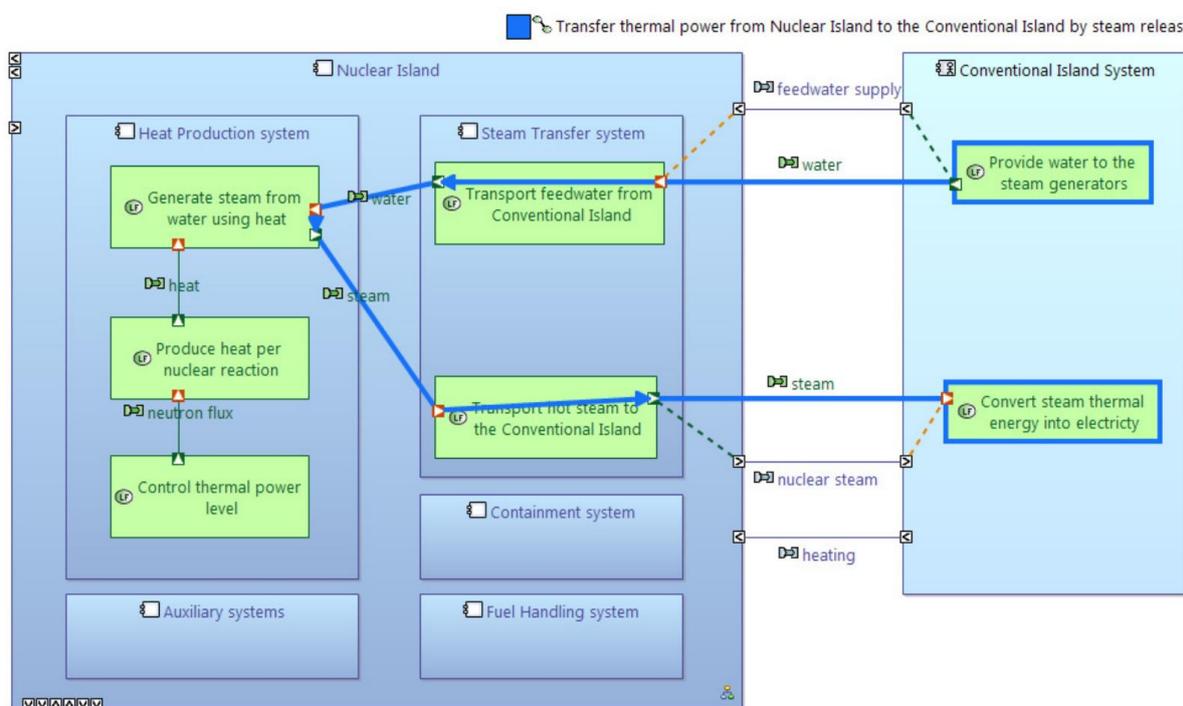


Figure 11. Exemple de représentation statique de l'architecture physique d'un îlot nucléaire (Navas et al. 2018)

L'élaboration d'alternatives est nécessaire dans chaque processus afférent à la définition de l'architecture logique et de la définition de l'architecture physique. Ces alternatives d'architecture doivent ensuite être évaluées pour sélectionner la plus appropriée. Le choix de cette architecture aura un impact conséquent sur les phases de conception suivantes et sur leur déroulement (Bonjour, Deniaud, and Micaëlli 2013). C'est l'exécution du processus d'analyse système qui permet de réaliser ces activités (BKCASE Editorial Board INCOSE 2016; ISO/IEC/IEEE 15288 2015; Faisandier 2014).

2e - I.2.B. Processus d'analyse système

Le processus d'analyse système est défini comme un "processus de soutien" dans (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) et vise une aide à la décision. L'analyse système permet de sélectionner une solution parmi plusieurs alternatives pour satisfaire convenablement les exigences des parties prenantes (Faisandier 2017), et supporter l'identification des écarts entre la vision du système tel qu'il a été esquissé et le référentiel des exigences au fur et à mesure de son évolution. Le System of Engineering Body of Knowledge (SEBoK) (BKCASE Editorial Board INCOSE 2016) fournit la définition suivante « *L'analyse de système permet aux développeurs de réaliser objectivement des évaluations quantitatives de systèmes afin de sélectionner et/ou d'actualiser l'architecture de système la plus efficace et de générer des données d'ingénierie dérivées* ». Une évaluation devrait être menée dès que se présente un choix technique ou une décision à prendre pour être conforme aux exigences système.

Dans le but de définir plus complètement l'analyse système, nous allons ci-dessous resituer ce processus dans le domaine de la conception, décrire les types d'analyse menés, rappeler son rôle de support aux processus techniques en ingénierie système, et préciser les activités de ce processus.

2e - I.2.B.a. L'analyse et l'évaluation en conception

(Blanchard and Fabrycky 1981) définissent la conception comme un processus itératif, présent tout au long du projet amenant à fournir le système attendu et qui comporte des activités de synthèse, d'analyse et d'évaluation telles que montrées en Figure 12.

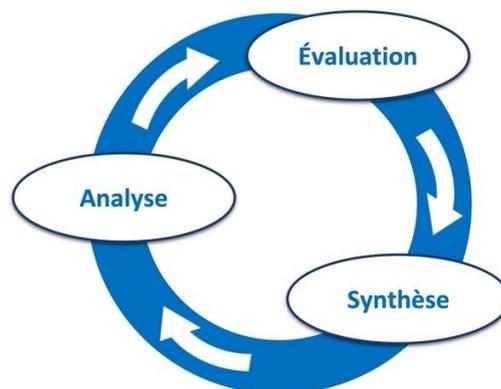


Figure 12. Modèle simplifié de la conception (Blanchard and Fabrycky 1981)

Ces activités sont définies par les auteurs comme suit :

- L'**activité de synthèse** est une activité créative qui produit des solutions techniques et technologiques en combinant (ou recombinaut) des connaissances existantes ou nouvelles de façon utile pour les parties prenantes. Plusieurs alternatives de solution de conception répondant aux mêmes besoins et contraintes des parties prenantes sont en général générées.
- L'**activité d'analyse** est dévolue essentiellement à l'estimation et à la prédiction des coûts, de l'efficacité et plus généralement des propriétés du système final que ces dernières soient souhaitées ou non (certaines propriétés ou certains comportements insoupçonnés et mis en évidence peuvent s'avérer utiles ou néfastes).
- L'**activité d'évaluation** consiste à comparer les alternatives entre elles et à les situer par rapport aux objectifs fixés pour satisfaire les parties prenantes.

De manière idéale, ces activités devraient être menées indépendamment et par des personnes différentes pour ne pas introduire de biais ou d'influence. Le terme « analyse système » regroupe, en réalité, les activités que Blanchard et Fabricky identifient comme analyse et évaluation. La partie suivante précise les types d'analyse les plus courants.

2e - 1.2.B.b. Les types d'analyse système

Parmi les analyses système, on distingue :

- Les **analyses d'opportunité** qui estiment les potentiels des pistes de solution à explorer pour satisfaire correctement les parties prenantes.
- Les **analyses d'efficacité** servant à caractériser les aspects opérationnels³ et/ou fonctionnels des alternatives de conception. Elles incluent les diverses analyses du système par rapport aux illities⁴ (Ross 2008).

³Aspects du système qui lui donnent la capacité de délivrer ses services (qui satisfont les besoins des parties prenantes) (ISO 2008).

⁴ Chaque système possède un ensemble de propriétés qui sont largement fonction du système dans son ensemble plutôt que de ses seuls éléments constitutifs. On peut aussi les appeler attributs de qualité, exigences non fonctionnelles, -illities (INCOSE 2016).

- Les **analyses de coût** estiment le coût des architectures candidates, le coût global de possession et le coût des activités des phases de cycle de vie du système.
- Les **analyses du cycle de vie** évaluent les impacts potentiels sur l'environnement du système durant tout son cycle de vie.
- Les **analyses de risques** consistent à identifier la vulnérabilité du système ainsi que les menaces provenant d'évènements internes ou externes pouvant apparaître durant le cycle de vie du système, et qui, du fait de cette vulnérabilité, peuvent avoir un impact plus ou moins grave sur la mission du système. Le niveau de risque (ou criticité) est déterminé par la probabilité de l'occurrence du risque, la gravité de l'impact généré et la capacité à détecter les menaces.
- Des **études comparatives** permettant de classer les solutions en fonction du niveau de satisfaction de tout ou partie des exigences.
- Les **analyses d'effectivité** qui sont des synthèses des précédentes et qui statuent sur le niveau d'acceptabilité globale de la solution

Ces différents types d'analyse système sont d'autant de manière de réaliser l'analyse système. Il faut être en capacité de faire interagir les éléments pour et issues de ces analyses entre elle.

2e - 1.2.B.c. Le processus d'analyse comparative et d'analyse de performance

On dénote néanmoins une récurrence dans la manière de réaliser ces analyses. Les activités menées lors ces dernières peuvent être regroupé comme illustré dans la Figure 13.

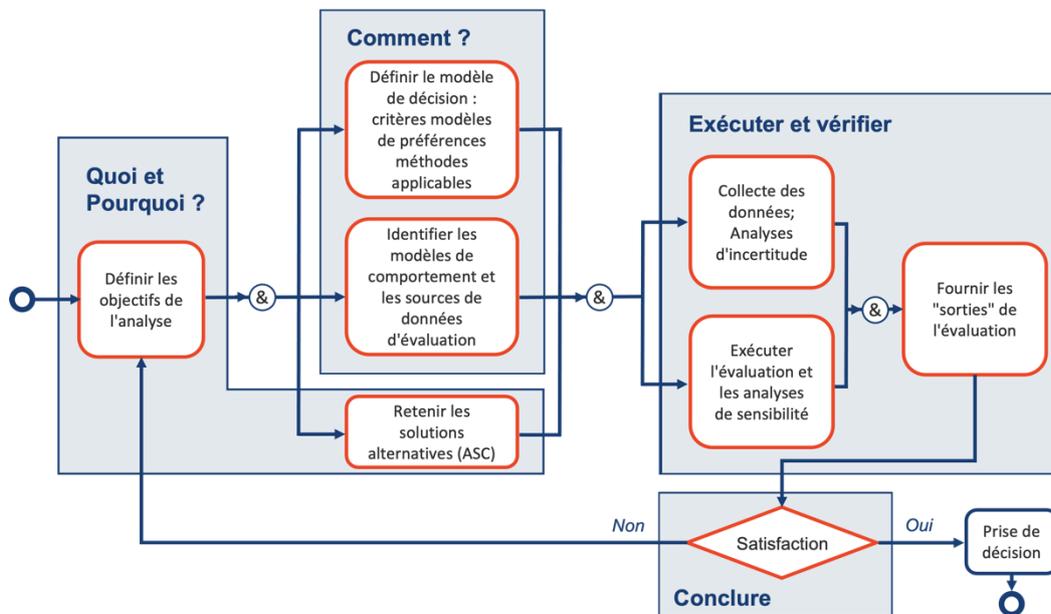


Figure 13. Activités du processus d'évaluation de l'efficacité issues de (Lô 2013)

« **Quoi et pourquoi ?** » : il s'agit de définir les objectifs de l'évaluation et les moyens, ainsi que les ressources disponibles pour les atteindre. Il faut, ensuite, sélectionner les alternatives de solutions possibles (i.e. qui ont été vérifiées et validées).

« **Comment ?** » : il s'agit de choisir les modèles de décision et les modèles de comportement du système à évaluer. Un modèle de décision comprend les éléments fondamentaux tels que les critères d'évaluation. Dans le cas d'une analyse multicritère ce modèle comporte aussi les préférences des parties prenantes, les méthodes de mesure de la satisfaction des parties prenantes sur ces critères, ainsi que la ou les méthodes d'estimation applicables de la satisfaction globale des alternatives.

Les modèles de comportement permettent de caractériser le niveau de performance des alternatives sur chaque critère. Ces performances, valeurs des grandeurs d'intérêt (e.g. delta de température entre la sortie et l'entrée d'un système de refroidissement) pour les parties prenantes, sont associées aux critères (e.g. impact environnemental) et exprimées dans des unités physiques différentes. Elles peuvent être estimées de façon qualitative ou quantitative, mais également de façon déterministe, stochastique ou possibiliste selon le niveau d'incertitude et d'imprécision du contexte. Le modèle de décision convertit ces performances sur une échelle de satisfaction commune (voir Figure 14) afin de pouvoir comparer les alternatives selon un ensemble de critères.

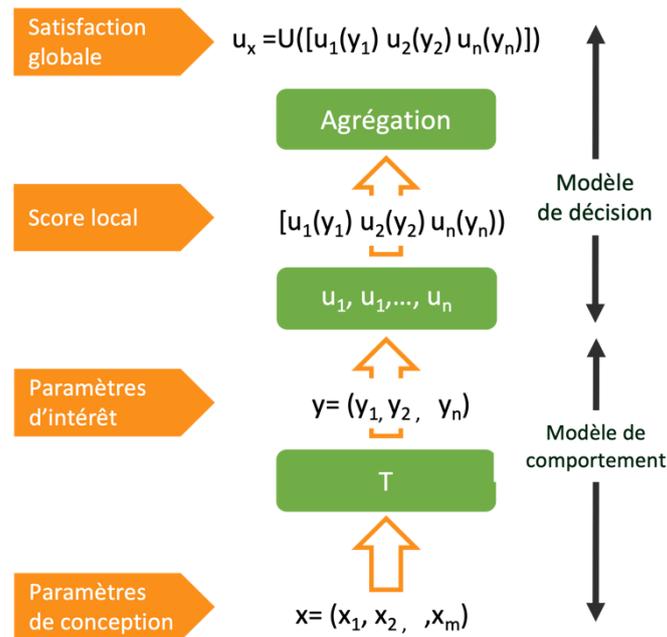


Figure 14. Modèle de décision et modèle de comportement d'après (Couturier et al. 2014)

Les concepteurs font des choix sur les paramètres de conception x_i qui définissent une alternative. Ces paramètres de conception influencent les grandeurs d'intérêt y_j pour les parties prenantes. Ces grandeurs d'intérêt sont, chacune, associées à un critère. Le niveau atteint sur chaque grandeur d'intérêt est converti en niveau de satisfaction de l'alternative pour ce critère sur une échelle commune par une fonction de score locale u_j . Enfin, une méthode d'agrégation fournit le niveau de satisfaction global U_x . Un opérateur d'agrégation très souvent utilisé est la moyenne arithmétique pondérée. Cependant, il existe de multiples opérateurs d'agrégation appropriés pour tenir compte des préférences des parties prenantes, du niveau de risque admissible par le décideur, du problème de dépendance des critères et du niveau d'incertitude des données en présence (Sow 2017).

« **Exécuter et vérifier** » : il s'agit de réussir les évaluations et d'analyser les résultats (analyse de sensibilité) au regard de l'incertitude des données et des modèles retenus.

« **Conclure** » : la reconduite de certaines des activités d'évaluation peut s'avérer nécessaire lorsque les objectifs de l'évaluation n'ont pas été atteints ou que les résultats d'évaluation ne sont pas suffisamment exploitables. Un rapport d'évaluation est généré afin d'éclairer les décideurs, qui suivent (ou non) les conclusions du rapport. Le rapport consigne les objectifs, les hypothèses, le déroulement du processus d'évaluation ainsi que les résultats de l'évaluation. Une trace des décisions de conception finalement prises et de leur rationnel

est conservée pour pouvoir revenir sur ces évaluations en cas d'itération nécessaire dans la conception.

Dans le cas d'une évaluation d'efficacité sans comparaison entre alternatives, le schéma de la Figure 13 (Lô 2013) s'applique. Il n'y a alors pas de comparaison des niveaux de performances des alternatives entre elles, mais une estimation de l'écart aux objectifs d'efficacité fixés dans le référentiel des exigences. Ces processus d'analyse d'efficacité sont menés tout au long du cycle de développement du système depuis la phase de conception préliminaire jusqu'à la phase de définition de détail des composants le constituant. Il est alors possible que des choix faits en conception de détail influencent des propriétés et valeurs essentielles pour des parties prenantes (par exemple, l'accessibilité aux ampoules grillées des phares d'une voiture (exigence de maintenabilité) rendue impossible au conducteur du fait de l'agencement du bloc optique).

Ces analyses sont sollicitées depuis les processus techniques de l'ingénierie système.

2e - I.2.B.d. Analyse système et ingénierie système

La Figure 15 met en évidence les interactions entre le processus support d'analyse système (qui comporte des activités d'évaluation) et les processus techniques d'IS selon (IEEE 2005).

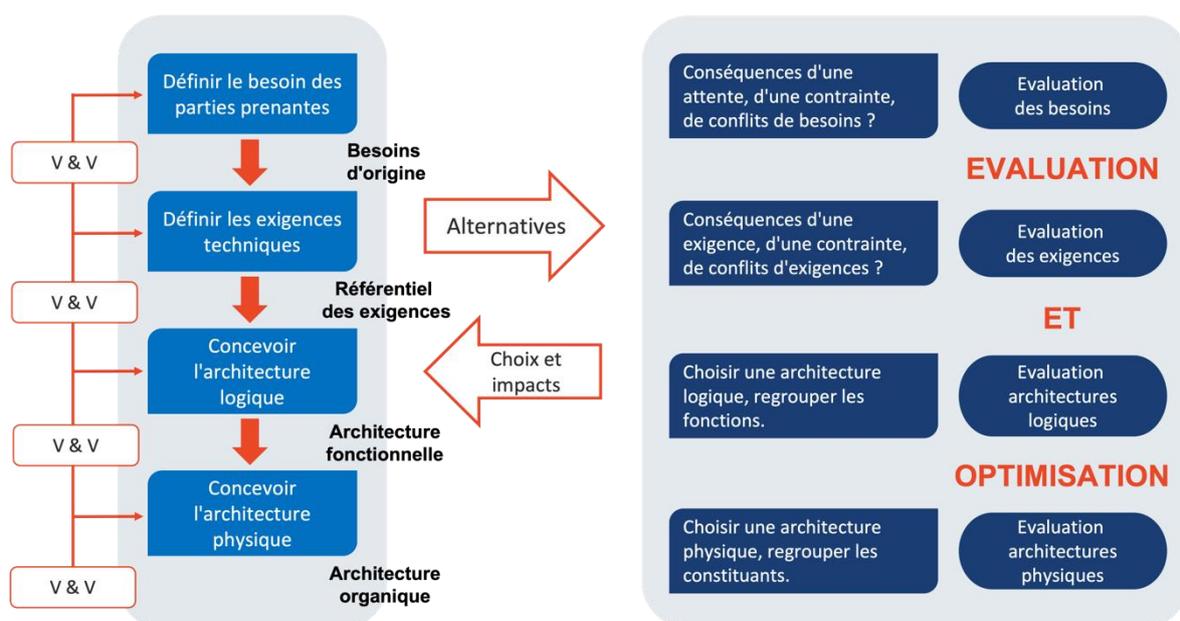


Figure 15. Processus d'ingénierie système selon (IEEE 2005)

Il est admis que l'analyse système doit-être menée pour faire des choix d'architecture organique ou physique (choix de composants et de leurs regroupements pour satisfaire, par exemple, des exigences de modularité (Bonjour 2008) ou d'autres propriétés non fonctionnelles dans le cas de « Design for X »). Cependant, l'analyse système doit aussi être menée dès la définition du besoin afin de déceler et de résoudre des conflits entre des besoins d'une partie prenante et/ou entre parties prenantes. Il s'agit alors de renoncer à certains souhaits qui se révéleraient non réalistes (problèmes de faisabilité, de coût, de délai ou de risque inacceptable) et/ou de trouver des compromis. En effet, le besoin n'est pas toujours explicité par le client (il peut au contraire être très bien défini, le travail d'évaluation ayant été mené en amont par le client). Les analyses sont aussi conduites en conception d'architecture logique, car certaines exigences opérationnelles peuvent être réalisées par des fonctions différentes qui peuvent être regroupées d'une façon non unique et selon divers enchainements présentant leurs propres performances d'exécution temporelle.

Selon leur type, les analyses système requièrent des méthodes de mise en œuvre spécifiques. Il est, par exemple, courant que les entreprises déploient leurs propres méthodes d'analyse de coût adaptées à leurs métiers. De même, si l'AMDEC est une méthode répandue d'Analyse des Modes De Défaillance Et de Criticité, certains secteurs industriels doivent aussi respecter des directives appropriées. Entre autres les analyses de sûreté telles que les Analyses Préliminaires de Risques (IEC 2019; Desroches, Baudrin, and Dadoun 2009) sont imposées dans le domaine nucléaire.

Les analyses d'efficacité (fonctionnelle et opérationnelle) ainsi que les analyses comparatives relèvent d'un processus dont les activités sont bien définies, que la section suivante décrit et illustre Figure 13.

2e - 1.3 Intérêt du MBSE au plus tôt

2e - 1.3.A. Besoins de modélisation (Model-Based Systems Engineering)

Le MBSE est une façon de suivre les principes et les objectifs de l'ingénierie système (IS), en se concentrant et en insistant sur la pertinence et l'importance de la modélisation et des modèles au lieu des documents.

Cette façon de réaliser l'IS peut être définie comme « *l'application formalisée de la modélisation pour soutenir les exigences du système, la conception, l'analyse, la vérification et*

les activités de validation commençant dans la phase de conception et se poursuivant tout au long du développement et des phases ultérieures du cycle de vie » (Walden et al. 2015) ou encore « Une méthodologie d'ingénierie système qui se concentre sur la création et l'exploitation de modèles en tant que principaux moyens d'échange d'informations entre ingénieurs, plutôt qu'un échange d'informations basé sur des documents » (Gianni, D'Ambrogio, and Tolk 2014).

L'approche MBSE promeut, de fait, un modèle comme « *une représentation sélective d'un certain système dont la forme et le contenu sont choisis en fonction d'un ensemble spécifique de préoccupations. Le modèle est lié au système par une correspondance explicite ou implicite* » (Walden et al. 2015). Un modèle, comme également mentionné dans la partie précédente, est ainsi une représentation de la réalité qui permet d'abstraire certains détails et de réduire en apparence la complexité. En outre, il facilite la création, la manipulation, la vérification de la cohérence et la gestion de la traçabilité des données d'ingénierie. Ce modèle peut soit être considéré seul et isolé ou au contraire considéré comme participant à un modèle du tout, hétérogène, mais couvrant toutes les vues de modélisation nécessaires en IS. Par essence, c'est aussi un moyen de communication et d'échange entre plusieurs acteurs (explicatif), mais également un support pour le raisonnement et l'analyse nécessaire pour juger les opinions et les choix de ces acteurs (prescriptif, normatif). Au-delà d'aspects techniques sur la manipulation des données, les modèles doivent faciliter la collaboration entre acteurs impliqués dans un projet d'ingénierie en permettant de : (1) améliorer la compréhension et l'expression entre les acteurs grâce à un vocabulaire et des modes de représentation partagés par tous (Sillitto 2010) ; (2) améliorer l'efficacité de conception par une méthodologie rigoureuse de modélisation, de vérification et de validation limitant les reprises ; (3) assurer la gestion de la traçabilité et le contrôle de la cohérence ; (4) faciliter l'automatisation de certaines activités ; (5) améliorer la capitalisation, la pérennité et la réutilisation des connaissances ; (6) faciliter la création et la manipulation des données. Le MBSE peut être mis en œuvre pour soutenir le projet de conception lors des phases de développement du système d'intérêt, mais également pour se concentrer sur l'intégration et la mise en œuvre des différentes disciplines impliquées durant un projet. Tous les processus d'IS sont concernés, par ex. l'ingénierie des exigences, la conception architecturale. Le MBSE

est un atout pour la manipulation des données issues des processus d'ingénierie système et générées tout au long du cycle de développement (Faisandier 2017). L'approche MBSE est, cependant, peu répandue en analyse système comme le montre le 'survey' (Parnell et al. 2021).

Le MBSE est supporté par des outils de modélisation (Rashid, Anwar, and Khan 2015; Roques 2018) multiparadigmes, souvent multi-utilisateurs partageant des référentiels communs. Cela permet d'avoir un environnement de travail cohérent et autant que possible interopérable.

Le déploiement du MBSE est donc une réponse valable pour le challenge industriel 1 : identifier les modèles décrivant sans ambiguïté des solutions d'architecture d'INB selon une approche systémique, mais le MBSE est encore peu développé en analyse système.

2e - I.3.B. Besoins d'évaluer et de choisir une architecture au plus tôt

Le Challenge 2 impose de faire le bon choix d'architecture au plus tôt, c'est-à-dire dès le processus « Business or Mission analysis » selon (ISO/IEC/IEEE 15288 2015). Dans cette phase qui précède les activités techniques d'IS telles qu'elles ont été définies ci-dessus, la notion d'architecture est plus controversée et mérite maintenant un approfondissement.

2e - II. Architecture et système

Le concept d'architecture a été introduit récemment dans l'ingénierie des logiciels produits ou des systèmes (Bass, Clements, and Kazman 2003). Néanmoins, le sens réel de ce concept varie selon les domaines, les communautés impliquées dans ces domaines et les entreprises (Jankovic and Eckert 2016). Aucune définition formelle ne fait donc consensus au sein et entre ces communautés (Rechtin and Maier 2010).

2e - II.1 Différents sens donnés au concept d'architecture

L'analyse métaphorique (Kendall and Kendall 1993), consiste à approcher le sens donné à un élément par des éléments du langage courant. (Smolander 2002) a appliqué ce type d'analyse en se concentrant sur des entretiens menés avec différentes parties prenantes issues de l'architecture dans le domaine du logiciel. Cette analyse a abouti à quatre prismes de lecture associables au concept d'architecture. Ils sont synthétisés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Synthèse des prismes de lecture inspirée de (Smolander 2002)

Métaphore associée (Prisme de lecture proposé)	Quel est le sens du terme architecture ?	Comment se traduit cette notion d'architecture dans la réalité des parties prenantes interrogées ?	Quels sont les environnements types des parties prenantes interrogées ?
En tant que structure	La mise en œuvre effective	L'implémentation de haut niveau du système	Plus forte chez les ingénieurs et les architectes
En tant que connaissance	La solution ou la collection de solutions réalisées dans le passé	La documentation pour les futurs lecteurs	Souligné par les ingénieurs, important pour tous
En tant que langage	Compréhension commune sur la structure du système	La communication entre les différentes parties prenantes sur les structures et les solutions de haut niveau.	Plus l'ensemble des parties prenantes est diversifié, plus l'accent est mis sur "l'architecture comme langage".
En tant que support de décision	La base de la prise de décisions rationnelles concernant ressources et stratégies	La décision concernant la structure du système	Souligné par les managers

L'architecture en tant que structure : l'architecture est ici vue comme la structure du système à implémenter. Cette métaphore rejoint la définition utilisée par (Rechtin and Maier 2010) où l'architecture est : « *La structure (en termes de composants, connexions et contraintes) d'un produit, d'un processus ou d'un élément* ». Cette idée est reprise par (Fiorèse and Meinadier 2012), où l'architecture interne du système est la manière dont le système sera intégré à partir de ses constituants, l'architecture étant vue ici comme une recombinaison agençant les constituants et les faisant interagir. La distinction est faite entre deux types d'architecture : l'architecture fonctionnelle ou logique compose les fonctions devant être réalisées et les flux échangés, l'architecture organique ou physique compose les constituants, les interfaces et fixe les liens et règles d'assemblage. Ces deux types d'architecture se retrouvent dans (Roques 2018). L'architecture logique montre généralement comment regrouper les fonctions à réaliser et assembler ces regroupements pour réaliser les missions et mettre à disposition des capacités identifiées en amont. L'architecture physique définit l'architecture finalisée du système comme il devrait être intégré.

L'architecture en tant que connaissance : l'architecture est vue ici comme contenue dans la documentation de la structure technique et pour transférer des informations au cours du temps. Le rôle de l'architecture, telle qu'elle a été abordée par (Smolander 2002), est de transférer des connaissances explicites et la compréhension des éléments techniques conçus par le passé. L'auteur associe également cette vision de l'architecture aux problèmes de gestion et de création de connaissances explicites ainsi que de leur transfert au fil du temps. De plus, les personnes interrogées dans ce cadre reconnaissent que la réutilisation des composants et des solutions reste problématique.

L'architecture en tant que langage : l'architecture est vue ici comme permettant d'établir une compréhension commune de la structure du système, et donc permettre à l'architecte de dire quelle est son idée aux parties prenantes comme aux équipes de conception. Cette orientation se focalise sur l'objectif de favoriser la communication de l'état actuel des idées et des scénarios alternatifs. De fait, il semble de loin préférable de rester à un niveau de détail suffisant à la compréhension, voire abstrait. Cette vision de l'architecture est plutôt utilisée par les projets avec une participation intense du client ou dont le marketing est fortement présent dans le développement, puisque nécessitant une forte communication autour du produit souhaité : par exemple, cela peut être le cas de projets avec un haut caractère d'innovation qui doivent être capables de convaincre des investisseurs à tout instant, et ce, jusqu'à la mise sur le marché du système. Néanmoins, cette vision est rarement connue et employée par les architectes et les ingénieurs qui voient l'architecture en tant que structure et connaissance.

L'architecture en tant que décision : ici l'architecture est vue comme le résultat des décisions prises vis-à-vis de la structure du système. L'architecture est alors utilisée comme moyen de planifier les ressources et stratégies. Elle reflète également les compromis réalisés pour résoudre des conflits entre les exigences et attentes contradictoires comme la sûreté, la sécurité et les performances. L'architecture est dans ce cas une justification de la prise de décision pour les ressources et stratégies. Cette vision de l'architecture place celle-ci comme un artefact de l'analyse système.

Comme décrit dans le sens associé à chacune de ces métaphores, il existe un lien entre ces dernières comme illustré Figure 16.

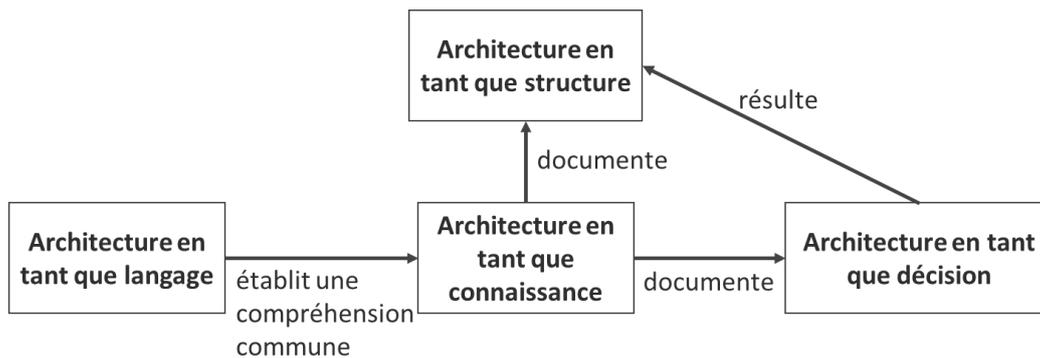


Figure 16. Lien entre les métaphores associées au concept d'architecture

Ces visions de l'architecture et leur mise en relation font apparaître la notion de description d'architecture telle qu'elle a été décrite dans (ISO, IEC, and IEEE 2011) où celle-ci « exprime l'architecture du système ».

Les différents concepts abordés, décrits dans la norme (ISO, IEC, and IEEE 2011) et détaillés dans la section précédente (Processus de définition et modélisation d'architecture) sont cohérents avec l'ensemble des métaphores présentées Tableau 2.

Chacun de ces concepts peut être mis en regard des quatre prismes évoqués plus haut comme proposé dans le Tableau 3 dans laquelle le recoupement entre les concepts de (ISO, IEC, and IEEE 2011), leur définition associée et (Smolander 2002) est proposé.

Tableau 3. Recoupement des concepts d'une description d'architecture avec les prismes

Concept	Définition	Métaphores associées
Architecture	Concepts ou propriétés fondamentaux d'un système dans son environnement, incarnés dans ses éléments, ses relations et dans les principes de sa conception et de son évolution (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Non applicable
Description d'architecture	Produit de travail utilisé pour exprimer une architecture (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Structure, Connaissance, Langage
Point de vue d'architecture	Produit de travail établissant les conventions pour la construction, l'interprétation et l'utilisation des vues d'architecture pour encadrer les préoccupations spécifiques du système (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Structure, Connaissance, Langage
Vue d'architecture	Produit de travail exprimant l'architecture d'un système du point de vue des préoccupations spécifiques du système (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Structure, Connaissance, Langage

Type de modèle	Convention pour un type de modélisation (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Langage
Modèle d'architecture	Une représentation sélective d'un certain système dont la forme et le contenu sont choisis en fonction d'un ensemble spécifique de préoccupations (Walden et al. 2015)	Structure, Connaissance, Langage
Justification d'architecture	Enregistre l'explication, la justification ou le raisonnement concernant les décisions d'architecture qui ont été prises (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Décision
Correspondance	Définir une relation entre des éléments de la description d'architecture. Les correspondances sont utilisées pour exprimer les relations d'intérêt dans une description d'architecture (composition, raffinement, traçabilité, dépendance, contrainte...) (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Connaissance
Règle de correspondance	Renforce les relations au sein d'une description d'architecture (ISO, IEC, and IEEE 2011)	Langage

La notion d'architecture et de description d'architecture étant précisée, intéressons-nous maintenant aux premières étapes de leur élaboration dans un projet industriel tel qu'un projet d'INB.

2e - II.2 Définition de l'architecture en amont de l'ingénierie

De façon analogue à d'autres domaines tels que le génie civil ou le génie logiciel (respectivement architecte/ingénieur et architecte logiciel/ingénieur logiciel), une distinction est faite entre les activités d'architecture de système et d'ingénierie. Plus exactement, les activités d'architecture système sont la « *deliberate manipulation of structure to achieve desired system behavior and properties* » (Crawley 2007).

Nous avons vu que les activités de définition d'architecture (fonctionnelle et organique) existent en IS. Or les premières élaborations d'architecture sont produites avant la phase d'ingénierie (en phase d'analyse de mission si l'on se réfère à la terminologie de (ISO/IEC/IEEE 15288 2015)). Pour éviter les confusions, nous retenons le terme « **architecting** » pour désigner cette première phase d'élaboration d'architecture.

Selon la littérature, les activités menées en phase d'architecting et d'ingénierie se distinguent, en effet, les unes des autres selon différentes thématiques synthétisées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Principales différences entre l'architecting et l'ingénierie.

Propriétés	Architecting	Ingénierie système
Objectifs de haut niveau (Graves 2009)	Tournée vers la stratégie, la structure et l'objectif du projet.	Tournée vers la modélisation, le partage et la mise en œuvre de solutions avant la qualification finale.
	Cherche à énoncer le problème.	Cherche à résoudre des problèmes techniques.
Activités principales (ISO/IEC/IEEE 2019b; Crawley 2007)	Construction simultanée des besoins et des concepts ou propriétés fondamentales de la solution. Transformation des besoins, objectifs et contextes en principes de système.	Ingénierie des exigences des parties prenantes et des exigences du système. Ingénierie des architectures de système (fonctionnelle, logique, physique, Vérification et Validation, Analyse Système), Définition des exigences induites et des fonctions techniques.
	Haut niveau d'abstraction et attribution stable de fonctions (abstraites) complétées par une définition d'interfaces, les deux permettant l'élicitation des exigences.	Passage progressif vers le concret et une conception de plus en plus détaillée. Sélection des architectures fonctionnelles et physiques les plus satisfaisantes parmi plusieurs candidates.
Impacts sur les projets (Clements, Kazman, and Klein 2001)	Les activités d'architecture déterminent la structure du projet et ont un impact sur les calendriers et aux budgets, aux objectifs de performance du système, à la structure de l'équipe, à l'organisation, aux activités IVTV (Intégration, Vérification, Transfert et Validation), etc.	Adaptation de la structure du projet telle qu'elle a été définie dans le processus d'Analyse Système.
Évaluation du système (Clements, Kazman, and Klein 2001)	Les propositions architecturales sont évaluées au regard des préoccupations des parties prenantes. On doit aussi être sûr que le futur système atteindra ses objectifs de qualité et qu'il sera réalisable.	Le système soumis au processus d'ingénierie est vérifié, validé et évalué de manière itérative jusqu'à la fin du cycle de développement.

Propriétés	Architecting	Ingénierie système
Exigences système (Rechtin and Maier 2010)	Les exigences du système sont un résultat.	Les exigences du système sont également étudiées séparément, en complétant les apports de l'architecture système.

L'architecting et l'ingénierie de système peuvent effectivement être interprétées comme deux extrémités d'un continuum contribuant à la définition de l'architecture du système d'intérêt et induisant une répartition du type de résultats attendus et de l'effort nécessaire comme le montre la Figure 17.

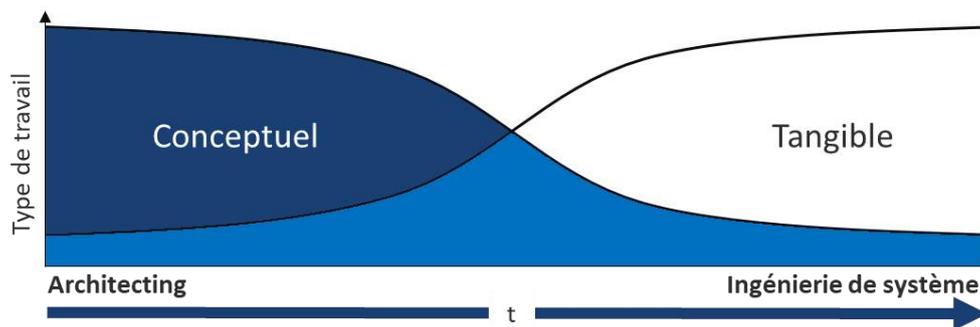


Figure 17: Recouvrement de l'Ingénierie de système et de l'Architecting

Ainsi, « l'ingénierie de système est un processus déductif s'appuyant sur des éléments mesurables et se concentre sur la science de la résolution de problèmes techniques. L'architecting est un processus inductif s'appuyant sur des éléments non mesurables et se concentre sur l'art de satisfaire les parties prenantes » (Rechtin and Maier 2010).

L'architecting s'attèle à transformer un ensemble de valeurs, de besoins et d'objectifs en quelques lignes de conduite de l'architecture (ou principes architecturaux) pour guider le travail d'ingénierie de système. L'ingénierie de système transforme, en effet, ces principes en une solution optimisée et implémentée. L'architecte système a le rôle de créer initialement l'architecture et de s'assurer de la cohérence, documentation, complétude et conformité de l'architecture du système tout au long de son cycle de vie. Il s'assure de l'intégration technique de tous les métiers d'ingénierie et de la prise en compte des exigences système de qualité, de coûts et de délais jusqu'à la livraison de l'INB. Il doit s'accommoder des contraintes relatives aux calendriers, aux budgets, aux objectifs de performance du projet, à la structure des équipes, à l'organisation et aux activités d'ingénierie.

La transition entre les activités d'architecting et d'ingénierie de système consiste donc à clarifier et à décrire la définition du problème telle qu'elle est perçue pendant l'architecting (Jeremy Bourdon et al. 2020). Cette définition s'accompagne d'un ensemble de principes abstraits de solutions afin d'aider et de guider les ingénieurs en ingénierie de système à modéliser, vérifier, valider et évaluer plus efficacement la solution de conception. En particulier, cette transition doit transmettre à l'ingénierie de système les valeurs, les besoins et les contraintes des parties prenantes qui ont été révélés pendant les activités d'architecting. En effet, l'ingénierie des exigences (se concentrant sur les exigences des parties prenantes et du système), l'ingénierie de l'architecture, la modélisation, la vérification, la validation et l'évaluation du système (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) structurent les activités garantissant la conformité aux préoccupations recherchées du développement des architectures et des solutions architecturales résultantes, en relation avec les attentes des parties prenantes.

Néanmoins, plusieurs façons d'appréhender l'élaboration de l'architecture de système coexistent (Crawley 2007; ISO, IEC, and IEEE 2011; Emes et al. 2012; Muller 2011). Selon (Muller 2011), la place de l'élaboration d'architecture dans le processus de développement du système peut être différenciée selon quatre écoles de pensée (Figure 18) :

- École 1 : l'élaboration d'architecture du système se réfère à la stratégie, en fournissant une direction, et est absente dans les phases opérationnelles.
- École 2 : l'élaboration d'architecture est présente dans la phase de définition d'un produit ainsi que dans la phase de vérification.
- École 3 : l'élaboration d'architecture doit être réalisée pendant tout le cycle de vie du développement.
- École 4 : l'élaboration d'architecture est présente uniquement dans la phase technique (conception).

Ces écoles de pensée peuvent être replacées sur le cycle de vie présenté dans le chapitre précédent (ESQ : Esquisse, APS ; Avant-Projet Sommaire, APD : Avant-Projet Définitif, PRO/ACT : PROjet/Assistance pour la passation des Contrats de Travaux, DET : Direction de l'Exécution du ou des contrats de Travaux, EXE : EXEcution, OPC : Ordonnancement,

coordination et Pilotage du Chantier, AOR : Assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des Opérations de Réception).

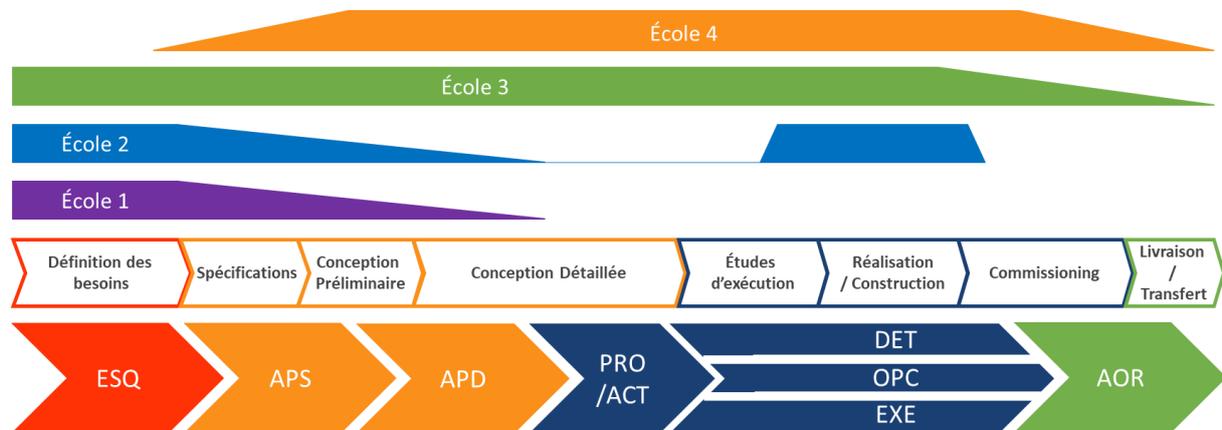


Figure 18. Quatre écoles de pensée de la place des activités d'architecture dans le cycle de vie (Muller 2011)

Du fait d'observation sur les projets d'ingénierie d'Assystem, et compte-tenu du caractère spécifique des infrastructures critiques pour lesquelles les choix architecturaux exercent une influence considérable sur les phases ultérieures, l'école 3 semble la plus logique sur laquelle baser les travaux. L'école 3 est privilégiée, c'est-à-dire que l'Élaboration d'architecture du système est « *le processus de conception, de définition, d'expression, de documentation, de communication, de certification de la bonne mise en œuvre, de maintien et d'amélioration d'une architecture tout au long du cycle de vie d'un système* » (ISO, IEC, and IEEE 2011).

Le chapitre précédent présente le cycle de vie de développement d'une INB et met en avant plusieurs phases. Ces phases peuvent être regroupées en fonction de la nature des activités réalisées. Chacune des phases du cycle de vie projet a comme extrant un produit des activités d'architecture. Les phases d'architecting et d'ingénierie, ainsi que les sortants des activités d'élaboration d'architecture sont juxtaposés au cycle de vie projet dans la Figure 19.

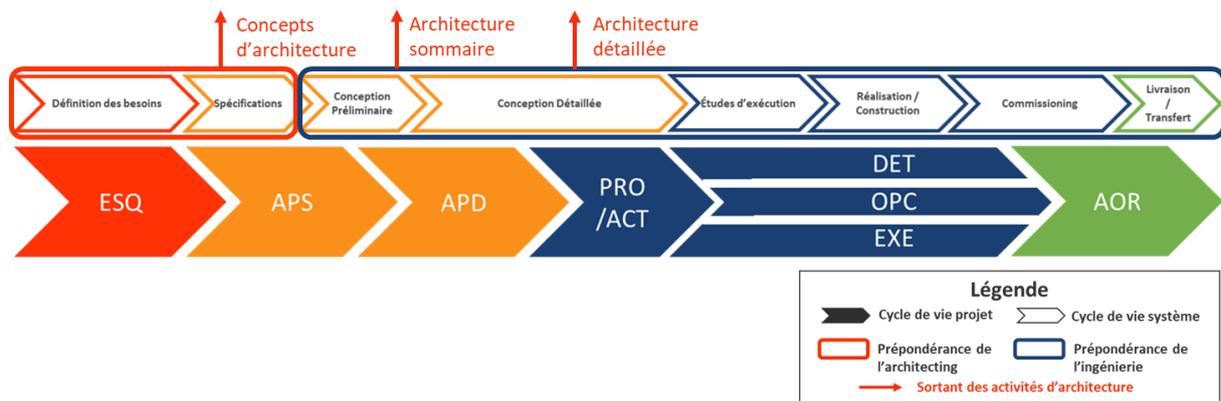


Figure 19: Phases d'architecting et d'engineering dans le cycle de vie projet

Ayant défini la notion d'architecture et les premières phases de son élaboration en phase d'architecting, se pose le problème de l'adaptation du processus d'analyse système pour l'évaluation de ces architectures très abstraites en phase d'architecting.

2e - III. Analyse Système (AS) et Évaluation d'Architecture (EA)

L'architecting est la construction simultanée des besoins et des concepts ou propriétés fondamentales de la solution. Ces propriétés indispensables orientent le choix des ingénieurs chargés de concrétiser celle-ci en phase d'ingénierie. La Figure 20 illustre les liens entre Analyse Système (AS) et Évaluation d'Architecture (EA).

AS : L'analyse système peut être utilisée pour détecter et résoudre les conflits entre besoins des parties prenantes se présentant en phase d'architecting comme le suggère l'IEEE1220 (Figure 15) sans toutefois suggérer une méthode pour le faire. Les analyses d'opportunités, de risques et de coûts sont à mener pour identifier des espaces de solutions les plus prometteurs. Mais, comment évaluer les capacités caractérisant à ce stade de conception les solutions architecturales ? Comment s'assurer de l'adaptabilité, de la flexibilité et de la robustesse des concepts et des principes architecturaux alors que le niveau d'incertitude en début de conception est le plus haut ? Quels modèles de comportement du système peuvent alors être construits si le projet relève de la conception innovante ou même créative où il s'agit de créer une architecture depuis zéro ? Dans les cas où des projets similaires ont déjà été menés par l'entreprise dans le passé, les retours d'expérience peuvent être exploités pour évaluer la pertinence des modifications architecturales à apporter. Ainsi, l'analyse système telle qu'elle a été définie au paragraphe 2e - I.2.B ne suffit pas pour évaluer

ces premières esquisses d'architecture et il y a un besoin de définition de méthodes et outils pour faire de l'évaluation d'architecture (EA). Les normes (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b) tendent à combler cette lacune.

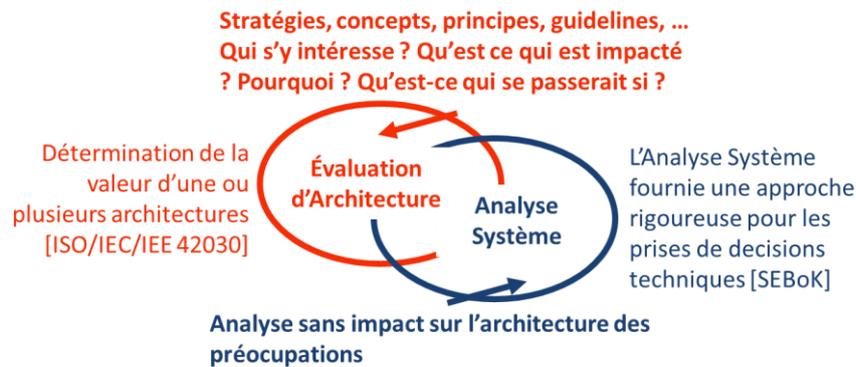


Figure 20: Périmètre de l'analyse système et de l'évaluation d'architecture.

EA : l'évaluation d'architecture est une activité cruciale pour garantir que les décisions de conception sont appropriées et réduire les risques de remaniement majeur en cours de conception. Les normes (ISO, IEC, and IEEE 2011) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b) décrivent que l'évaluation de l'architecture peut être utilisée pour :

- Valider que les architectures répondent aux préoccupations des parties prenantes ;
- Évaluer la qualité des architectures par rapport à leur objectif prévu ;
- Évaluer la valeur des architectures pour leurs parties prenantes ;
- Déterminer si les entités, au travers de leur architecture, répondent à leur objectif ;
- Fournir des connaissances et des informations sur les entités de l'architecture ;
- Évaluer les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs de l'architecture ;
- Clarifier la compréhension de l'espace des problèmes et des besoins, et attentes des parties prenantes ;
- Identifier les risques et les opportunités associés aux architectures ;
- Soutenir la prise de décision lorsque des architectures sont concernées.

Les activités d'EA doivent être réalisées à chaque étape du processus de définition architecturale, depuis l'esquisse jusqu'à la livraison d'une solution. Cette évaluation doit donc

avoir lieu aussi souvent que requis par les évolutions/précisions de préoccupations des parties prenantes non convergentes avec la vision de l'architecture initiale. En outre, l'architecture du système doit être conçue pour rester compatible avec l'ensemble du cycle de vie du futur système.

De fait, évaluer les solutions de conception au plus tôt, c'est-à-dire mettre en œuvre des techniques d'EA dès la définition conceptuelle de la solution, est important, car les premières décisions de conception définissent 85% des coûts de développement de la solution (Berliner and Brimson 1988). Il faut ainsi être capable d'analyser et d'évaluer les architectures du système dès la phase d'architecting et en continuité avec la phase d'ingénierie du système.

La littérature couvre assez bien la définition des concepts et des activités à mettre en œuvre pour réaliser l'analyse système et l'évaluation d'architecture, mais manque de prescription sur leur déploiement et leur gestion sur un projet au sein d'une entreprise. Même si différentes approches et méthodes d'évaluation sont suggérées, la littérature ne guide pas non plus dans leur choix pour mener ces évaluations d'architecture.

Nous allons donc maintenant pouvoir définir en synthèse de ce chapitre nos orientations de recherche pour relever les trois challenges dégagés au chapitre 1.

2e - IV. Objectif de la recherche et contributions

Pour relever les trois challenges, notre objectif principal de recherche est d'**établir les conditions pour assister un collectif d'acteurs en soutenant efficacement et en toute confiance leurs activités d'évaluation (en tenant compte des préoccupations des parties prenantes par exemple : performances, sûreté, maintenabilité ou autres exigences), de comparaison, d'argumentation et de choix d'alternatives architecturales de solutions durant un projet.**

Cette assistance pour être effective doit faire l'objet d'une traçabilité constante durant tout le cycle de développement de l'INB, en promouvant, par hypothèse, la création, l'usage et le partage de modèles de différentes natures.

Le Tableau 5 synthétise les manques identifiés pour chacun des challenges à relever et les contributions associées.

Tableau 5. Synthèse des challenges à relever et des contributions associées

CHALLENGES A RELEVER	MANQUES IDENTIFIES	CONTRIBUTIONS
Identifier les modèles et des moyens de modélisation permettant de décrire sans ambiguïté des solutions d'architecture d'INB selon une approche système.	Il n'y a pas consensus sur la notion d'architecture, le MBSE en propose une définition reconnue en ingénierie mais qui ne couvre pas les phases amonts ESQ et APS, il y a un manque d'approche basée modèle de l'EA.	Mise en œuvre du MBSE y compris pour l'évaluation d'architecture
Évaluer et justifier au plus tôt le choix de la solution la plus satisfaisante malgré les évolutions possibles des besoins et avec une exigence de traçabilité.	Il y a des normes sur l'EA mais pas de méthode permettant de déployer et conduire l'EA sur un projet (normes non prescriptives sur le sujet).	Proposer une méthode de déploiement, de conduite et de clôture de l'évaluation d'architecture sur un projet de développement d'INB en couvrant l'ensemble du cycle de vie de l'INB.
Capitaliser et réutiliser les retours d'expérience des projets antérieurs, les compétences présentes ou acquises dans l'entreprise et les aspects organisationnels mis en œuvre dans l'élaboration d'architectures, leur vérification, leur validation et leur évaluation.	il n'y a pas de méthode permettant de capitaliser les Retours d'Expérience sur les EA projets en entreprise ni de guide pour faire évoluer les bonnes pratiques et les compétences en EA dans l'entreprise	Proposer une méthode de déploiement, de capitalisation et d'amélioration continue des pratiques d'évaluation d'architecture au niveau de l'entreprise.

Ce travail de thèse vise à définir, formaliser et outiller une méthode basée sur l'utilisation des modèles pour l'opérationnalisation de l'Évaluation d'Architecture au sein d'une entreprise et de ses projets.

Cette méthode, appelée EVA-CIME pour EVALuation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering, est basée sur cinq éléments principaux (concepts, langages, démarches opératoires, outils et référentiels d'expertises et de connaissances) et qui seront illustrés tout au long des chapitres suivants. Le chapitre 4 propose une méthode pour déployer, conduire et clôturer l'évaluation d'architecture sur un projet au travers d'une déclinaison d'EVA-CIME, EVA-CIME Projet. Le chapitre 5 propose alors une méthode pour déployer, capitaliser et améliorer en continue l'évaluation d'architecture en entreprise au travers d'une déclinaison d'EVA-CIME, EVA-CIME Entreprise. Le chapitre 5 est une illustration de l'application d'EVA-CIME (EVA-CIME Projet et EVA-CIME Entreprise) dans un projet d'INB

mené chez Assystem. Enfin, après une conclusion les perspectives de futurs axes de recherche sont ouverts.

Chapitre 3e - Proposition de méthode pour déployer, conduire et clôturer l'évaluation d'architecture sur un projet d'INB

3e - I. Introduction

Adoptant une démarche processus promue par les standards de l'IS, une vision systémique sur laquelle cette IS est elle-même bâtie, et privilégiant enfin la modélisation et l'usage des modèles comme le MBSE le propose, la méthode EVA-CIME (Evaluation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering) permet de mettre en place et de faire évoluer la culture de l'évaluation d'architecture dans l'entreprise. Elle permet également d'assister et d'opérer concrètement puis de tracer l'évaluation d'architectures qui sont nécessaires au cours du projet. Elle favorise enfin la réutilisation et la diffusion de pratiques. Plus réellement, cette méthode vise à aider les parties prenantes de l'entreprise et/ou des parties prenantes impliquées dans des projets à (1) conceptualiser, définir et planifier, (2) réaliser, exécuter et piloter, et (3) clôturer, capitaliser et améliorer l'évaluation de l'architecture tout au long du cycle de vie du système.

La méthode EVA-CIME fait apparaître deux niveaux de déclinaison : le niveau projet (objet du chapitre 3) et le niveau entreprise (objet du Chapitre 4). Ce chapitre se concentre dans un premier temps sur une vision globale de la méthode EVA-CIME reprenant les principes fondamentaux de toute méthode puis sur la présentation de la déclinaison projet d'EVA-CIME et de ses composantes.

3e - II. Fondamentaux d'EVA-CIME

Comme toute méthode, EVA-CIME est composée de cinq éléments essentiels schématisés Figure 21.

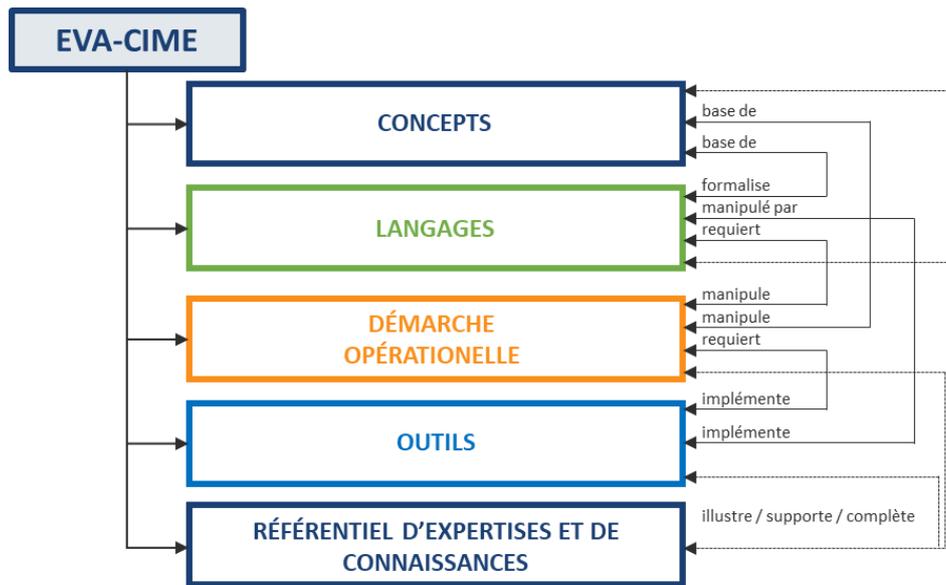


Figure 21 : Composants de la méthode EVA-CIME (Evaluation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering)

Par construction, la méthode EVA-CIME est, tout d’abord, caractérisée par un ensemble de **concepts** i.e. des idées, des faits et des caractéristiques, qui sont nécessaires pour comprendre, partager sans ambiguïté sémantique et mieux appréhender le domaine de l’évaluation d’architecture. Elle emprunte, de fait, des concepts communs avec d’autres domaines qui sont, ici, l’Ingénierie Système, l’Architecting, le MBSE et ainsi que la Gestion de Projet pour les raisons évoquées plus loin. L’ensemble de ces concepts, mais également des relations, attributs descriptifs et contraintes de mise en relation sont formalisés sous forme d’un modèle conceptuel de données ou encore, dans notre cas, d’un méta modèle. Cette formalisation permet de lever les éventuelles ambiguïtés syntaxiques, sémantiques et pragmatiques classiques. La définition de ces concepts est nécessaire tant pour la déclinaison projet (Chapitre 3) que la déclinaison entreprise (Chapitre 4).

Certains de ces concepts, relations et attributs sont ensuite logiquement regroupés pour établir des **langages**, entre autres de modélisation. Ces **langages** sont conformes au précédent méta modèle et permettent de créer des modèles et d’instancier certains des concepts de ce méta modèle retenus pour exprimer une vue. Il existe donc différentes vues qui encadrent chacune certaines préoccupations conditionnant l’effort d’évaluation de l’architecture. Ces langages peuvent être dotés d’une syntaxe concrète textuelle ou graphique comme c’est exemple le cas pour la plupart des langages existants comme Business Process

Modelling and Notation (BPMN) (Object Management Group (OMG) 2012), SysML(Object Management Group (OMG) 2019), Gantt (Wilson 2003). Il est aussi possible de définir de nouveaux langages pour s'adapter aux besoins spécifiques de la définition de l'effort d'évaluation de l'architecture. Les langages sont principalement définis dans la déclinaison projet (Chapitre 3) et intégrés à un cadre de description qui est étendu dans la déclinaison entreprise (Chapitre 4).

La **démarche opératoire** guide ensuite les utilisateurs de la méthode et s'adresse, d'une part, à ceux qui déploient et réussissent l'effort d'évaluation de l'architecture sur un projet spécifique et, d'autre part, à ceux qui veulent améliorer les pratiques de l'évaluation d'architecture par le biais de l'organisation (équipe de formation, référentiels, cadre de référence, équipe d'évaluation, personne en charge du gain de maturité). Dans ce chapitre, la **démarche opératoire** au niveau des projets représente l'essentiel de la « déclinaison EVA-CIME Projet ». Pour chacune des étapes de cette démarche opératoire (Préparer, Exécuter, Clôturer), ce chapitre précise les activités à mener, les parties prenantes et les rôles impliqués, les concepts utilisés pour chacune d'elle et comment ces concepts ont été regroupés dans un cadre de description de l'évaluation d'architecture. Enfin, il amorce la nécessité d'une acculturation au niveau entreprise, justifiant la démarche opératoire au niveau de l'entreprise, vue dans le chapitre suivant comme la « déclinaison EVA-CIME Entreprise » pour supporter l'évaluation d'architecture et favoriser la capitalisation/réutilisation des expériences passées. Chacune des déclinaisons, projet (Chapitre 3) et entreprise (Chapitre 4), définissent une démarche opératoire qui leur est propre.

Les **outils** mettent en œuvre ces démarches opératoires en permettant la manipulation des langages, donc la création de modèle par définition conforme au méta modèle. Ils supportent alors la mise en œuvre de la méthode et privilégient l'expérience utilisateur. Néanmoins, la méthode doit rester autant que possible indépendante des outils. Pour les besoins des illustrations concrètes (Chapitre 5), des outils ont été utilisés, notamment Capella(Roques 2018). Celui-ci n'implémente que partiellement la méthode. C'est pourquoi la contribution à cette partie est principalement une spécification fonctionnelle de ce que l'on attend des outils pour la méthode accompagnée de quelques développements de preuve de concepts.

Enfin, le **Référentiel d'Expertises et de Connaissances** (REC) regroupe les meilleures pratiques, les exemples, des modèles jugés pertinents et utiles i.e. des patrons pour évaluer des architectures ainsi qu'un référentiel d'outils et de techniques. Le REC fournit cet ensemble d'informations de manière structurée afin d'exploiter le retour d'expérience, de gagner du temps dans les tâches d'évaluation et de faciliter la mise en place d'un processus d'amélioration continue et de mise à niveau de la méthode au fil du temps. La notion de référentiel d'expertise et de connaissance bien qu'abordée dans les deux déclinaisons d'EVA-CIME est réellement développé lors de la déclinaison entreprise (Chapitre 4).

3e - III. Déclinaison projet d'EVA-CIME

3e - III.1 Principaux concepts d'EVA-CIME Projet

Cette première section fournit les bases conceptuelles d'EVA-CIME Projet. La mise en place d'un processus d'évaluation d'architecture nécessite de déterminer et de formaliser un vocabulaire commun, autant que faire se peut unifié et désambiguïé, basé sur des concepts, des attributs et des relations qui sont ici formalisés dans un méta-modèle et utilisant une approche de méta-modélisation (Jouault and Bézivin 2006). La littérature sur le sujet (présentée dans le Chapitre 2), est composée essentiellement de normes industrielles et d'articles académiques à partir desquels ces travaux ont pu identifier et structurer ces concepts, attributs et relations. Les domaines jugés intéressants pour EVA-CIME sont l'évaluation de l'architecture (ISO, IEC, and IEEE 2019b; ISO/IEC/IEEE 15289:2019 2019), la description de l'architecture et le MBSE (ISO, IEC, and IEEE 2011), la modélisation de l'architecture comme la modélisation d'entreprise (ISO 2020), l'ingénierie des systèmes (ISO/IEC/IEEE 15288 2015), la gestion du développement des systèmes (Object Management Group (OMG) 2008b) et le référencement des connaissances (Object Management Group (OMG) 2017). Ces groupes de concepts sont illustrés Figure 22 et l'utilisation concrète de leur contenu est présentée au fur et à mesure. En particulier, cette figure met en évidence les concepts et processus des différents standards (ISO, IEC, and IEEE 2019b; 2019a; 2011) qui constituent un cadre conceptuel suffisamment générique pour être adapté à chaque projet INB ainsi qu'à ses spécificités.

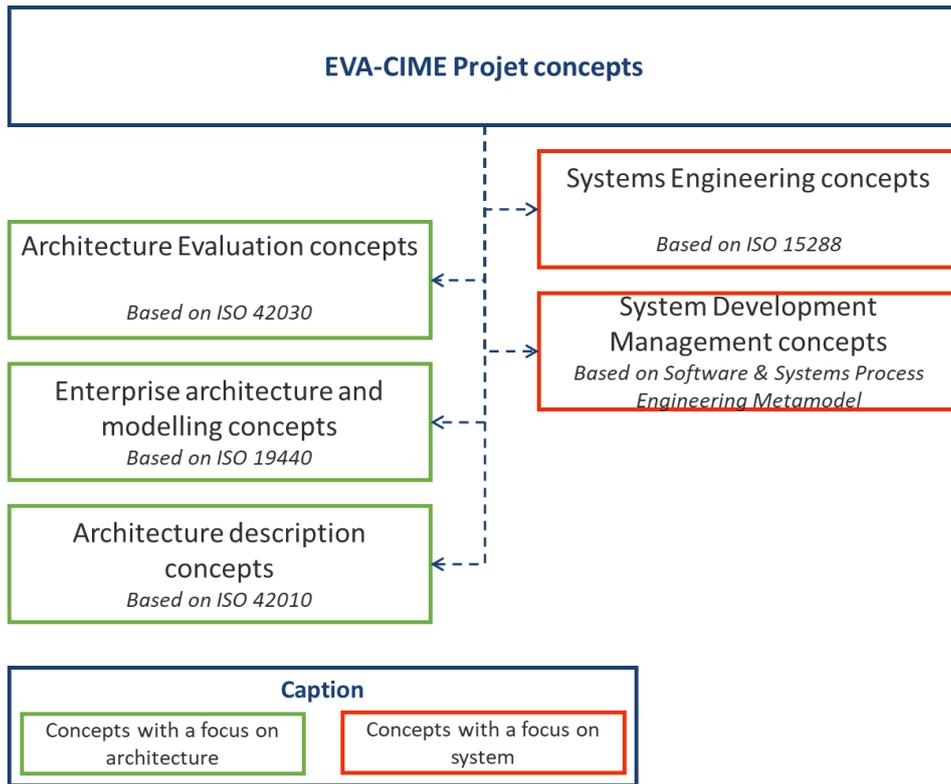


Figure 22. Principaux concepts d'EVA-CIME Projet

3e - III.1.A. Évaluation d'architecture (Architecture Evaluation)

Les concepts d'évaluation d'architecture intégrés dans EVA-CIME sont définis à partir de la norme (ISO, IEC, and IEEE 2019b). Les principaux concepts retenus ici relient les préoccupations aux critères d'évaluation, méthodes et approches à choisir pour sélectionner les réponses les plus satisfaisantes à ces préoccupations (Figure 23).

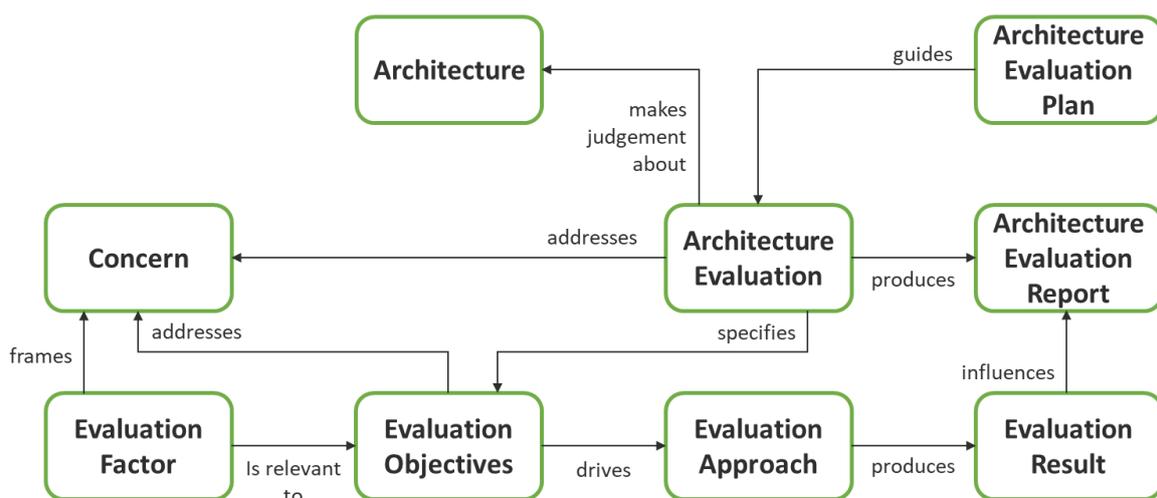


Figure 23. Modèle conceptuel d'évaluation d'architecture simplifiée (ISO, IEC, and IEEE 2019b)

3e - III.1.A.a. Préoccupation (Concern)

Une préoccupation matérialise l'intérêt d'une ou plusieurs partie(s) prenante(s) pour un système. Elle peut être de nature Variée, comme montré par les exemples suivants tirés des normes: l'accessibilité financière, l'alignement sur les objectifs et les stratégies de l'entreprise, l'impact sur l'entreprise, l'impact sur l'environnement, l'expérience client, l'avantage concurrentiel, le coût, l'évolutivité, la faisabilité, la flexibilité, la fonctionnalité, l'interopérabilité, la dégradation progressive, l'agilité, l'autonomie, la disponibilité, le comportement, la capacité, la complexité, la conformité à la réglementation, la modifiabilité, la modularité, l'ouverture, la performance, la maintenabilité, la confidentialité, la qualité de service, la fiabilité, la résilience, l'accessibilité des données, le traitement des erreurs et des exceptions, l'assurance de l'information, la communication interprocessus, les limitations connues, l'utilisation abusive, l'impact sur la mission, l'utilisation des ressources, le calendrier, la sécurité, les lacunes, les transitions d'état à travers le cycle de vie, l'évolutivité, l'assurance des logiciels et des systèmes (ISO/IEC/IEEE 15026-1 2019), la structure, l'intégration des sous-systèmes, les caractéristiques du système, les propriétés du système, la finalité du système, utilisabilité, usage, viabilité...

3e - III.1.A.b. Facteur d'évaluation d'architecture (Evaluation Factor)

Les facteurs d'évaluation d'architecture sont établis sur la base des préoccupations des parties prenantes. Les facteurs d'évaluation sont associés à un ou plusieurs objectifs d'évaluation. Ils peuvent représenter des propriétés non fonctionnelles du système qui sont dûment attendues par les parties prenantes. Des exemples de facteurs d'évaluation sont : le coût, le calendrier, la performance, ou encore le risque. Les facteurs d'évaluation sont semblables aux attributs de qualité dans l'Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM) (Kazman, Klein, and Clements 2000; Barbacci et al. 2003) et aux caractéristiques de qualité dans la série de normes ISO 25000 ("The ISO/IEC 25000 Series of Standards" 2022) sur les exigences de qualité et l'évaluation des systèmes et des logiciels.

De façon plus générale, un facteur « *est une circonstance, fait ou influence qui contribue à un résultat ou à une issue* » (ISO, IEC, and IEEE 2019b). Un facteur est donc quelque chose qui contribue de manière causale à un résultat. L'identification des facteurs peut parfois être motivée par la connaissance des effets souhaités. Les facteurs doivent être cohérents

avec les principes architecturaux qui ont façonné l'architecture, et, à l'inverse, ces principes doivent influencer la sélection des facteurs à utiliser dans l'évaluation.

3e - III.1.A.c. Objectif d'évaluation d'architecture (Evaluation Objective)

Un objectif d'évaluation d'architecture est créé pour répondre à une ou plusieurs préoccupations d'une ou plusieurs parties prenantes et oriente l'effort d'évaluation d'architecture. « Déterminer les coûts d'exploitation d'un procédé de traitement » est un exemple d'objectif d'évaluation d'architecture

3e - III.1.A.d. Plan d'évaluation d'architecture (Evaluation Plan)

Un plan d'évaluation d'architecture fournit le contexte détaillé de l'évaluation, décrit le périmètre de l'évaluation de l'architecture ainsi que les objectifs d'évaluation. Il contient les éléments définissant l'évaluation d'architecture sur le projet, à savoir :

- Les architectures qui vont être évaluées ;
- Les descriptions d'architecture à utiliser ;
- Les préoccupations des parties prenantes qui seront adressées ;
- Les approches d'évaluation qui seront employés ;
- Etc.

3e - III.1.A.e. Rapport d'évaluation d'architecture (Evaluation Report)

Un rapport d'évaluation d'architecture réunit les conditions, hypothèses, approches et méthodes suivies pour atteindre les objectifs d'évaluation ainsi que les résultats des évaluations. Le rapport fournit des informations et des recommandations pour aider à la prise de décision et indique aussi des remarques et des recommandations pour aider à mener de telles évaluations dans des situations comparables futures.

3e - III.1.A.f. Approche d'évaluation d'architecture (Evaluation Approach)

La mise en œuvre de l'évaluation d'architecture suppose de choisir des approches d'évaluation. Ces approches d'évaluation peuvent être développées et intégrées de façon spécifique et personnalisée pour répondre à différents types d'objectifs d'évaluation. Il est également envisageable d'utiliser des approches déjà existantes et compatibles avec les concepts de la norme (ISO, IEC, and IEEE 2019b). On peut citer comme approches la revue de

conception, la démonstration de prototype, l'expérimentation de système, la modélisation et simulation, l'analyse technique, l'audit de conformité, la revue de concept, l'interview d'utilisateurs. Nous pouvons aussi détailler d'autres approches comme suit :

- **L'analyse des alternatives (AoA)** (Office of Aerospace Studies 2016) est une approche requise par les marchés publics aux États-Unis. La documentation associée à cette méthode se trouve dans le manuel d'analyse des alternatives (AoA) de l'Office of Aerospace Studies. Les études AoA garantissent qu'au moins 3 alternatives réalisables ont été étudiées avant de prendre une décision d'achat. Cette approche établit et compare les mesures de coût, de calendrier, de performance (CSP) et de risques (CSPR) en fonction des "besoins" militaires identifiés. L'objectif principal de l'AoA est d'identifier une "solution" qui répondra aux exigences énoncées de manière aussi optimale que possible en ce qui concerne les contraintes de coût et de calendrier, établies avec le risque le plus faible possible.
- **Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM)** (Kazman, Klein, and Clements 2000; Barbacci et al. 2003) est un cadre pour les compromis d'architecture et de conception de logiciels. Il est possible d'utiliser l'ATAM pour évaluer l'architecture des systèmes par rapport aux objectifs commerciaux et de qualité, mais également pour analyser la façon dont ces objectifs se compensent les uns les autres. L'objectif d'ATAM est d'évaluer les architectures en matière d'attributs de qualité. Les points de sensibilité et les points de compromis sont formalisés par les évaluations ATAM qui exposent les risques architecturaux susceptibles d'empêcher la réalisation des objectifs commerciaux d'une organisation. Ces évaluations peuvent être exécutées à différentes étapes du cycle de vie de l'architecture et du système d'intérêt qu'elle cible.
- **The Quality Assessment of Software-Intensive System Architectures (QUASAR)** (Firesmith 2006). La méthode QUASAR (Quality Assessment of Software-Intensive System Architectures) a été mise au point lors de l'évaluation des architectures des principaux sous-systèmes du système de systèmes de l'avion F-35 Joint Strike Fighter du ministère américain de la défense. La méthode QUASAR est utilisée pour évaluer la qualité de l'architecture des systèmes et de leurs sous-systèmes.

3e - III.1.B. Tiers d'évaluation d'architecture (Evaluation Tiers)

Dans la norme (ISO, IEC, and IEEE 2019b) l'évaluation d'architecture est décrite suivant trois tiers qui sont illustrés Figure 24 :

- Le tiers « synthèse de l'évaluation » (Evaluation Synthesis Tiers) combine plusieurs appréciations de la valeur pour fournir les résultats ;
- Le « tiers d'appréciation de la valeur » (Value Assessment Tiers) permet de déterminer la valeur qu'aura l'architecture pour les parties prenantes où la valeur reflète une description de la couverture des attentes vis-à-vis du système dont l'architecture est évaluée ;
- Le « tiers d'analyse architecturale » (Architectural Analysis Tiers) examine les propriétés et attributs de l'architecture (découlant des choix de conception opérés au fur et à mesure du cycle de développement du système à produire).

En résumé, les tiers reflètent une progression de l'abstrait (synthèse) vers le concret (analyse) de l'évaluation du système. Plus le développement du système à produire progresse en termes de détails et de maturité, plus l'évaluation du système et de ces valeurs est précise. Or, ce sont les premières décisions qui, prises dans un contexte d'incertitude élevée, sont les plus déterminantes sur les valeurs finales du système produit.

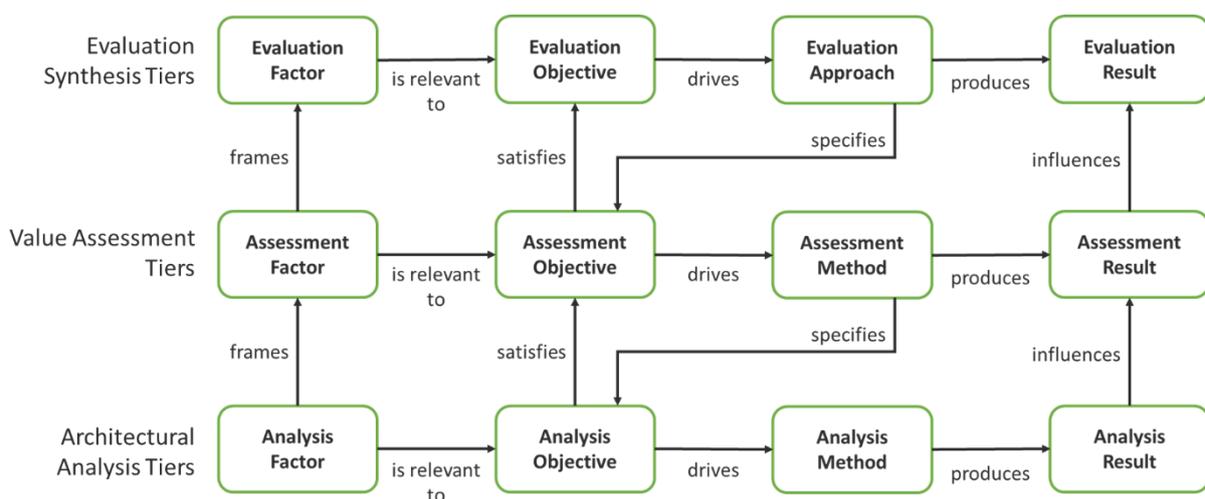


Figure 24. Modèle conceptuel simplifié des tiers d'évaluation d'architecture (d'après (ISO, IEC, and IEEE 2019b))

3e - III.1.C. Description d'architecture (Architecture Description)

Les concepts de description d'architecture permettent de lier l'ingénierie du système avec l'évaluation de son architecture.

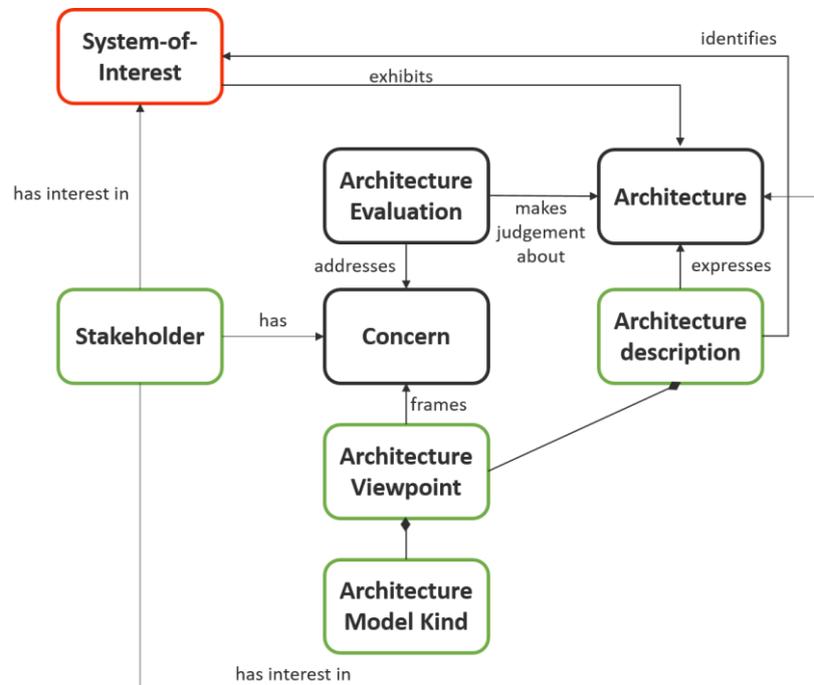


Figure 25. Modèle conceptuel simplifié liant le système, la description de son architecture et l'évaluation d'architecture

De plus, les concepts apportés par la norme (ISO, IEC, and IEEE 2011) permettent d'associer des points de vue d'architecture et des types de modèles aux concepts d'évaluation d'architecture (Figure 26).

Pour préparer, exploiter et capitaliser les efforts d'évaluation de l'architecture dans le contexte d'une unité organisationnelle qu'est un projet, des concepts de la norme (ISO 2020) sont nécessaires, tels que les concepts de processus métier, d'unité organisationnelle, de rôle, etc. Ces concepts sont également introduits dans la spécification Software & System Engineering Process Meta-Model (SPEM) (Object Management Group (OMG) 2008b) de l'OMG (Object Management Group (OMG) 2008). Ces concepts formalisent à la base les concepts de processus, de tâches, d'activités, d'unité d'organisation, ou encore d'enchaînement d'activités. Ce choix de SPEM facilite en particulier et rend possible la modélisation des activités de définition de l'architecture telles qu'elles ont été définies dans la norme (ISO/IEC/IEEE 15288 2015), des activités de développement de l'architecture

pareillement définies dans la norme (ISO, IEC, and IEEE 2011) et une unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture (Figure 27).

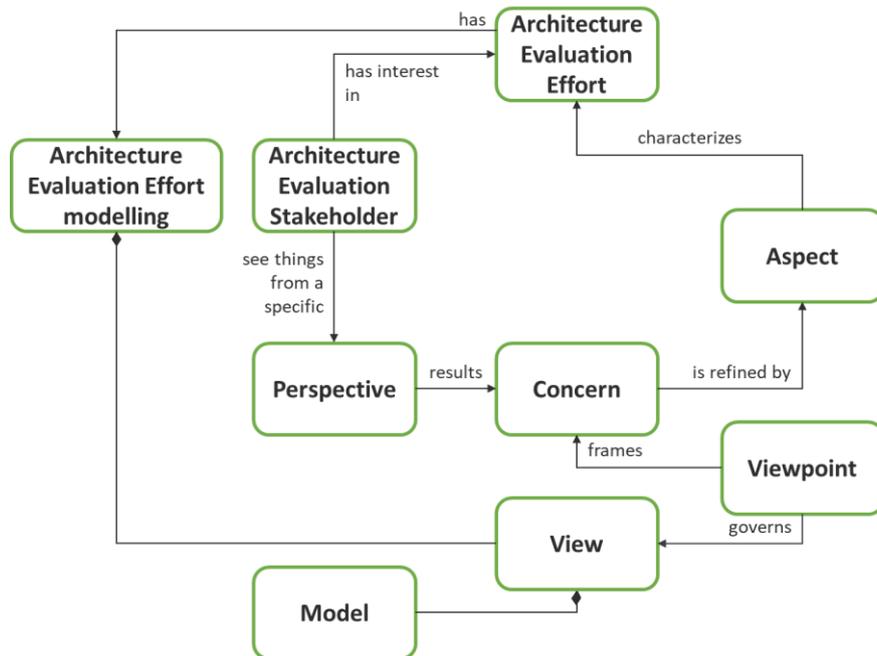


Figure 26. Modèle conceptuel simplifié liant l'évaluation d'architecture et la description d'architecture

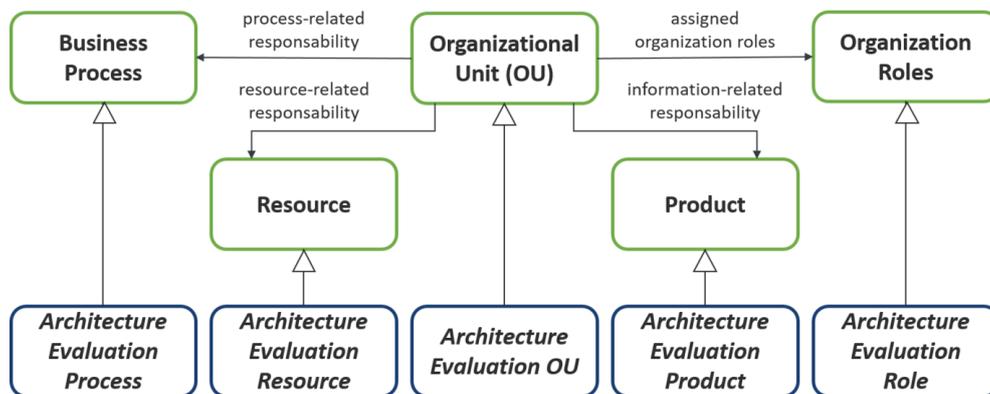


Figure 27: Modèle conceptuel simplifié reliant l'évaluation de l'architecture et les concepts d'architecture d'entreprise

3e - III.2 Cadre de description et langages de modélisation en support à EVA-CIME Projet

Pour guider et harmoniser les descriptions des efforts d'évaluation au niveau de chaque projet, un cadre de description (« conventions, principes et pratiques pour la

description des architectures établies dans un domaine d'application spécifique et/ou une communauté de parties prenantes » (ISO, IEC, and IEEE 2011)) est fourni en support à la méthode EVA-CIME. Le choix a été fait d'élaborer ce cadre de façon conforme aux prescriptions de la norme (ISO, IEC, and IEEE 2011).

3e - III.2.A. Couverture du cadre de description de l'EA

Inspirés par différents cadres d'architecture existants (Zachman 2003; Group 2019; Keller 2012; Architecture Capability Team 2020) et sur la base des concepts généraux présentés, il a été choisi de considérer deux axes.

Le premier axe regroupe les interrogations de base :

- Les **motivations** (WHY ?) : Quelles sont les raisons d'effectuer les évaluations d'architecture et à quels desseins ?
- Les **missions** (WHAT ?) : Que faut-il mettre en œuvre pour atteindre les objectifs, c'est-à-dire les services à fournir ?
- Les **processus** (HOW ?) : Comment mener les efforts d'évaluation d'architecture, quelles sont les activités, les éléments entrants et sortants, les ressources nécessaires et les contrôles pour mener à bien les efforts d'évaluation d'architecture ?
- Le **réseau opérant** (WHO ?) : Avec quoi/qui réaliser l'évaluation d'architecture, quelles sont les différentes entités réalisant les activités (unité d'organisation, acteur humain ou solution technologique) ?
- Le **calendrier** (WHEN ?) : Quand réaliser les activités d'évaluation d'architecture, quelle est l'enchaînement souhaité des activités, leur durée, leur utilisation dans le temps, et les différents scénarios ?

Le deuxième axe concerne les étapes de l'évaluation d'architecture et se recoupe avec ceux définis dans la démarche opératoire :

- L'étape de **préparation (PREP)** décrit l'évaluation d'architecture telle que l'on voudrait la mettre en place ;
- L'étape d'**exécution (EXE)** décrit l'évaluation d'architecture telle qu'elle est mise en place et son évolution ;

- L'étape de **clôture (FIN)** décrit les leçons apprises et ce qu'il est jugé intéressant d'intégrer dans le Référentiel d'Expertises et de Connaissances (REC) sous différentes formes.

L'intersection entre ces deux axes exprime l'architecture du système en charge de l'évaluation d'architecture d'une certaine perspective (vue). Chacune de ces expressions est régie par des conventions pour leur construction, interprétation et utilisation (point de vue).

Ainsi, EVA-CIME Projet repose sur le cadre schématisé Figure 28 constitué de 15 points de vue, chacun régissant une intersection des deux axes présentés précédemment. Afin de pouvoir représenter les points de vue facilement, nous utiliserons la convention de nommage VP-X-Y, avec :

X = {WHY ; WHAT ; HOW ; WHO ; WHEN}

Y = {PREP ; EXE ; FIN}

Ainsi, pour le point de vue « quels sont les processus en exécution ? », l'identifiant associé sera VP-HOW-EXE.

Ce cadre est donc utilisé à proprement parler dès qu'EVA-CIME est mise en œuvre sur un projet, et ce, indépendamment d'autres projets dans lesquels cette instanciation aura aussi lieu de manière spécifique.

Étapes / Interrogations	Motivation (WHY ?)	Mission (WHAT ?)	Processus (HOW ?)	Réseau opérant (WHO ?)	Planning (WHEN ?)
Préparation (PREP)	Point de vue...	...	...	...	...
Exécution (EXE)	...	...	...	...	...
Clôture (FIN)	...	...	...	...	...

Figure 28. Cadre de description en support à EVA-CIME Projet

La méthode EVA-CIME oriente les acteurs de l'évaluation d'architecture vers l'échange d'informations par le biais de modèles. Au travers d'EVA-CIME Projet, la construction de

modèles via l'utilisation du cadre de description EVA-CIME Projet est poussée pour faciliter la traçabilité des informations. Chaque cellule du cadre EVA-CIME définit un point de vue. Chacun des points de vue compose les types de modèles couvrant des préoccupations propres à chacune des parties prenantes de l'évaluation d'architecture et l'ensemble gouverne les descriptions d'efforts d'évaluation d'architecture.

3e - III.2.B. Les parties prenantes considérées dans le cadre de description

Les parties prenantes de l'évaluation d'architecture i.e. d'unités d'organisation dans l'entreprise ou de personnes identifiées, doivent être prises en compte lors de la description de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture :

- La direction de projet du système : s'assure du respect des directives de l'entreprise.
- La chefferie de projet du système (chef de projet et architecte) : s'assure que toute décision de conception est soutenue par un effort d'évaluation ;
- L'équipe d'ingénierie du système : exploite les parties des résultats de l'évaluation d'architecture, mais elle est également en charge de développer la connaissance sur l'architecture et ses propriétés ;
- Les praticiens de l'évaluation d'architecture : réalisent les différentes évaluations et sont impliqués dans l'analyse des résultats de l'évaluation d'architecture et ses impacts sur le système ;
- Le manager/responsable de l'évaluation d'architecture : réalise le suivi, l'évaluation et le contrôle des activités d'évaluation pour assurer que les objectifs d'évaluation sont bien remplis avec les ressources fournies. Ils sont garants du coût, délai, qualité des évaluations d'architecture et du respect des directives ;
- Le support à l'évaluation d'architecture : supporte les activités d'architecture de la manière appropriée (ressources humaines, financières, système d'information, expertises techniques, etc.) ;
- L'équipe de gestion des référentiels d'expertises et de connaissances (REC) : capitalise tout ou partie de modèles validés et éprouvés ;

- Les autres parties prenantes du système dont le client : ont un intérêt dans la solution qui est conçue ;
- Les organismes en charge de la réglementation et la qualification, voire de la certification, de tout ou partie de la solution : ont un intérêt dans les justifications fournies par l'évaluation d'architecture sur les choix qui ont été faits et la traçabilité entre les éléments d'évaluation et de justification qui font foi ;

3e - III.2.C. Les points de vue du cadre de description

À chaque point de vue est associé un ou plusieurs types de modèle (i.e. d'une représentation conforme à un langage). Une association possible est présentée Tableau 6 et c'est celle utilisée dans la suite de ce chapitre.

Tableau 6. Points de vue et exemples de types de modèles utilisés en support d'EVA-CIME projet

Étape/Question	Motivation	Mission	Processus	Réseau opérant	Planning
Préparation	Business Motivation Model diagram (Object Management Group (OMG) 2015)		Software & Systems Engineering Process diagram(Object Management Group (OMG) 2008b)		Business Process Motivation Notation diagram(Object Management Group (OMG) 2012) et Software & Systems Engineering Process diagram (Object Management Group (OMG) 2008b)
Exécution					
Clôture					

3e - III.3 Démarche opératoire d'EVA-CIME Projet

Les concepts et langages sont, comme illustrés Figure 21, manipulés durant la démarche opératoire afin de préparer, exécuter et clôturer une Évaluation d'Architecture. Les parties prenantes impliquées dans une ou plusieurs de ces trois étapes participent à un ou plusieurs des trois rôles principaux, qui sont :

- Le rôle de **manager d'EA** est de gérer toutes les activités qui permettent l'opérationnalisation de l'évaluation de l'architecture sur un projet ; le gestionnaire d'EA élabore le plan d'EA et assure la cohérence de toutes les actions d'EA tout au long de la vie du projet ;
- Le rôle de **praticien d'EA** est de réaliser l'activité principale de l'évaluation d'architecture ; le praticien de l'évaluation d'architecture réalise toutes les tâches d'analyse de système nécessaires tout au long du projet ;
- Le rôle de **support d'EA** est de mettre en place les activités nécessaires pour que le pilotage et l'exécution des activités d'EA se déroulent dans les meilleures conditions possibles : fournir les ressources humaines, matérielles, financières et techniques.

Pour simplifier la manipulation et la répartition des tâches de modélisation, il est possible de spécifier des types de modèles adaptés selon les trois rôles. Cette spécification permet d'associer des types de modèles différents en fonction des rôles amenés à manipuler la description selon un point de vue.

Ce travail d'association de types de modèles aux rôles qui seront amenés à les manipuler doit être réalisé pour chacun des points de vue et s'accompagner d'une définition des droits sur ces types de modèles (e.g., modification, lecture, commentaires, etc.). Ces types de modèles doivent permettre de manipuler les concepts et données fixés dans EVA-CIME Projet ou être accompagnés d'un mécanisme de transformation vers les concepts d'EVA-CIME Projet. Le Tableau 7 est un exemple de tableau qui peut être réalisé pour personnaliser l'association de types de modèles.

Tableau 7. Exemple de personnalisation de VP-WHO-PRE du cadre en support d'EVA-CIME Projet

Identifiant du point de vue	Type de modèle	Rôle	Droit d'accès	Utilisation des concepts d'EVA-CIME Projet
VP-WHO-PRE	Arborescence de définition de rôle	Manager d'EA	Modification	Oui
		Praticien d'EA	Commentaire	
	Fiches de poste	Manager d'EA	Modification	Non
		Support d'EA	Lecture	
	Modèles d'architecture nécessaire	Support d'EA	Commentaire	Partiel
		Praticien d'EA	Modification	

	Plan de mobilisation des ressources humaines	Manager d'EA	Modification	Non
	Fiches de ressources nécessaires	Manager d'EA	Modification	Partiel
		Praticien d'EA	Modification	
		Support d'EA	Commentaire	

La démarche opératoire d'EVA-CIME Projet se structure autour de processus et est modélisée sous la forme d'un diagramme BPMN (Object Management Group (OMG) 2012) dans la Figure 29.

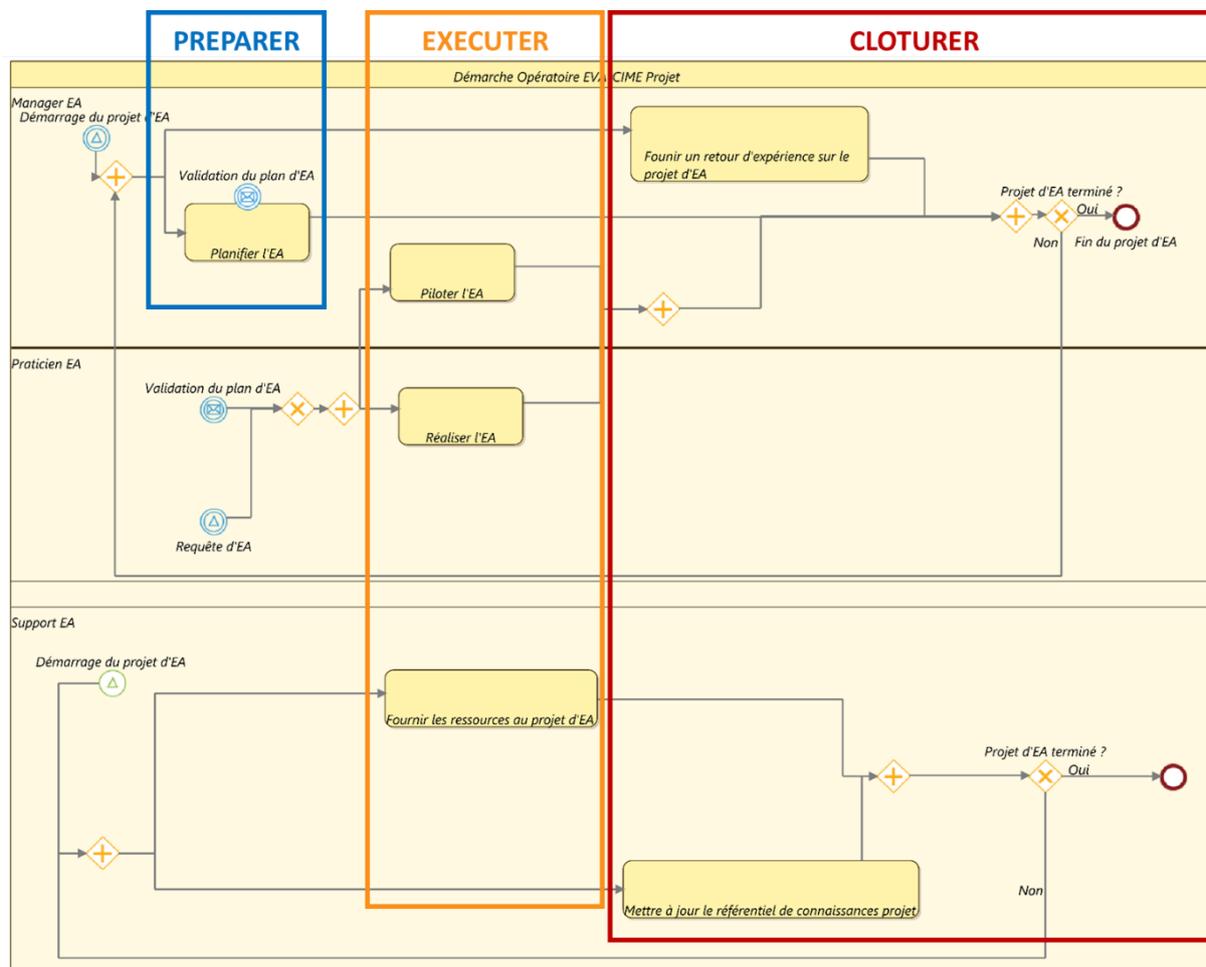


Figure 29. Démarche opératoire haut niveau d'EVA-CIME Projet

Chacune de ces étapes a des objectifs propres. Lors de l'étape de préparation, l'évaluation d'architecture est planifiée et décrite au travers notamment d'un plan d'évaluation d'architecture. S'ensuit l'étape d'exécution où l'évaluation d'architecture est exécutée telle qu'elle a été définie dans le plan. Le pilotage s'assure de la conformité de l'évaluation d'architecture avec ce plan. De même, le pilotage va analyser les impacts des

changements qui surviennent au cours du projet sur l'architecture et ses performances, et faire des recommandations sur les gains nécessaires de performance ou sur les valeurs à privilégier à la suite de ces changements. Enfin, l'étape de clôture décrit les leçons apprises et ce qu'il est jugé intéressant d'intégrer dans le REC pour les évaluations futures.

La méthode EVA-CIME Projet peut être mise en œuvre à toute phase⁵ du cycle de développement d'un projet d'INB comme illustré dans la Figure 30.

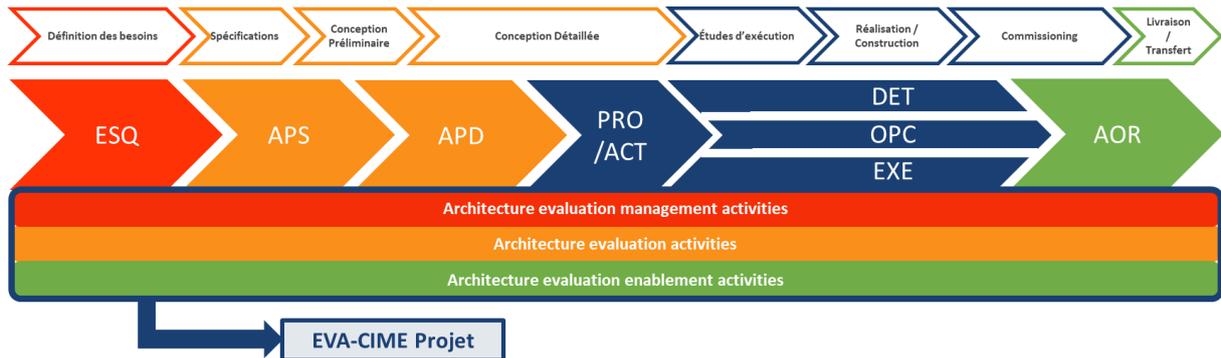


Figure 30. EVA-CIME Projet dans le cycle de vie d'une INB

Cela implique que la démarche opératoire EVA-CIME Projet interagisse avec les processus d'Ingénierie Système qui sont déployés pendant le projet. Cette interaction est illustrée par le diagramme BPMN Figure 31. Les échanges d'informations entre ces processus sont illustrés en Annexe B.

⁵ ESQ : Esquisse, APS ; Avant-Projet Sommaire, APD : Avant-Projet Définitif, PRO/ACT : PROjet/Assistance pour la passation des Contrats de Travaux, DET : Direction de l'Exécution du ou des contrats de Travaux, EXE : EXécution, OPC : Ordonnancement, coordination et Pilotage du Chantier, AOR : Assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des Opérations de Réception

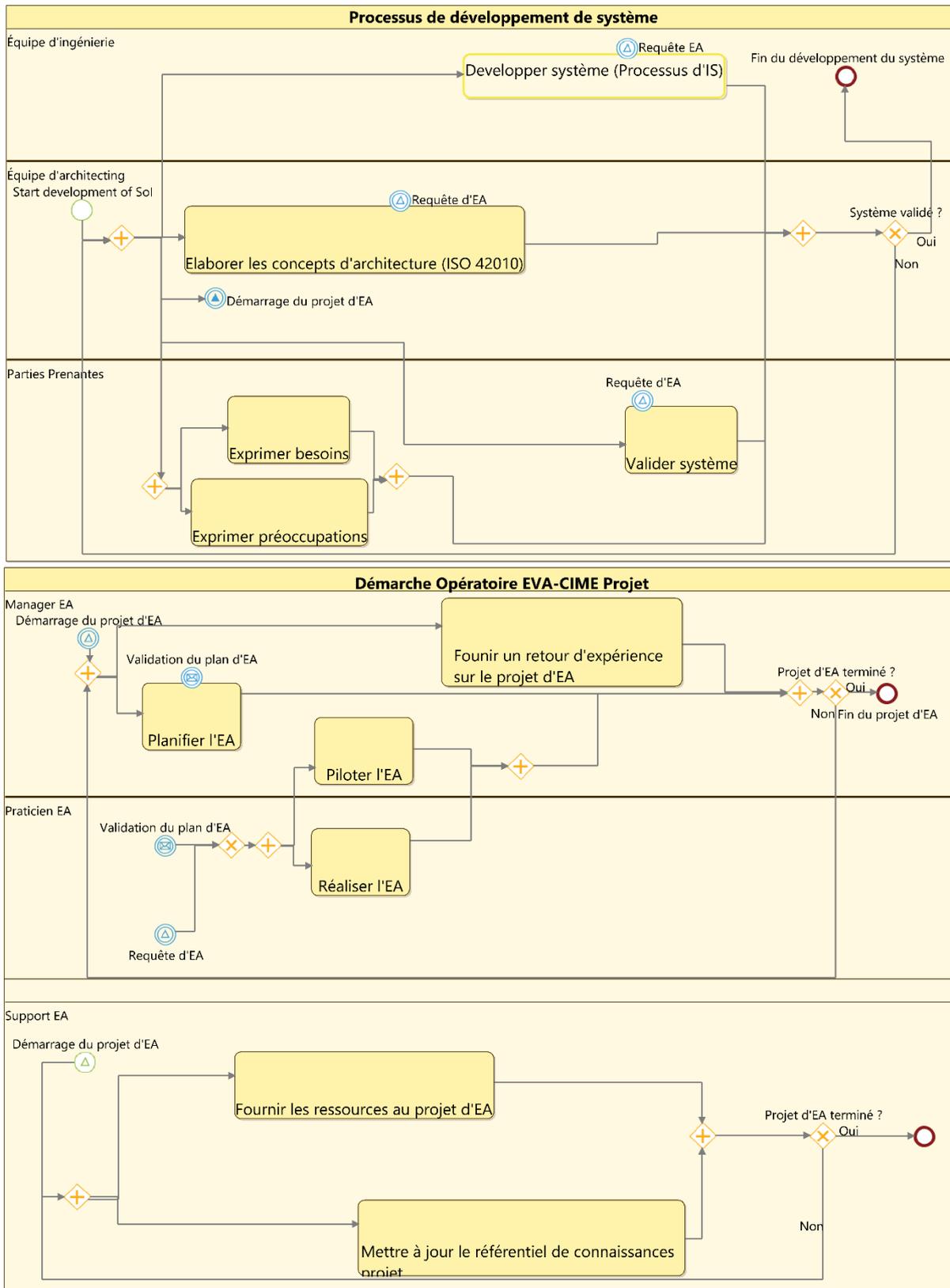
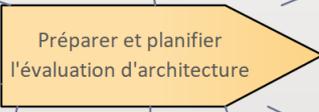
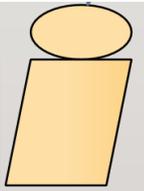
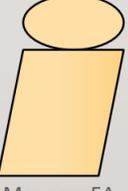
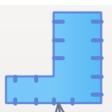
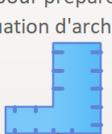


Figure 31. Interaction entre les processus de développement et la démarche opératoire EVA-CIME Projet

3e - III.3.A. Concepts utilisés pour la modélisation de la démarche opératoire

Pour modéliser la démarche opératoire associée à la méthode EVA-CIME et sa déclinaison en contexte projet, les diagrammes utilisés et mis en avant dans EVA-CIME sont liés à la norme de modélisation d'entreprise et de projets, SPEM, ici dans le but de définir une activité, ses entrants, ses sortants, ses exécutants et ses guides. BPMN (Object Management Group (OMG) 2012) ou SADT (Marca and McGowan 1987) sont des langages qui auraient également pu être utilisés, néanmoins SADT n'est pas intégré dans les langages d'EVA-CIME et BPMN est peu pertinent pour décrire une activité seule. Une description de ces concepts, leur représentation concrète et un exemple associé sont synthétisés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Concepts de modélisation et exemples utilisés pour décrire la démarche opératoire EVA-CIME Projet

CONCEPTS SPEM	REPRESENTATION GRAPHIQUE	UTILISATION	EXEMPLE
WorkProductDefinition		Définition des entrants et sortant d'une activité	 Besoins en évaluation
TaskDefinition		Définition d'une activité	 Préparer et planifier l'évaluation d'architecture
RoleDefinition		Définition d'un rôle	 Manager EA
Guidance		Définition des guides	Checklist pour préparer et planifier l'évaluation d'architecture 
Action		Définir une action associée à une activité	 Décrire la vue VP-OPE-WHY-PREP

3e - III.3.B. L'étape de préparation de l'évaluation d'architecture sur un projet

3e - III.3.B.a. Introduction

L'objectif de l'étape de préparation est de spécifier l'évaluation d'architecture. Cette spécification s'adresse autant aux trois types d'activités que sont la gestion, la réalisation et

le support de l'évaluation d'architecture. L'activité de préparation et de planification de l'évaluation d'architecture prend principalement en entrée les préoccupations des parties prenantes du système et les exigences formulées par les acteurs du projet vis-à-vis de l'évaluation d'architecture. Un plan d'évaluation d'architecture est attendu en livrable de cette activité. Ce plan participe à la mise en place et pilotage d'une unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture. De plus, des besoins en support peuvent de manière optionnelle être des extrants de cette activité. Les trois rôles définis plus haut sont impliqués dans la réalisation de cette activité. Néanmoins, le rôle prépondérant est celui de manager d'EA qui est alors assisté des rôles de praticien de l'AE apportant des connaissances sur les techniques d'évaluation et de support à l'EA fournissant matériel, logiciel ou ressources humaines (e.g. un modeleur). Ces différents éléments définissant l'activité de préparation et planification sont synthétisés et illustrés Figure 32.

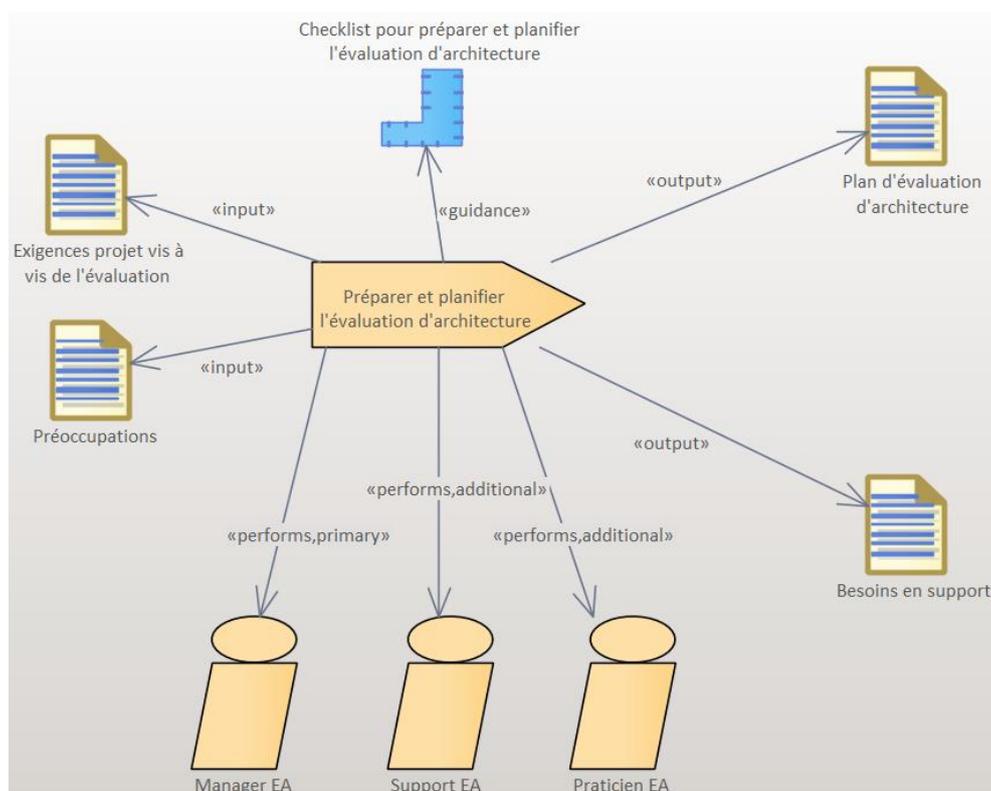


Figure 32. Définition de l'activité de préparation et planification de l'évaluation d'architecture

L'une des tâches majeures lors de la préparation et planification de l'évaluation d'architecture est de définir cette évaluation d'architecture à partir des préoccupations des parties prenantes et des contraintes organisationnelles, temporelles et financières du projet. Décrire l'Unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture est une bonne

approche pour couvrir les différents attendus d'un plan d'évaluation d'architecture qui sont fournis dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b; ISO/IEC/IEEE 15289:2019 2019).

Pour définir l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture sur le projet, il est nécessaire de se concentrer et d'enrichir les concepts présentés Figure 22. Les concepts apportés par (Object Management Group (OMG) 2015) permettent d'étayer le méta-modèle (Annexe A) et gagner en détail sur la description de ladite unité d'organisation. Le déroulement des activités de description n'est en aucun cas séquentiel. Elles s'étayent les unes les autres et sont complétées au fur et à mesure que la réflexion s'affine sur ce que sera l'évaluation d'architecture. Néanmoins, lors de la première itération, il est recommandé de suivre le séquençement proposé Figure 33.

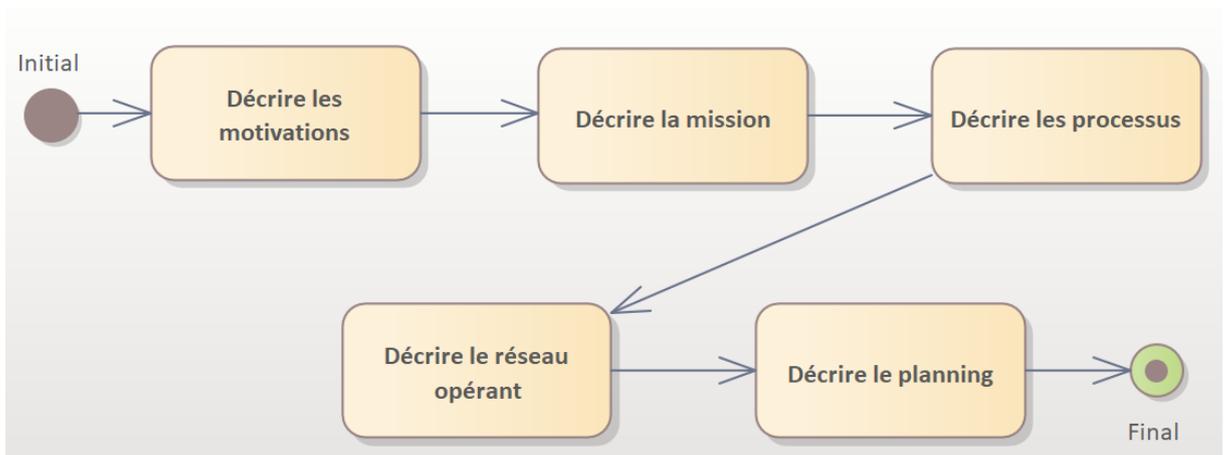


Figure 33. Proposition de séquençement pour la description initiale de l'évaluation d'architecture

3e - III.3.B.b. Décrire le pourquoi de l'unité d'organisation dans VP-WHY-PREP

Le « **pourquoi** » décrit les motivations qui conduisent à mettre en place une unité d'organisation. Les concepts fondamentaux pour décrire des motivations pour une action d'évaluation d'architecture sont illustrés Figure 34.

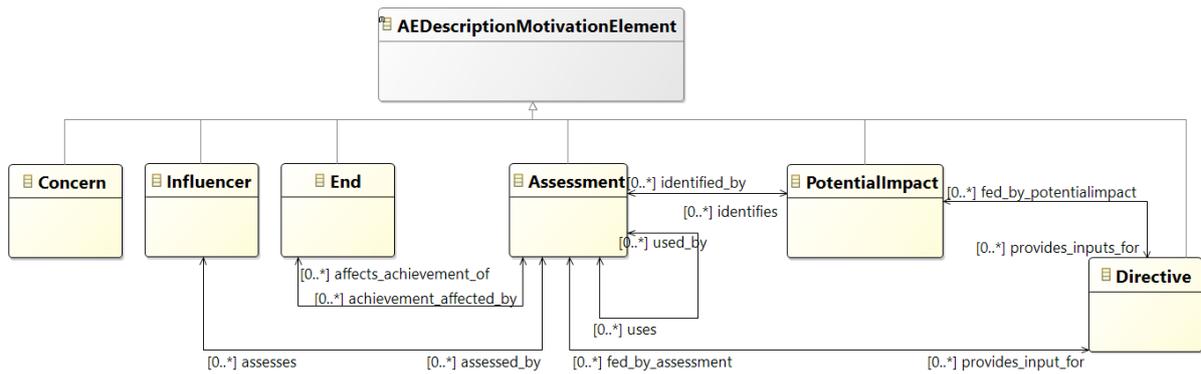


Figure 34. Modèle conceptuel simplifié pour décrire les motivations de l'évaluation d'architecture

Un élément de motivation de description d'architecture (*AEDescriptionMotivationElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire les motivations de mise en place de l'évaluation d'architecture.

Ces concepts sont mis en relation dans la Figure 35 avec les concepts d'évaluation d'architecture promulgués dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

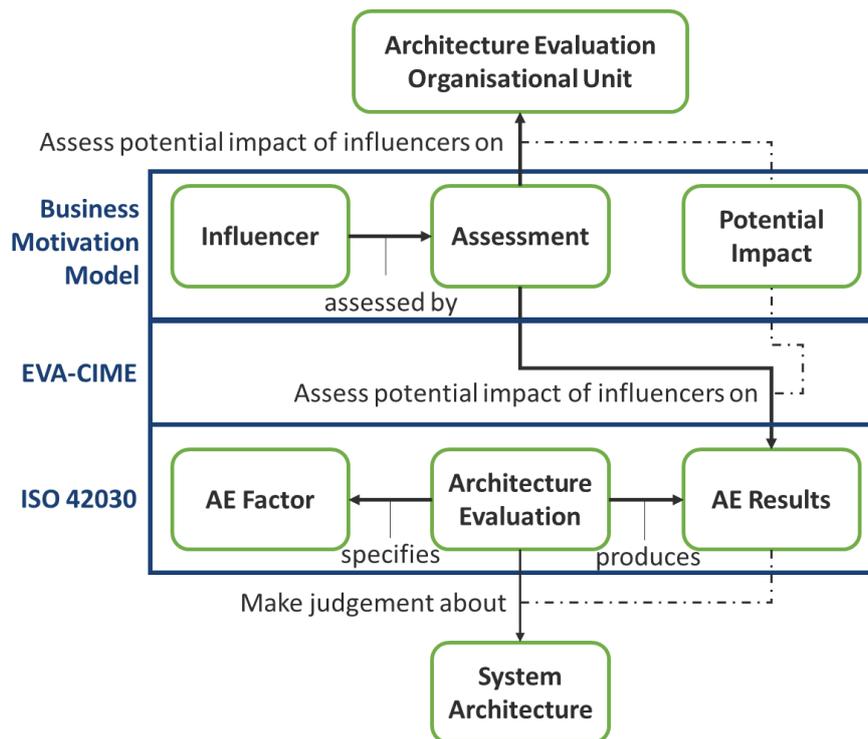


Figure 35. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Business Motivation Model

La synthèse des concepts jugés fondamentaux et leur définition pour la dimension motivation est présentée dans le Tableau 9.

Tableau 9. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire les motivations de l'évaluation d'architecture

Concepts	Définitions	Exemples
Fin – End	Une fin (<i>End</i>) est un résultat ou une vision que l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture souhaite atteindre.	Valider que l'architecture adresse les préoccupations des parties prenantes
Influenceur - Influencer	Un influenceur (<i>Influencer</i>) peut être tout ce qui peut "produire un effet sans l'exercice apparent d'une force tangible ou l'exercice direct d'un commandement, et souvent sans effort ou intention délibérée". Les influenceurs ont un impact dans l'emploi des moyens (<i>Mean</i>) ou la réalisation des fins (<i>End</i>).	Autorité de sûreté nucléaire
Appréciation - Assessment	Une appréciation (<i>Assessment</i>) identifie les impacts potentiels (<i>PotentialImpact</i>) sur le projet (projet d'évaluation d'architecture dans ce cas). Les effets du pouvoir, de la légitimité et de l'urgence (Itzel et al. 2018) sont des exemples d'appréciation. L'approche SWOT (Strength, Weakness, Opportunity, Threat) (Leigh 2009) peut aider à identifier les influenceurs et leurs impacts.	Menace : De nouvelles études de caractérisation de la quantité et de la typologie de déchets sont en cours
Impact potentiel - PotentialImpact	. Les impacts potentiels peuvent être bons ou mauvais pour l'organisation du projet. Un impact potentiel identifié (<i>identified_by</i>) par une appréciation peut fournir des entrées (<i>provide_inputs_for</i>) pour des directives (<i>Directive</i>).	Changement de la méthode pour mesurer la radioactivité.
Directive - Directive	Une directive (<i>Directive</i>) définit ou contraint les libertés de l'unité d'organisation et doit être énoncée sous forme déclarative. « 60% des données caractérisant les déchets doivent être fixées avant le lancement des études de conception détaillée » est un exemple de directive.	60% des données entrantes caractérisant les déchets doivent être fixées avant le lancement d'études de conception détaillée
Préoccupation - Concern	Une préoccupation (<i>Concern</i>) est tout ce qui est considéré comme d'intérêt ou important par les parties prenantes.	Adaptabilité du système à la quantité et à différentes typologies de déchets

Afin de guider les personnes en charge de réaliser la description des motivations de l'évaluation d'architecture, une liste de tâches à mener pour la description des motivations est fournie dans EVA-CIME et est associée à l'activité de préparation. Le Tableau 10 regroupe les différents éléments de cette liste ainsi que des exemples illustrant un résultat de la mise

en œuvre de l'élément. Cette liste a été élaborée en s'inspirant des activités promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

Tableau 10. Liste de tâches associée à l'activité de description des motivations pour l'évaluation d'architecture

Tâches de la liste	Exemple associé
Collecter auprès du projet les parties prenantes et préoccupations à considérer	Mise en place d'une réunion d'enclenchement aboutissant à : « L'exploitant à une préoccupation d'adaptabilité du système à la quantité et à différentes typologies de déchets ».
Identifier les influenceurs et apprécier leurs impacts potentiels	<p>On distingue deux types d'influenceurs.</p> <p>Les influenceurs qui ont un impact prétendu sur la capacité de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture à remplir sa mission. Ces influenceurs peuvent être des parties prenantes qui ont un impact sur la façon de travailler (autorité de sûreté qui change une méthode de mesure de la radioactivité, une nouvelle direction qui restructure le projet et remet en cause les moyens alloués à l'évaluation, un fournisseur d'outil qui ne peut plus assurer la continuité de service, etc). Ils peuvent également être des phénomènes extérieurs peu/pas prévisibles (pandémie bouleversant le fonctionnement de l'unité d'organisation, épisode météorologique empêchant la mise en œuvre d'une expérimentation à l'extérieur, etc.). Il faut apprécier les conséquences (impacts potentiels) sur la capacité de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation à remplir sa mission.</p> <p>Les influenceurs qui ont un impact sur les résultats de l'évaluation d'architecture. Il peut, alors, s'agir de parties prenantes qui changent leurs exigences rendant potentiellement les résultats d'une évaluation passée obsolète et nécessitant de mener à nouveau une évaluation sur l'architecture telle qu'elle a été décidée pour déterminer si elle continue de garantir les valeurs attendues du système (ici une INB). Il peut aussi s'agir de nouvelles informations issues d'études supplémentaires telles que la quantité de déchets à traiter qui n'est plus la même ou alors les typologies de déchets qui viennent à changer. Il y a aussi des influenceurs externes tels que les fournisseurs d'énergie, de matières premières, de composants qui, soit à cause de délais d'approvisionnement, soit par une hausse des prix bouleversent les estimations de coût ou de livraison de l'INB réalisée à partir de l'architecture présente.</p> <p>Tous ces influenceurs doivent être identifiés et leurs impacts potentiels aussi. Le processus de management de risque de (ISO/IEC/IEEE 15288 2015) peut être utilisé pour guider cette activité.</p>
Collecter auprès du projet les exigences projet associées à l'évaluation d'architecture	Lors de la réunion d'enclenchement, le chef de projet annonce souhaiter qu'une évaluation soit menée dès qu'un nouveau procédé est envisagé dans le système.

Définir les fins, le périmètre de l'effort d'évaluation d'architecture	Lors de la réunion d'enclenchement, il est décidé que l'évaluation d'architecture permettra de ne pas régresser sur la valeur d'adaptabilité du système, les études se concentreront sur les déchets de moyenne activité.
Identifier les réglementations ayant un impact potentiel (quand, quoi, et qui doit être impliqué) sur l'évaluation d'architecture	Lors de la réunion d'enclenchement aucune réglementation particulière n'est remarquée.
Identifier les directives et guides définis par l'entreprise devant être suivis	Un modèle de document propre à l'entreprise doit être utilisé pour les livrables issus de l'évaluation d'architecture.
Identifier les directives et guides définis par le projet qui doivent être suivis	Le projet souhaite que l'adaptabilité soit exprimée sous la forme d'un taux de couverture des différentes typologies de déchets et d'une plage de valeur exprimée en m ³ /jour.
Identifier les risques et opportunités associés à l'effort d'évaluation d'architecture	Un des risques identifiés est que les études sur les typologies et quantités de déchets qui seront dans le périmètre de traitement de l'installation sont encore en cours. L'inventaire des quantités et typologies de déchets n'est donc pas fixé.

3e - III.3.B.c. Décrire ce que fait l'unité d'organisation dans VP-WHAT-PREP

Quand une unité d'organisation met en œuvre l'évaluation d'architecture, il est nécessaire de savoir **quoi** faire, c'est-à-dire de décrire la mission, ce qui doit être fait et suivant quelle approche globale. Les concepts fondamentaux à la description de la mission sont illustrés dans la Figure 36.

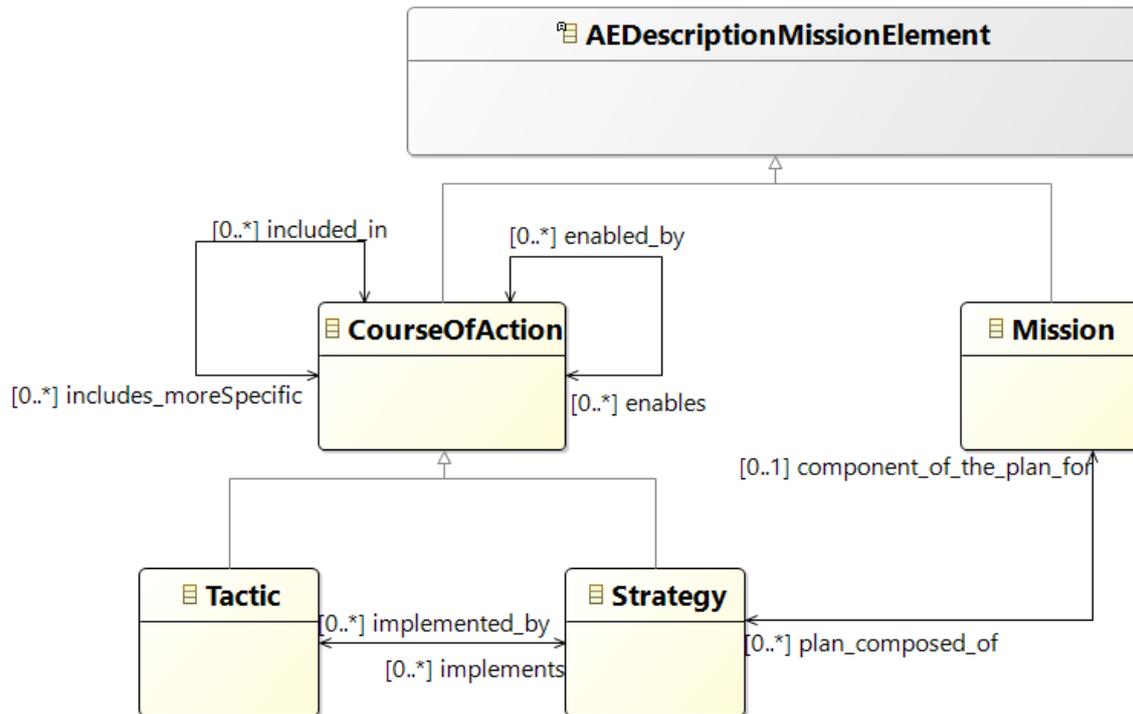


Figure 36. Modèle conceptuel simplifié pour décrire la mission l'évaluation selon la dimension Mission

Un élément de mission de description d'architecture (*AEDescriptionMissionElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire la mission de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture.

Ces concepts sont mis en relation dans la Figure 37 avec les concepts d'évaluation d'architecture promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

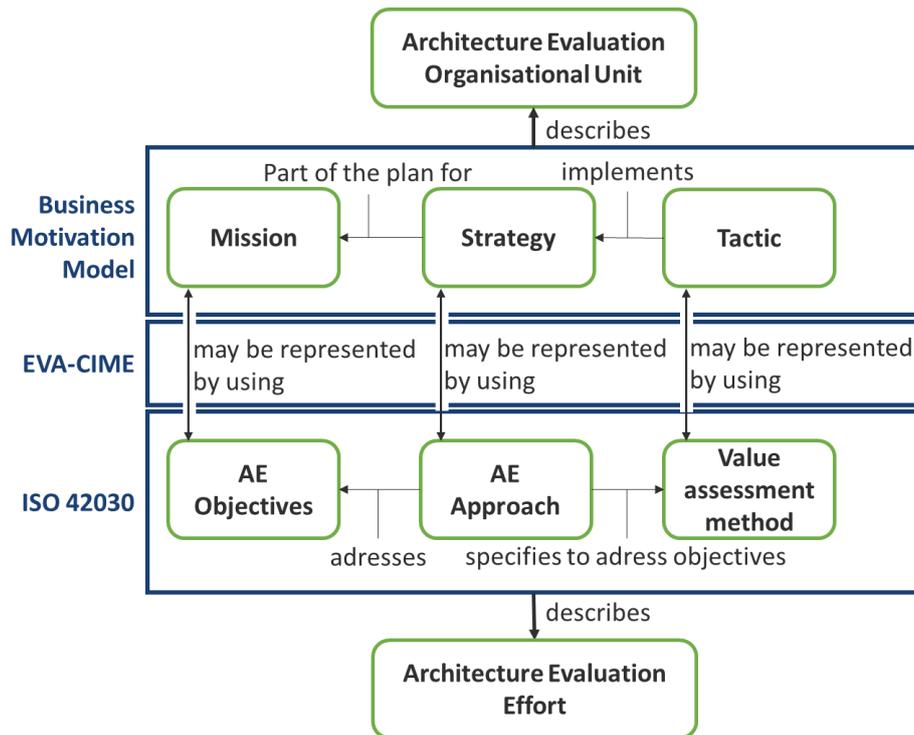


Figure 37. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Business Motivation Model

La synthèse des concepts jugés fondamentaux pour décrire la mission est présentée dans le Tableau 11.

Tableau 11. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour la dimension mission

CONCEPTS	DEFINITION	EXEMPLES
Mission	Une mission (<i>Mission</i>) indique ce que l'unité d'organisation a fait, fait ou fera.	Déterminer l'adaptabilité à la quantité et aux différentes typologies de déchets du système de réception
Strategy	Une stratégie (<i>Strategy</i>) est une des composantes du plan pour (<i>component_of_the_plan_for</i>) accomplir la mission. Les stratégies tendent à être long terme et avoir un large périmètre.	Approche d'évaluation basée sur la modélisation et la simulation
Tactic	Une tactique (<i>Tactic</i>) implémente (<i>implements</i>) une ou plusieurs stratégies. Elle se veut plus locale dans le temps et sur un périmètre plus restreint.	Simuler la réception sur site de différentes typologies de colis de déchets radioactifs

Afin de guider la personne devant réaliser la description de la mission de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture, le Tableau 12 regroupe des exemples de tâches à mener à bien pour la description de la mission, ainsi que des exemples illustrant

un résultat de la mise en œuvre de l'élément. Cette liste a été élaborée en s'inspirant des activités promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

Tableau 12. Liste de tâches associée à l'activité de description des missions pour l'évaluation d'architecture

TACHES DE LA LISTE	EXEMPLE ASSOCIE
Formuler les critères d'EA pour aider les décideurs à choisir parmi les architectures possibles	À partir des préoccupations des parties prenantes le critère choisi est l'adaptabilité du système à la quantité et aux différentes typologies de déchets.
Examiner les objectifs et les critères d'évaluation par rapport aux exigences et les valider en fonction des préoccupations des parties prenantes	
Définir la ou les missions de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture	L'unité d'organisation a pour mission de déterminer l'adaptabilité du système à la quantité et aux différentes typologies de déchets.
Définir une ou plusieurs approches d'évaluation cohérentes avec les règles de gestion des projets au sein de l'entreprise et les projets cohérents avec les fins et le périmètre.	L'approche d'évaluation qui a été choisie est basée sur une modélisation des flux de déchets au sein de l'installation et de réaliser une simulation sur la base de ces modèles.
Sélectionner l'approche à utiliser parmi celles définies	
Définir les objectifs et critères d'appréciation de la valeur qui contribue aux critères d'EA	Un flux de déchets peut être décomposé en 4 étapes majeures qui sont la réception, le traitement, le stockage et l'expédition. Les critères d'appréciation de la valeur reflètent ici cette décomposition à savoir : Adaptabilité de la réception aux différentes typologies de déchets. Adaptabilité de la réception à la quantité de déchets. Adaptabilité du traitement aux différentes typologies de déchets Etc. Les objectifs d'appréciation de la valeur qui en découlent seront de déterminer la valeur pour chacune de ces propriétés.
Définir les objectifs et critères d'analyse de l'architecture qui supportent les objectifs et critères d'appréciation de la valeur	Pour la propriété d'adaptabilité de la réception aux différentes typologies de déchets, on regarde quelles sont les typologies de déchets prises en charge par les systèmes de déchargement des véhicules, combien de temps il faut pour changer de système d'accroche (i.e. de configuration) si pertinent, quelles sont les typologies de déchets que gèrent les systèmes de transfert, quelles classes de déchets peut recevoir la cellule de réception, etc.

Déterminer la structure et les relations entre les critères et objectifs d'appréciation de la valeur et objectifs de l'analyse architecturale	Il s'agit ici de commencer à construire le modèle de décision comme présenté dans le chapitre 2, en se concentrant sur l'existence ou non de relations. Les paramètres d'intérêt correspondent aux critères d'analyse architecturale, les scores locaux correspondent aux critères d'appréciation de la valeur et la satisfaction globale aux critères d'évaluation d'architecture.
Déterminer les relations entre les critères d'évaluation de la valeur, les critères d'analyse architecturale et les éléments de valeur ou d'utilité.	Il s'agit ici de formaliser les relations permettant de remonter de l'analyse architecturale vers l'évaluation de l'architecture et de fournir les informations nécessaires à une prise de décision.

3e - III.3.B.d. Décrire comment procède l'unité d'organisation dans VP-HOW-PREP

Quand une unité d'organisation met en œuvre l'évaluation d'architecture, il est nécessaire de déterminer **comment** atteindre les objectifs fixés et remplir la mission. C'est l'objet de la dimension Process qui décrit les activités menées avec leurs échanges de données. Les concepts fondamentaux à la description des processus sont illustrés dans la Figure 38.

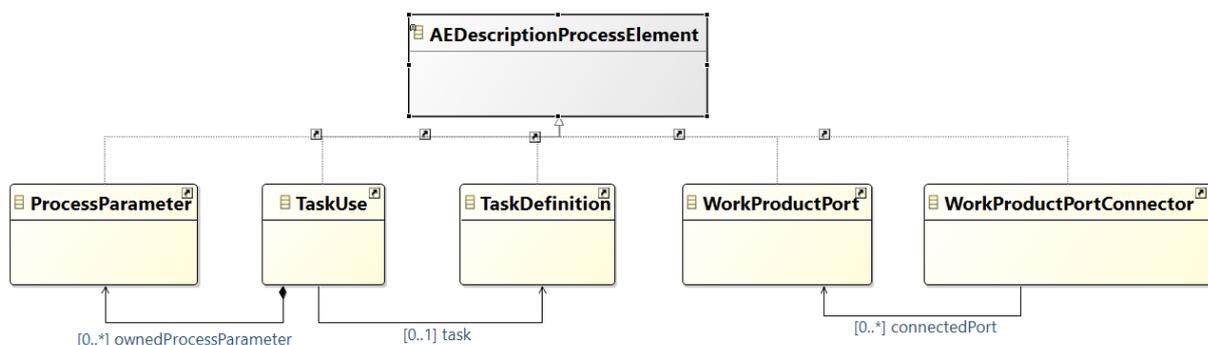


Figure 38. Modèle conceptuel simplifié pour décrire les processus

Un élément de processus de description d'architecture (*AEDescriptionProcessElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire l'évaluation d'architecture selon la dimension process.

Ces concepts sont mis en relation dans la Figure 39 avec les concepts d'évaluation d'architecture promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

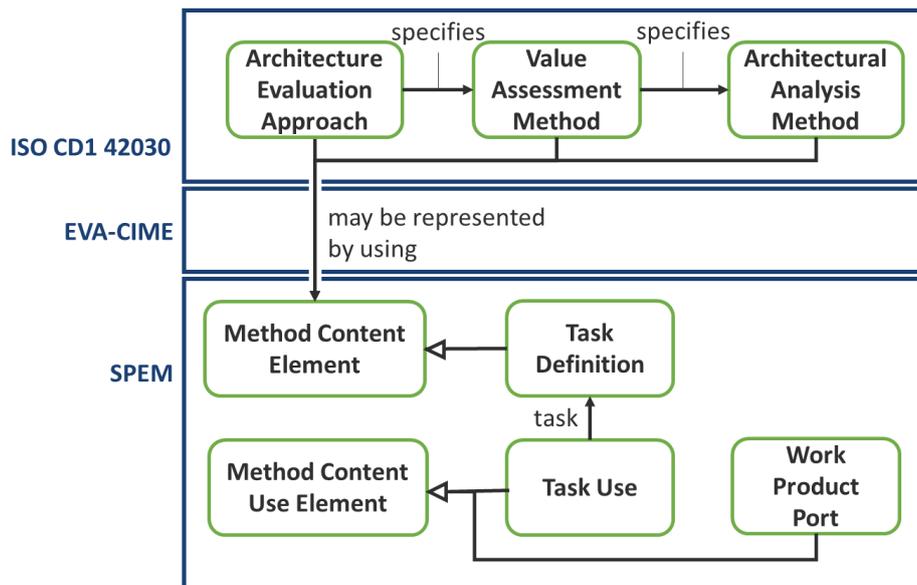


Figure 39. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Software & Systems Process Engineering and Management

La synthèse des concepts jugés fondamentaux pour décrire le comment de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture est présentée dans le Tableau 13.

Tableau 13. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples pour décrire les processus

CONCEPTS	DEFINITION	EXEMPLES
Définition de tâche – TaskDefinition	Une définition de tâche (<i>TaskDefinition</i>) définit une activité assignable contenue dans un processus. Sa description ne comporte pas de date d'exécution.	Collecter les données et informations nécessaires pour un effort d'évaluation d'architecture.
Utilisation de tâche – TaskUse	Une utilisation de tâche (<i>TaskUse</i>) représente une instantiation d'une définition de tâche dans un contexte spécifique.	Collecter les données et informations requises pour déterminer l'adaptabilité aux différentes typologies de déchets du système de réception.
Port de produit de travail - WorkProductPort	Un port de produit de travail (<i>WorkProductPort</i>) définit les entrants et sortants attendus des tâches et processus.	Liste des données et informations indispensables.
Connecteur de port de produit de travail - WorkProductPortConnector	Un connecteur de port de produit de travail (<i>WorkProductPortConnector</i>) est utilisé pour connecter des ports de produit de travail ensemble, et ainsi assembler les tâches et processus.	N/A

Afin de guider la personne en charge de réaliser la description des processus de l'évaluation d'architecture, le Tableau 14 précise et illustre la liste des tâches à mener pour décrire les processus de l'unité d'organisation. Cette liste a été élaborée en s'inspirant des activités promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

Tableau 14. Liste des tâches associée à l'activité de description des process pour l'évaluation d'architecture

TACHES DE LA LISTE	EXEMPLE ASSOCIE
Sélectionner ou développer les méthodes d'appréciation de la valeur et d'analyse architecturale qui supportent les critères définis	La sélection de la/les méthodes qui seront appliquées permet d'identifier et de définir les tâches à mener, et ainsi construire dans un premier temps une liste de définition de tâches utilisables lors du projet. La méthode sélectionnée est la méthode Étude de Scenarios de TRAIement de Déchets (ESTRADE) présentée plus en détail dans le Chapitre 5 sur un exemple concret
Définir la/les méthodes sélectionnées sous la forme d'une méthode au sens de (Object Management Group (OMG) 2008b)	
Sélectionner les activités et tâches qui seront menées sur le projet	Tout le contenu d'ESTRADE est sélectionné.
Identifier les données et informations nécessaires pour réaliser chacune des activités	Pour chacune des tâches, il est possible d'envisager les données nécessaires en entrée et les données créées en sortie pour définir des ports de produit de travail.
Connecter les ports de produit de travail	N/A

3e - III.3.B.e. Décrire avec quoi (quel réseau opérant) procède l'unité d'organisation dans VP-WHO-PREP

Quand une unité d'organisation met en œuvre l'évaluation d'architecture, il est nécessaire de déterminer **qui/avec quoi** réaliser les actions. C'est l'objet de la description du réseau opérant (Operating Network) qui décrit les ressources, les rôles, unités organisationnelles ou encore les produits de travail qui ont été, sont ou seront utilisés. Les concepts fondamentaux à la description du réseau opérant sont illustrés dans la Figure 40.

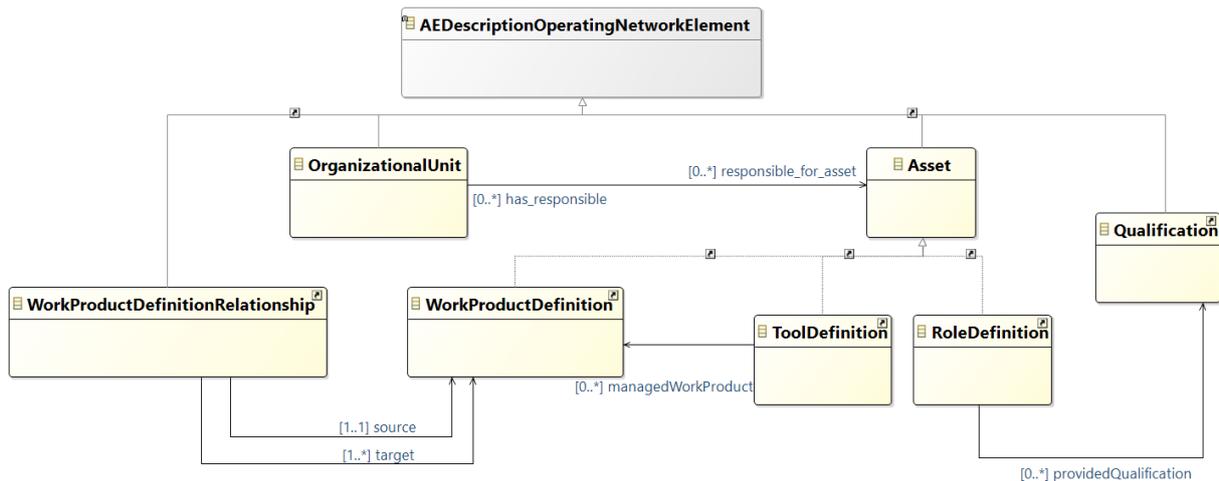


Figure 40. Modèle conceptuel simplifié pour décrire le réseau opérant

Un élément de réseau opérant de description d'architecture (*AEDescriptionOperatingNetworkElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire le réseau opérant de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture.

Ces concepts sont mis en relation dans la Figure 41 avec les concepts d'évaluation d'architecture promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

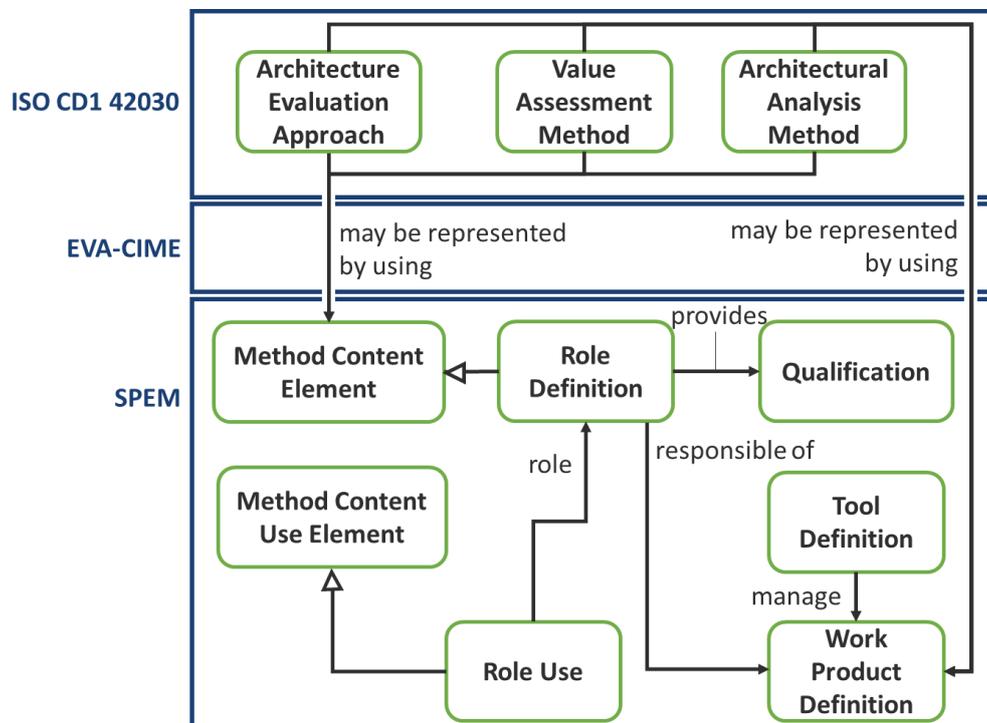


Figure 41. Mise en relation des concepts de l'ISO 42030 et des concepts de Software & Systems Process Engineering and Management

La synthèse des concepts jugés fondamentaux pour la description du réseau opérant de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture est présentée dans le Tableau 15.

Tableau 15. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire le réseau opérant

CONCEPTS	DEFINITION	EXEMPLES
Unité d'organisation - OrganizationalUnit	Une unité d'organisation (<i>OrganizationalUnit</i>) représente une entité de la structure organisationnelle d'une entreprise.	Design Office
Actif - Asset	Un actif (<i>Asset</i>) représente une valeur possédée par une entreprise telle qu'une compétence, une expertise, du matériel, du temps humain, un logiciel, etc.	Modélisation et simulation de flux
Définition d'outil - ToolDefinition	Une définition d'outil (<i>ToolDefinition</i>) décrit la capacité d'un outil pouvant être utilisé pour réaliser une tâche.	Capella
Définition de rôle - RoleDefinition	Une définition de rôle (<i>RoleDefinition</i>) définit un ensemble de compétences, d'expertises et de responsabilités d'un individu ou d'un ensemble d'individu.	Modeleur de procédé
Qualification - Qualification	La qualification est un élément de documente une ou plusieurs qualifications, aptitudes ou compétences requises pour les définitions de rôle et/ou de tâche.	Modélisation de procédé
Définition de produit de travail - WorkProductDefinition	Une définition de produit de travail (<i>WorkProductDefinition</i>) définit un élément qui est utilisé, modifié et produit par une tâche.	(1) Plan d'évaluation d'architecture (2) Liste de données et informations
Relation de définition de produit de travail - WorkProductDefinitionRelationship	Une relation de définition de produit de travail (<i>WorkProductDefinitionRelationship</i>) exprime une relation entre deux définitions de produit de travail	(1) est composé de (2)

Afin de guider la personne en charge de réaliser la description du réseau opérant de l'évaluation d'architecture, le Tableau 16 donne et illustre la liste des tâches à mener pour décrire les processus de l'unité d'organisation. Cette liste a été élaborée en s'inspirant des activités promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

Tableau 16. Liste des tâches associée à l'activité de description du réseau opérant pour l'évaluation d'architecture

TACHES DE LA LISTE	EXEMPLE ASSOCIE
Spécifier les produits et leurs grandes lignes qui doivent être réalisés durant l'évaluation d'architecture	Les deux types de livrables attendus durant l'effort d'évaluation d'architecture sont un plan d'évaluation d'architecture et les rapports d'évaluation d'architecture. Ces livrables peuvent être affinés avec des relations de produit de travail les liant aux éléments tels qu'ils ont été spécifiés dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b) e.g. le plan d'évaluation contient la liste des données et informations nécessaires.
Identifier les sources d'informations nécessaires pour les mesures, métriques et facteurs.	Afin de pouvoir réaliser les évaluations, par exemple, des informations sur les systèmes de levage sont nécessaires ainsi qu'un inventaire des déchets inclus dans le périmètre de traitement du système.
Sélectionner ou modifier les outils et techniques	Dans ESTRADÉ, deux outils sont mentionnés : Capella pour la modélisation de l'architecture et Excel pour le calcul/simulation des différents facteurs. Pour cet exemple, il n'a pas été nécessaire de modifier cette définition. Néanmoins, pour un autre projet, il pourrait être nécessaire d'utiliser des outils de simulation spécifiques à un ou plusieurs domaines.
S'assurer que les équipes d'évaluation sont formées à l'utilisation des techniques et outils identifiés	Cela peut se faire au travers de formations dispensées par l'équipe qui a développé ESTRADÉ. Il est envisageable de mettre en place un accompagnement de l'équipe d'évaluation par l'équipe d'ESTRADÉ jusqu'à ce que le niveau de compétences sur ESTRADÉ des équipes d'évaluation soit suffisant. À l'issue de cette activité, il est intéressant d'approfondir la description des processus en incluant les activités de formation et/ou d'accompagnement.
Définir les rôles et les qualifications qui seront mis en place pour l'effort d'évaluation d'architecture	ESTRADÉ définit un ensemble de <i>définition de rôle</i> qui sont utilisables dans cet exemple à savoir : Spécificateur, Concepteur de Formule, Concepteur de Solution, Spécificateur métier, Chef de Projet, Utilisateur.

3e - III.3.B.f. Décrire quand procède l'unité d'organisation dans VP-WHEN-
PREP

La mise en œuvre de l'évaluation d'architecture nécessite de planifier **quand** seront réalisées les tâches et mobilisées les ressources. C'est l'objet de la description du planning qui permet d'associer aux éléments des informations de planification et de séquençement pour décrire l'exécution des tâches. BPMN a été utilisé comme langage pour décrire le comportement des activités. Néanmoins, les connecteurs sont fournis pour implémenter tout autre langage adapté. Les concepts fondamentaux sont illustrés dans la Figure 42.

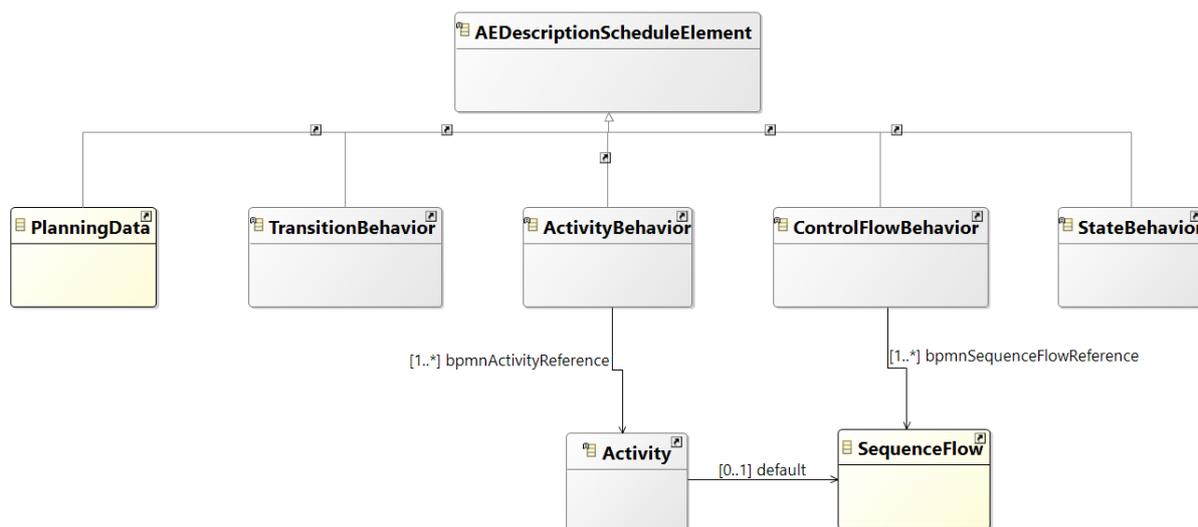


Figure 42. Modèle conceptuel simplifié pour décrire le planning de l'évaluation d'architecture

Un élément de planning de description de l'évaluation d'architecture (*AEDescriptionScheduleElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire le planning de l'évaluation d'architecture.

La synthèse des concepts jugés fondamentaux pour la description du planning de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture est présentée dans le Tableau 17.

Tableau 17. Synthèse des concepts fondamentaux et exemples associés pour décrire le planning

CONCEPTS	DEFINITION
Comportement d'une activité – ActivityBehavior	Le comportement d'une activité (<i>ActivityBehavior</i>) représente une référence externe à un concept permettant de décrire le comportement d'une activité. Une activité (<i>Activity</i>) est un exemple de concept issu de BPMN qui peut être référencé.
Activité - Activity	Une activité (<i>Activity</i>) est le terme générique utilisé en BPMN pour décrire les tâches réalisées.
Comportement d'un flux de contrôle - ControlFlowBehavior	Le comportement d'un flux de contrôle (<i>ControlFlowBehavior</i>) représente une référence externe à un concept permettant de décrire le comportement d'un flux de contrôle. Un flux de séquence (<i>SequenceFlow</i>) est un exemple de concept issu de BPMN qui peut être référencé.
Flux de séquence - SequenceFlow	Un flux de séquence (<i>SequenceFlow</i>) est utilisé pour décrire l'ordre dans lequel seront réalisées les tâches.
Comportement d'un état - StateBehavior	Le comportement d'un état (<i>StateBehavior</i>) représente une référence externe à un concept permettant de décrire le comportement d'un état.
Comportement d'une transition - TransitionBehavior	La qualification est un élément de documente une ou plusieurs qualifications, aptitudes ou compétences requises pour les définitions de rôle et/ou de tâche.

Donnée de planning - PlanningData	Une donnée de planning (PlanningData) ajoute des données de planification qui peuvent être utilisées pour générer des plannings d'utilisation des ressources et pour la réalisation des tâches.
-----------------------------------	---

Afin de guider la personne en charge de réaliser la description des motivations de l'évaluation d'architecture, le Tableau 16 regroupe et illustre la liste des tâches pour décrire le planning de l'unité d'organisation. Cette liste a été élaborée en s'inspirant des activités promulguées dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a) et (ISO, IEC, and IEEE 2019b).

Tableau 18. Liste des tâches associée à l'activité de description du planning pour l'évaluation d'architecture

TACHES DE LA LISTE	EXEMPLE ASSOCIE
Développer le planning d'évaluation d'architecture et les jalons associés	Il s'agit ici de décrire le comportement des tâches i.e. de construire le BPMN des tâches utilisées et définir des flux de séquence entre ces activités. Dans un second temps, des données de planning sont associées à chacune des tâches pour définir la date de démarrage, la durée et la date butoir.
Déterminer quand impliquer les parties prenantes dans l'évaluation d'architecture	Grâce aux relations entre les tâches utilisées et les rôles utilisés, il est possible de déterminer quand les rôles devront être impliqués dans l'évaluation d'architecture, et ainsi confronter cette information avec la disponibilité réelle de ces derniers.
S'assurer que les équipes seront formées à l'utilisation des techniques, méthodes et outils à temps	Grâce aux relations entre les tâches utilisées et les qualifications requises, il est possible de déterminer quelles compétences sont requises et quand. Ces informations sont confrontées avec le planning de formation et permettent de réajuster ce dernier.
S'assurer que les équipes auront les autorisations et accès nécessaires aux informations à temps	Grâce aux relations entre les tâches utilisées et les ports de produit de travail, il est possible de déterminer quelles informations sont nécessaires et à quel moment. Ces informations sont confrontées au planning des activités qui permettent de fournir ces informations et permettent de réajuster ce dernier.

3e - III.3.B.g. Synthèse de la description de l'unité d'organisation

La définition de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture et l'évaluation d'architecture elle-même sont étroitement liées. La description de l'unité d'organisation permet, grâce aux liens identifiés dans chacune des parties, de construire un modèle avec les concepts de l'évaluation d'architecture tels qu'ils sont décrits dans (ISO, IEC, and IEEE 2019b). Un exemple de modèle est illustré Figure 43 et reprend les exemples utilisés tout au long de la présentation de la démarche de préparation.

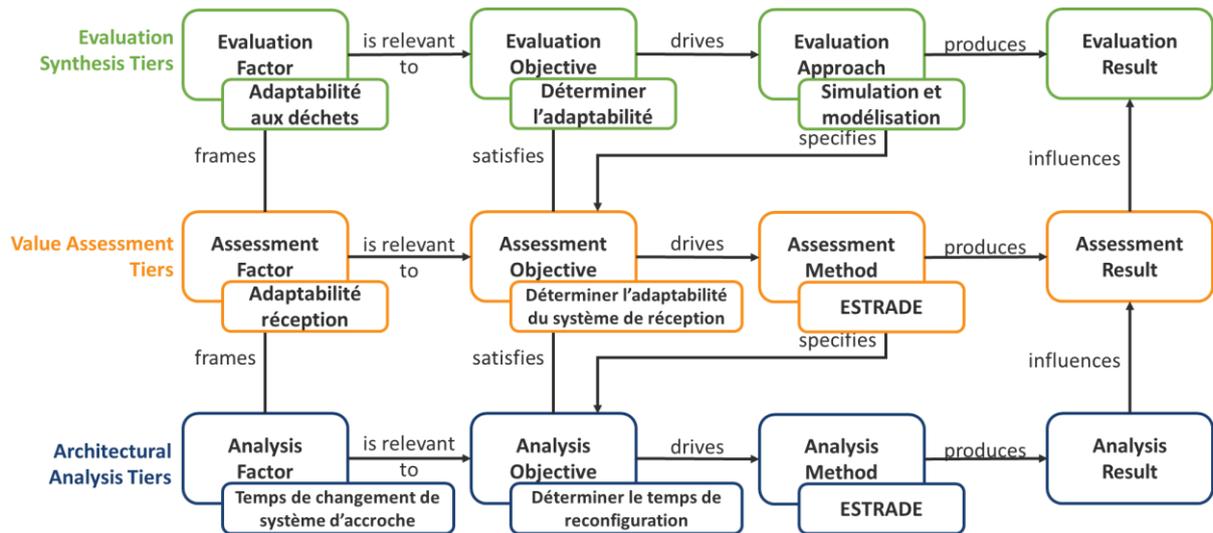


Figure 43. Exemple simplifié de modèle d'évaluation d'architecture

3e - III.3.C. L'étape d'exécution de l'évaluation d'architecture sur un projet

3e - III.3.C.a. Introduction

L'objectif de l'étape d'exécution est de réaliser et piloter l'effort d'évaluation d'architecture. L'activité d'exécution de l'évaluation d'architecture prend principalement en entrée le plan d'évaluation d'architecture tel qu'il a été formulé lors de l'étape de préparation. Un rapport d'évaluation d'architecture est attendu en livrable de cette activité. Ce rapport supporte la prise de décision et peut contenir des recommandations sur les actions à mener sur l'architecture pour s'approcher des attentes des parties prenantes. De plus, des besoins en support peuvent de manière optionnelle être des extraits de cette activité tels que la nécessité de développer une méthode adaptée aux besoins en évaluation. Trois rôles sont impliqués dans la réalisation de cette activité, et les rôles prépondérants sont celui de manager d'EA et de praticien de l'EA qui sont alors assistés du rôle de support à l'EA qui peut fournir matériel, logiciel, ressources humaines (e.g. un modelleur) ou méthodes d'évaluation spécifiquement développées. Ces différents éléments définissant l'activité de réalisation et de pilotage sont synthétisés et illustrés Figure 44.

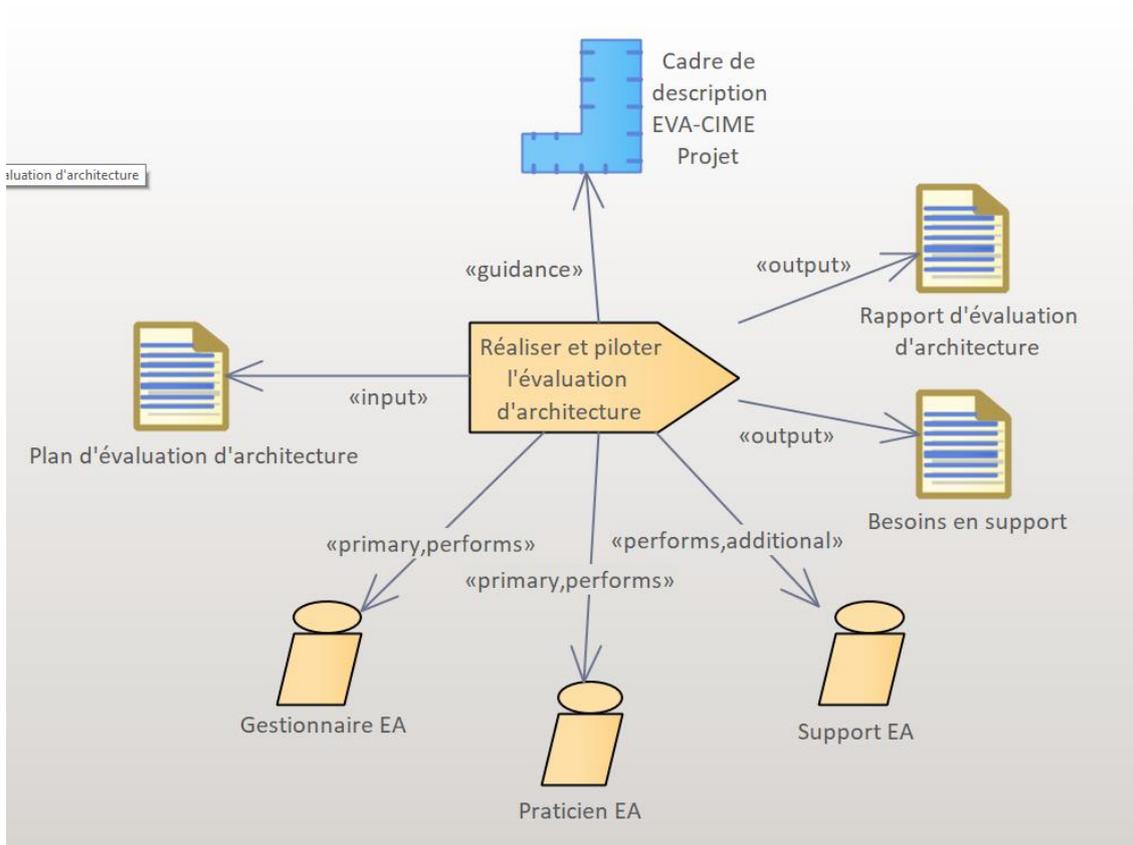


Figure 44. Définition de l'activité de réalisation et pilotage de l'évaluation d'architecture

Il est inenvisageable lors de l'étape de préparation présentée dans la section précédente de définir en totalité l'ensemble du contenu des tiers d'évaluation d'architecture. De plus, lors de la réalisation de l'évaluation, de nouveaux objectifs d'évaluation d'architecture peuvent apparaître qui n'ont jusqu'alors pas été prévus à l'étape de préparation. Ces deux cas de figure sont prévus dans le cadre de description EVA-CIME.

3e - III.3.C.b. Réaliser l'évaluation d'architecture

Les tâches pour réaliser l'évaluation de l'architecture sont résumées dans la liste suivante issue de (ISO, IEC, and IEEE 2019b) :

- Collecter et comprendre les informations requises pour l'évaluation d'architecture ;
- Évaluer l'architecture ;
- Formuler les conclusions et recommandations ;
- Communiquer les résultats de l'évaluation.

Cette liste de tâches reflète assez peu la décomposition en tiers de l'évaluation d'architecture. C'est pourquoi le cadre de description EVA-CIME a été développé pour réaliser les descriptions en cascade de la préparation vers la clôture, cela se traduit par la Figure 45.

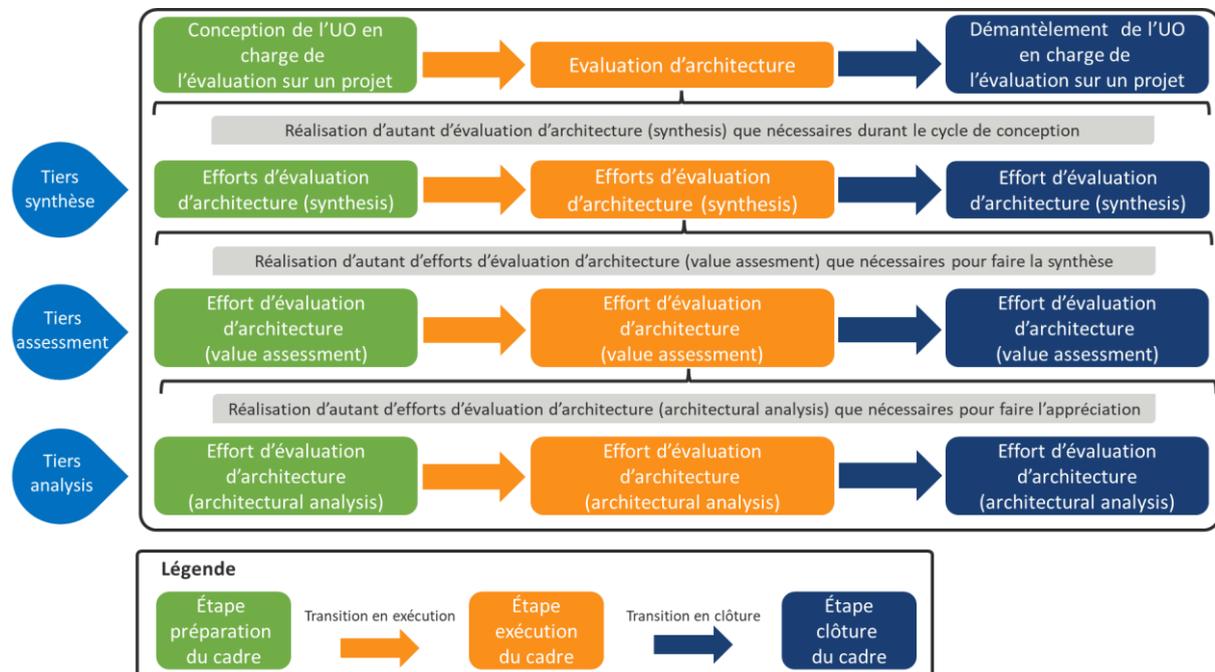


Figure 45. Evolution des différents tiers d'évaluation d'architecture dans le cadre

Comme présenté dans la section préparation, initialement l'unité d'organisation (UO) en charge de l'évaluation d'architecture sur le projet est conçu. Une fois le plan d'évaluation d'architecture réalisé et approuvé, l'UO passe à l'étape d'exécution. L'évaluation d'architecture se déroule tout du long du cycle de vie du projet de développement du système et nécessite différents efforts d'évaluation d'architecture.

Sur le même principe qu'un cycle en V, à chaque nouvel effort d'évaluation d'architecture, il y a un retour à l'étape de préparation pour préparer cet effort puis transition vers l'étape d'exécution. Si l'exécution de ce tiers nécessite de passer au tiers suivant (e.g. l'effort de synthèse (synthesis) nécessite des efforts d'appréciation (value assesment)) alors les efforts de l'étape suivante sont préparés dans l'étape préparation puis transitent à l'étape d'exécution et ainsi de suite jusqu'à ce que le tiers nécessaire soit atteint. Après réalisation des efforts du tiers le plus bas, les résultats sont récoltés et communiqués au tiers supérieur et l'effort est clôturé (ce qui se traduit par une transition de l'étape d'exécution vers l'étape de clôture dans le cadre). Le tiers supérieur utilise, synthétise, analyse, agrège ces résultats et produit ses propres résultats ainsi jusqu'à remonter totalement les tiers et fournir un rapport.

Ces efforts d'évaluation d'architecture (synthèse) ont lieu aussi souvent que nécessaire et jusqu'à ce que l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture soit démantelé. Cette descente en cascade puis la remontée est présentée dans la Figure 46.

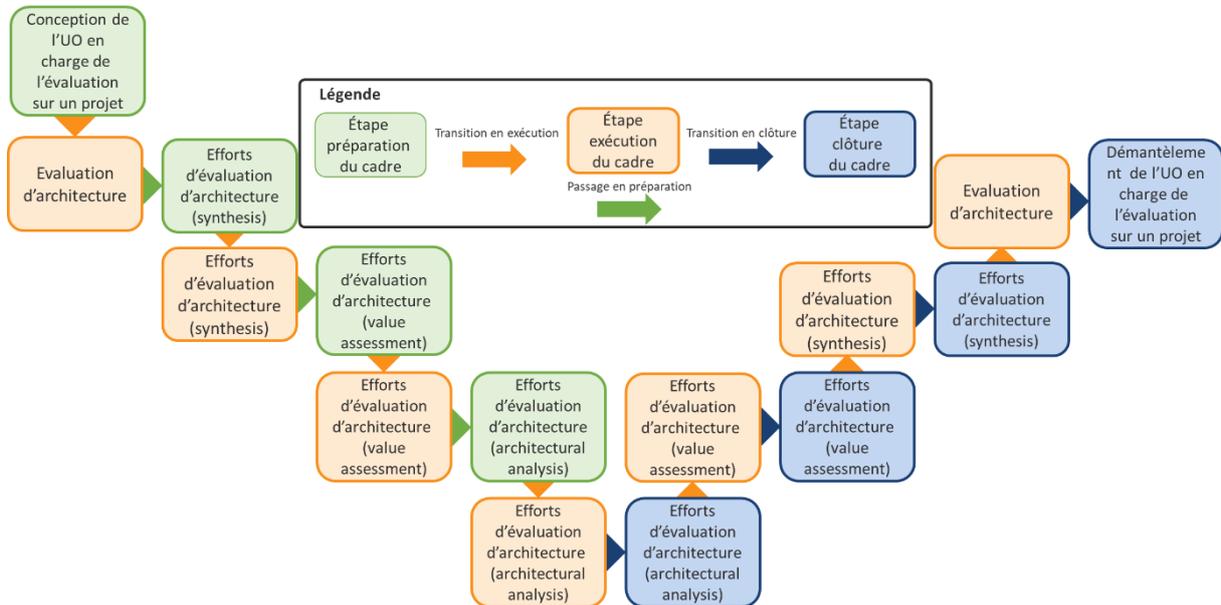


Figure 46. Cycle en V des efforts d'évaluation d'architecture suivant les tiers

Pour assister les activités de réalisation de l'évaluation d'architecture, des notions sont associées à la notion d'*utilisation de produit de travail* (selon la dénomination SPEM) pour rattacher des éléments tangibles issus des tâches exécutées.

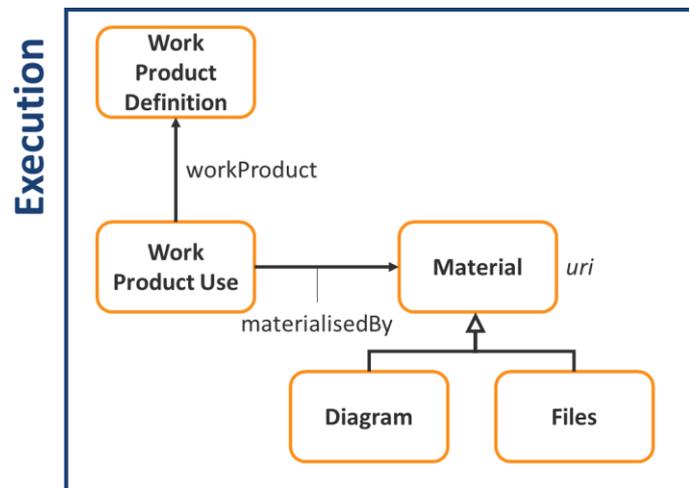


Figure 47. Concepts en exécution pour assister les activités de réalisation (inspired by (Object Management Group (OMG) 2008b))

Par exemple, à l'issue de l'activité d'identification des facteurs d'évaluation d'architecture, un diagramme Structured Metrics Metamodel (SMM) (Object Management

Group (OMG) 2018) a pu être réalisé. Ainsi, la traçabilité est maintenue de la définition du produit de travail (Facteurs d'évaluation d'architecture) vers l'élément tangible contenant l'information (Diagramme SMM) en passant par l'utilisation du produit de travail (Facteurs d'évaluation d'architecture pour l'objectif d'adaptabilité à la quantité et aux typologies de déchets).

3e - III.3.C.c. Piloter l'évaluation d'architecture

Les tâches pour piloter l'évaluation de l'architecture sont résumées dans la liste suivante issue de (ISO, IEC, and IEEE 2019b) :

- Surveiller que les activités menées sont conformes à ce qui a été défini dans le plan d'évaluation d'architecture ;
- Évaluer la progression de l'évaluation d'architecture par rapport à ce qui a été défini dans le plan d'évaluation d'architecture ;
- Contrôler les activités, si nécessaire, pour modifier le plan, ajuster les ressources, modifier le planning et les tâches, etc.

Pour faciliter l'exécution de ces tâches, certains concepts sont présents dans le cadre de description dans la dimension exécution.

Pour faciliter l'identification des éléments issus de la préparation et des éléments non prévus dans le plan, et également pour assurer la traçabilité des éléments, une classe de relation a été proposée et relie les concepts de l'étape de préparation et ceux des concepts à l'étape d'exécution. Cette relation est illustrée Figure 48.

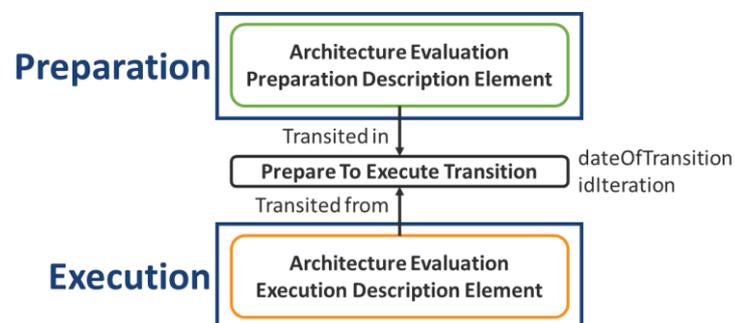


Figure 48. Concepts reliant les concepts de l'étape de préparation à l'étape d'exécution

La mise en place de cette relation permet au manager de l'EA plusieurs analyses et actions.

- La première analyse consiste à s’assurer que chaque élément décrit à l’étape de préparation est bien un seul et unique élément associé à l’étape d’exécution ;
- La seconde analyse consiste à regarder si chaque élément en exécution est associé à un élément de l’étape de préparation. Si c’est le cas, il faut s’assurer que c’est le bon élément. Si ce n’est pas le cas, il faut s’assurer que cet élément n’a bien pas été défini à l’étape de préparation et dans le cas contraire, il faut ajouter l’association ;
- La troisième analyse consiste pour les éléments non définis à l’étape de préparation d’analyser leurs impacts sur le Système pour Faire l’INB et de vérifier qu’un ajustement du plan n’est pas nécessaire.

Une information est considérée utile pour juger de la progression : il s’agit, en effet, de pouvoir comparer les données de planning réel et celles du planning initial ou a minima précédent qui a été élaboré lors de l’étape de préparation comme illustré Figure 49.

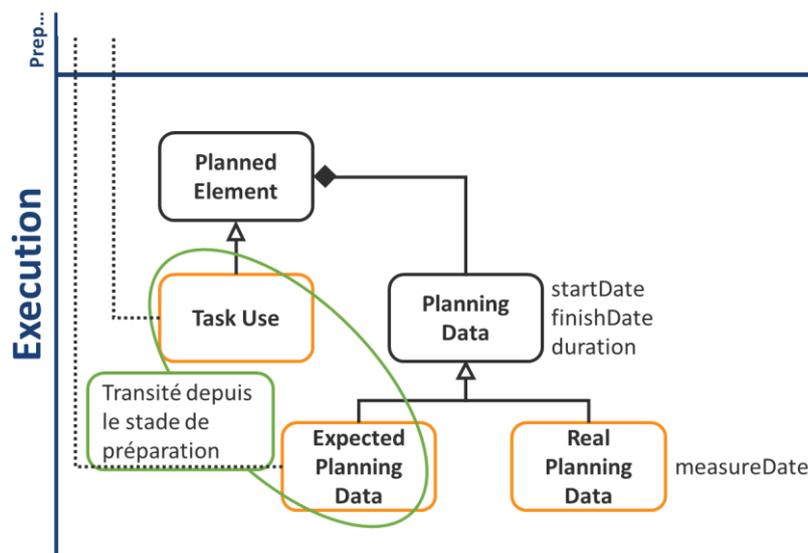


Figure 49. Concepts ajoutés en exécution pour comparer les données de planning

3e - III.3.C.d. Synthèse

Lors de l’étape d’exécution tous les éléments définis lors de l’étape de préparation sont transités à l’étape d’exécution dans le cadre de description EVA-CIME. Les éléments définis en amont n’ont pas vocation à être modifiés lors de cette étape, mais plutôt spécifiés et s’ils sont rediscutés, un nouveau passage par la dimension préparation est alors nécessaire. L’évaluation d’architecture s’exécute suivant les tiers d’évaluation et le cadre de description

EVA-CIME Projet prend en compte cette dynamique dans la manipulation des différents points de vue.

Des concepts propres à l'exécution sont introduits. Le concept de « **Material** » permet d'associer à une *utilisation de produit de travail* un élément tangible tel qu'un document, un modèle, une image, ou tout autre élément que l'unité d'organisation utilise ou produit. Ce nouveau concept assure la liaison entre les containers réels des informations et l'unité d'organisation telle qu'elle est modélisée. Les concepts comme « **Real Planning Data** » ou « **Preparation To Execution Transition** » assistent le manager de l'EA dans ces tâches de pilotage et lui permettent de comparer le planifié et le réel, et d'assurer la conformité des efforts d'évaluation tels qu'ils ont été définis.

3e - III.3.D. L'étape de clôture de l'évaluation d'architecture sur un projet

3e - III.3.D.a. Introduction

L'objectif de l'étape de clôture est de décrire les leçons apprises, ce qu'il est jugé intéressant d'intégrer dans le REC et la mise à jour de ce REC lors de l'évaluation d'architecture. L'activité de clôture de l'évaluation d'architecture prend principalement en entrée des retours d'expérience. La mise à jour du REC est l'attendue de cette activité. Ce REC, propre au projet et formalisé dans la dimension clôture du cadre, constitue la base de réutilisation à l'échelle du projet. Les trois rôles sont impliqués dans la réalisation de cette activité, les rôles de manager de l'EA et de support à l'EA sont prépondérants et sont alors assistés du rôle de praticien de l'AE apportant des précisions sur les retours d'expérience vis-à-vis notamment des techniques, méthodes et outils employés lors de l'évaluation d'architecture. Ces différents éléments définissant l'activité de clôture sont synthétisés et illustrés Figure 50.

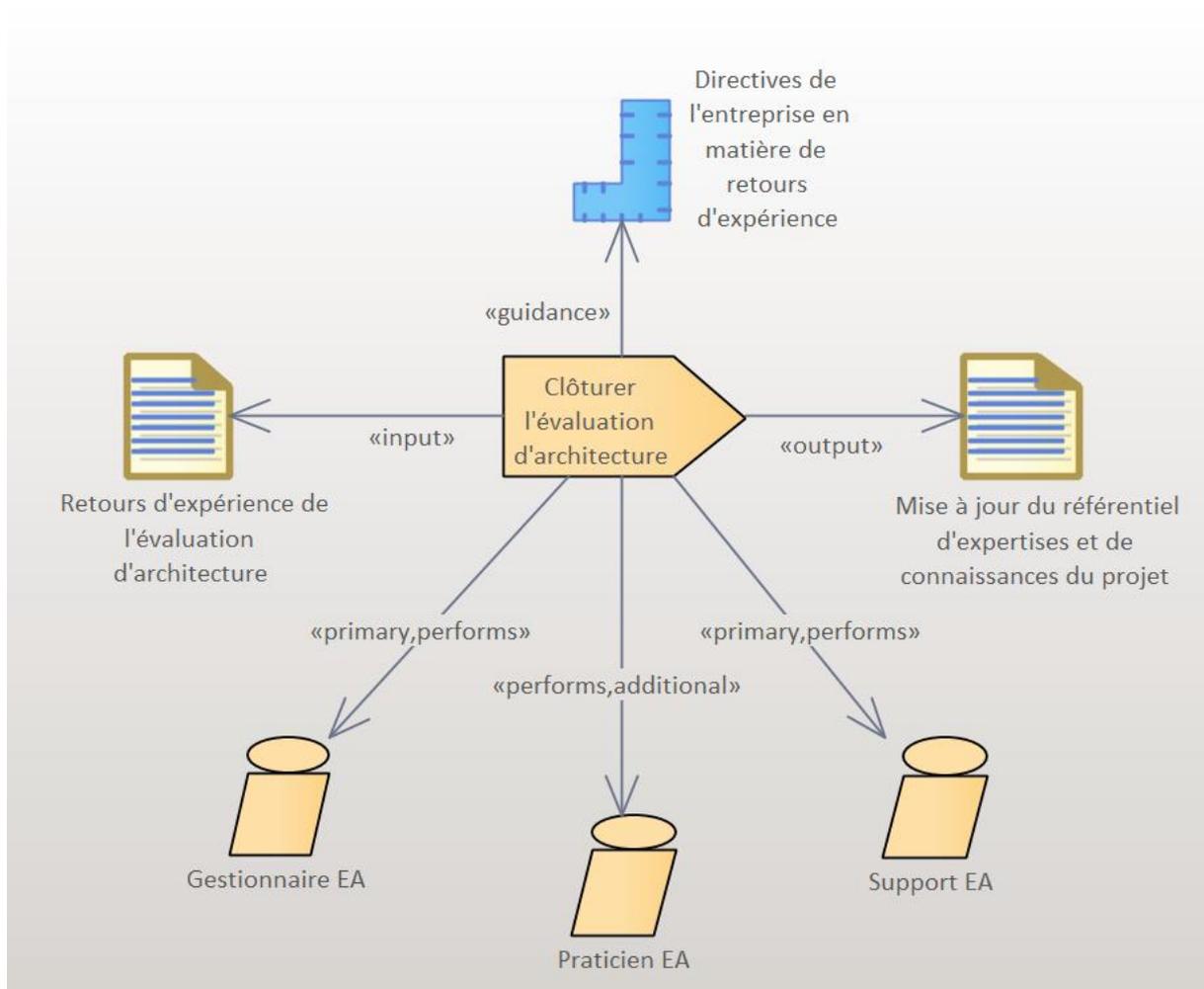


Figure 50. Définition de l'activité de préparation et planification de l'évaluation d'architecture

Comme présenté précédemment l'étape de clôture, et plus particulièrement la dimension clôture du cadre, est amenée à être utilisée aussi souvent qu'un effort (peu importe le tiers) d'évaluation d'architecture se termine. Le placement de l'étape de clôture à la fin de chacun des efforts est une des stratégies de capitalisation qui peut être adoptée, une autre serait de réaliser cette étape de clôture uniquement à l'issue de tous les efforts. Cette dernière est peu recommandée car dans des cycles de développement aussi long que celui d'une INB le risque d'oubli augmente à mesure que le temps séparant la capitalisation et l'exécution est grand. On distingue deux activités majeures à mener lors de cette étape, la collecte du retour d'expérience et la mise à jour du REC.

3e - III.3.D.b. Collecter le retour d'expérience

Les tâches pour collecter le retour d'expérience sur l'évaluation de l'architecture sont résumées dans la liste suivante issue de (ISO, IEC, and IEEE 2019b) :

- Identifier les leçons apprises et les documenter dans des modèles, outils et autres moyens actualisés.
- Examiner toutes les informations pour déterminer si le travail d'évaluation de l'architecture est terminé et si les objectifs de collecte d'information sur l'évaluation d'architecture ont été atteints pour que l'évaluation de l'architecture peut être close, ou s'il existe des lacunes importantes qui nécessitent et entraînent des modifications du plan, du calendrier, du budget et de l'approche d'évaluation de l'architecture.
- Identifier les modifications à apporter à la prochaine itération d'évaluation de l'architecture.
- Identifier les lacunes et insuffisances sur les éléments, utilisés lors du projet, comme :
 - Le cadre d'évaluation d'architecture, les points de vue et les types de modèles (e.g. manque d'un type de modèle pour décrire les facteurs d'évaluation d'architecture) ;
 - Les services et ressources en support à l'évaluation d'architecture (e.g. manque de modeleur, temps de développement de méthodes adaptées trop long) ;
 - Contenu et structure du registre de dépôts pour l'évaluation d'architecture (e.g. difficile de trouver l'information recherchée dès que le modèle atteint une certaine complexité) ;
 - Contenu et structure du référentiel d'expertises et de connaissances (e.g. pas assez de méthodes d'évaluation mises à disposition, délicat de retrouver une évaluation d'architecture passée) ;
 - Modèle (template) et instructions (guidance) pour les produits de travail (e.g. la structure d'un plan d'évaluation d'architecture est inadaptée pour un client spécifique) ;
 - Les structures et flux d'informations liés à l'exécution d'autres processus (e.g. l'échange de modèle par mail ajoute des tâches de fusion de modèle lourdes à gérer).

Pour faciliter l'exécution de ces tâches, certains concepts sont présents dans le cadre de description dans la dimension clôture et présentés Figure 51.

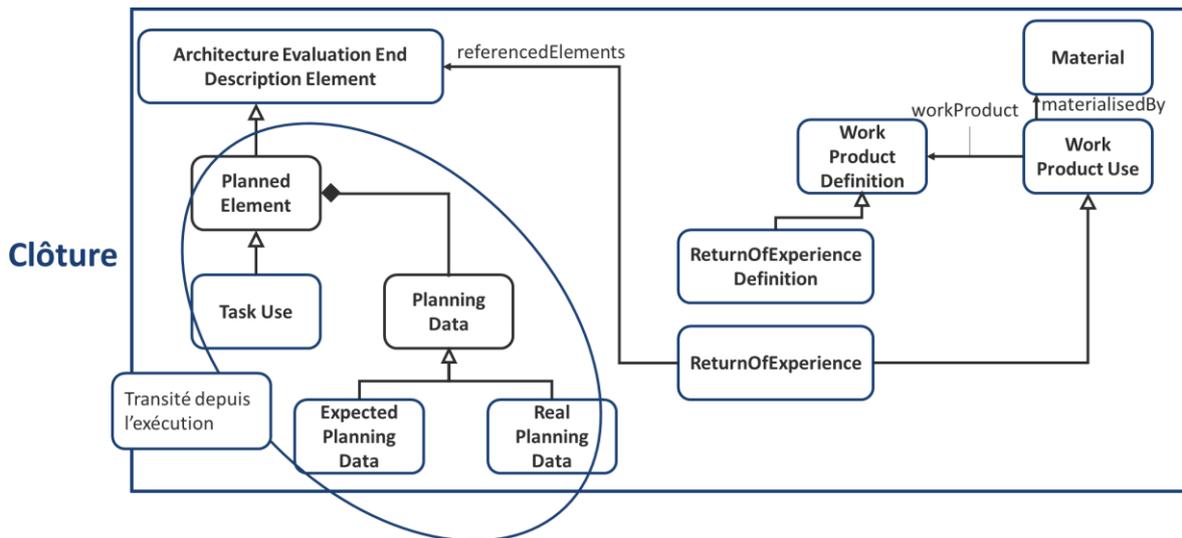


Figure 51. Concepts ajoutés en clôture pour récolter le retour d'expérience

Comme le format du retour d'expérience est variable en fonction des entreprises et, parfois, au regard des projets, le concept est présent dans le cadre tout en laissant la responsabilité de sa définition à l'organisation. Un exemple de définition peut être la grille d'analyse⁶ proposée par le Centre d'évaluation, de documentation et d'innovation pédagogiques (CEDIP)(Centre d'évaluation de documentation et d'innovation pédagogiques (CEDIP) 2011).

Tous les éléments transités à l'étape de clôture sont accessibles à tout moment lors de l'évaluation d'architecture pouvant alors servir de source d'inspiration ou permettre d'améliorer les itérations d'évaluation d'architecture. Néanmoins, certaines informations doivent être ajoutées aux seuls retours d'expérience pour faciliter la réutilisation et/ou l'amélioration.

3e - III.3.D.c. Actualiser le REC Projet

Les tâches pour actualiser le REC Projet de l'évaluation de l'architecture sont résumées dans la liste suivante issue de (ISO, IEC, and IEEE 2019b) :

- Identifier les méthodes et les critères d'évaluation qui se prêtent à une réutilisation et qui seraient de bons candidats pour une normalisation ou une formalisation dans le

⁶ Le lecteur trouvera un exemple de grille de retour d'expérience sur <https://www.cedip.developpement-durable.gouv.fr/le-retour-d-experience-une-methode-une-grille-a891.html>

cadre d'évaluation de l'architecture si celui existe ou dans un cadre d'évaluation d'architecture pour un développement futur ;

- Saisir les spécificités de ces méthodes et critères de manière que d'autres puissent utiliser ces éléments dans une évaluation ultérieure ;
- Fournir des conseils sur la manière d'utiliser ces éléments, outils et techniques ;
- Proposer des améliorations pour combler les lacunes et insuffisances identifiées.

Pour faciliter l'exécution de ces tâches des concepts sont présents dans le cadre de description dans la dimension clôture.

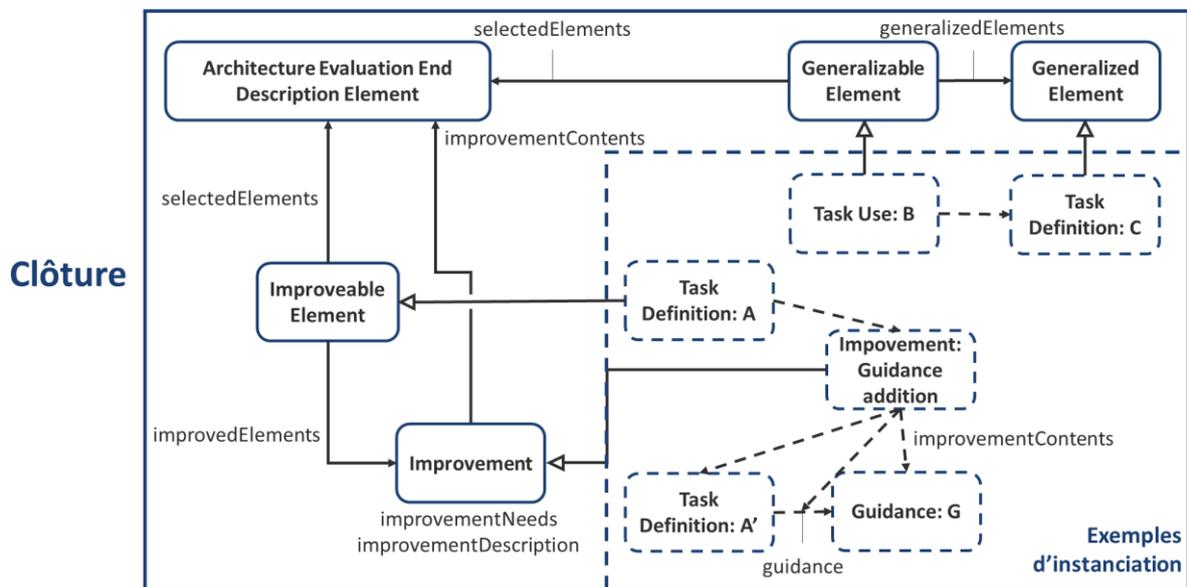


Figure 52. Concepts ajoutés en clôture pour proposer des généralisations et des améliorations

L'activité de capitalisation de l'évaluation d'architecture est approfondie dans la section 4e - II.5.B.

3e - III.3.D.d. Synthèse

Lors de l'étape de clôture, les éléments de l'étape de préparation et d'exécution sont transités à l'étape de clôture. Ces éléments définis en amont ne sont pas modifiés lors de cette étape. Ils sont agrémentés de retours d'expérience structurés comme le décide l'organisation. Ces retours d'expérience permettent, si besoin, d'identifier des lacunes et insuffisances associées à ces éléments. Le support en EA se chargera alors d'identifier les améliorations pour combler ces manques. De plus, des éléments jusqu'alors spécifiques, à un effort

d'évaluation d'architecture, par exemple, peuvent être identifiés comme généralisables et faire l'objet par la suite d'une généralisation qui pourra être réutilisée en tant que telle, plus tard dans le projet.

3e - IV. Conclusion

Après avoir présenté les concepts fondamentaux de la méthode EVA-CIME (Evaluation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering), ceux-ci sont regroupés dans un cadre de description définissant les différents langages utiles à manipuler ces concepts. Ce cadre s'articule autour de deux axes que sont les questionnements (pourquoi, quoi, comment, avec quoi/qui, quand) et les étapes de l'évaluation d'architecture (Préparation, Exécution, Clôture). Les concepts sont répartis dans les différents axes de questionnement du cadre et relié ensemble dans un méta-modèle dont les concepts essentiels sont illustrés Figure 53.

La démarche opératoire d'EVA-CIME Projet est ensuite détaillée et se structure autour des étapes de Préparation, Exécution, Clôture. À chacune de ces étapes sont synthétisés les intrants et extrants notables et rôles impliqués. Les concepts utiles aux activités des étapes sont illustrés et accompagnés d'exemples concrets.

À l'étape de préparation, une attention particulière est portée sur les concepts utiles pour décrire l'unité d'organisation selon les cinq dimensions de questionnement, décrivant ainsi les motivations, les missions, les processus, le réseau opérant et le planning de l'évaluation d'architecture au sein d'un projet d'INB.

À l'étape d'exécution, le cadre de description vient supporter les activités de réalisation et de pilotage de l'évaluation d'architecture sur la base de ce qui a été préparé/planifié dans l'étape précédente. De plus, la navigation au sein du cadre de description en fonction de l'étape et du tiers d'évaluation d'architecture est détaillée.

Enfin, à l'étape de clôture sont présentées les activités et concepts nécessaires à la collecte de retours d'expérience, à leur capitalisation dans le référentiel d'expertises et de connaissances du projet et à leur possible amélioration.

Définir l'évaluation d'architecture à l'échelle du seul projet présente certaines limites notamment en termes de capitalisation et réutilisation. Les leçons et résultats des différentes évaluations d'architecture menées sur un projet sont difficilement partageables avec des

acteurs d'autres projets sans la mise en place d'une organisation particulière et dédiée. La mise en place de cette organisation, pour être la plus efficace possible, doit se faire au niveau d'organisation supérieur, l'entreprise. De la même manière, toutes les améliorations, généralisations, identifications de lacunes peuvent difficilement rayonner au sein de l'entreprise sans la mise en place d'un processus d'amélioration continue de l'évaluation d'architecture à l'intérieur de celle-ci. C'est pourquoi EVA-CIME est déclinée au niveau entreprise au chapitre suivant sous la forme d'EVA-CIME Entreprise.

Chapitre 4e - Proposition d'une méthode de déploiement, de capitalisation et d'amélioration continue des pratiques d'évaluation d'architecture au niveau de l'entreprise.

4e - I. Introduction

Le déploiement de l'évaluation d'architecture à l'échelle d'un projet doit être bien évidemment rendu possible et facilité au sein de l'entreprise, par exemple, en termes de ressource humaines sensibilisées et formées à l'évaluation d'architecture. Une culture et un environnement favorable doivent alors être mis en place et maintenus. À cette fin, ce chapitre décrit la déclinaison nommée EVA-CIME Entreprise de la méthode EVA-CIME (Evaluation for Critical Infrastructure Model-Based Systems Engineering).

Dans un premier temps, de nouveaux concepts sont introduits pour favoriser l'harmonisation, la capitalisation, la réutilisation et l'amélioration de l'évaluation d'architecture. Ces concepts sont utilisés pour alimenter et utiliser le REC EVA-CIME Entreprise. Par la suite, l'extension du cadre de description EVA-CIME Projet amorcé dans le chapitre précédent est présentée. Cette extension consiste à introduire un troisième axe de description. Ensuite, une première version de modèle de maturité est proposée pour apprécier et promouvoir l'amélioration continue de la maturité d'une organisation sur le processus d'évaluation d'architecture. Enfin, la démarche opératoire s'appliquant spécifiquement à ce niveau entreprise sera présentée au travers des activités principales de la méthode que propose le cadre de description EVA-CIME Entreprise et en tenant compte du modèle de maturité de l'évaluation d'architecture.

4e - II. Déclinaison entreprise d'EVA-CIME

4e - II.1 Principaux concepts d'EVA-CIME Entreprise

Au-delà des concepts d'EVA-CIME Projet, de nouveaux concepts sont à considérer ici :

- Pour faciliter certaines modélisations requises dans les activités de la démarche opératoire EVA-CIME projet, le concept de patron ou pattern (Wu et al. 2019; Schindel 2005; Khalil, Schätz, and Voss 2014; Object Management Group (OMG) 2017; Pfister

et al. 2012) et l'approche dite Pattern Based Engineering (Khalil, Schätz, and Voss 2014; Schindel 2005; Cook and Schindel 2015) ;

- Pour viser une amélioration continue de l'organisation de l'entreprise face à l'évaluation d'architecture, le domaine des modèles de maturité (Blokdyk 2020; Object Management Group (OMG) 2008a; Bill 2017; Gouyon et al. 2009; CMMI Product Team 2010)

Ces concepts d'EVA-CIME Entreprise viennent donc enrichir de manière cohérente le méta modèle global d'EVA-CIME et les sources supplémentaires retenues sont synthétisées Figure 54. Ces sources sont en effet les standards (Object Management Group (OMG) 2017) et (Object Management Group (OMG) 2008a) et le modèle de maturité IV²AN pour juger de la maturité d'une organisation en termes d'Intégration, Vérification et Validation de systèmes (Gouyon et al. 2009). Les concepts ici choisis et intégrés complètent donc le cadre conceptuel initié au Chapitre 3e et suffisamment générique pour être adapté à chaque entreprise et à sa stratégie.

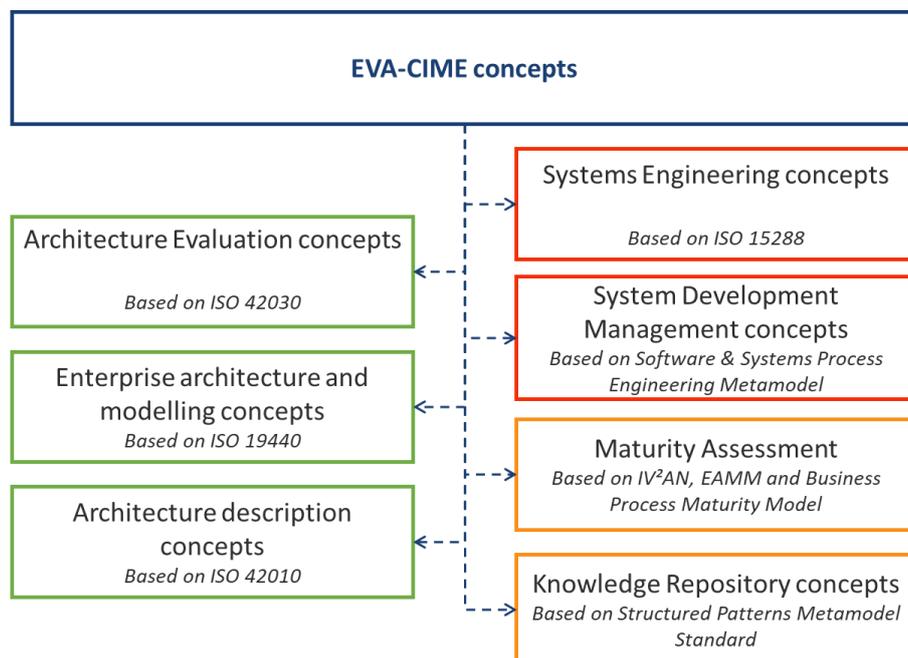


Figure 54. Principaux concepts d'EVA-CIME Entreprise

4e - II.1.A. Référentiel d'expertises et de connaissances (REC)

Un REC (entreprise / projet) donne accès à des utilisateurs reconnus à toutes données, informations et connaissances (DIC) (de niveau entreprise / projet) de manière transparente

pour ces utilisateurs (simplicité, ergonomie), permet de manipuler (requêter, trier / filtrer, choisir, visualiser, sélectionner, tracer, ...) et permet de gérer toutes ces DIC quelle que soit leur nature dans le temps (gérer les versions, gérer l'obsolescence, gérer la crédibilité, gérer le niveau de maturité, tracer les utilisations passées de chaque DIC. Utiliser un REC doit aider à modéliser, à vérifier, à valider, à évaluer, à prescrire, à tracer et à justifier). La structure du REC d'EVA-CIME reprend la structure du REC défini pour la chaire CIME et est illustré dans un méta-modèle Figure 55. Une version plus détaillée de ce métamodèle est disponible en Annexe A.

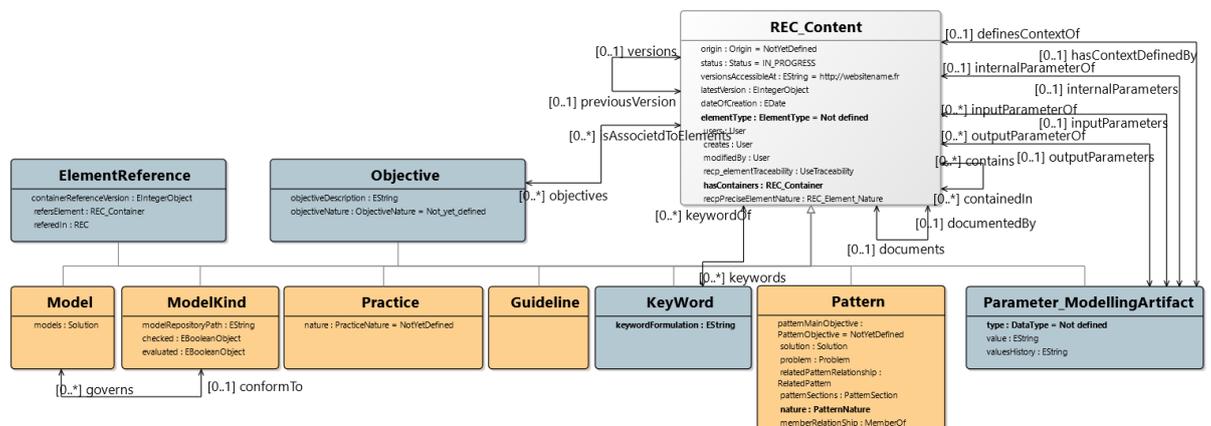


Figure 55. Méta-modèle du contenu du REC

4e - II.1.B. Patron (Pattern)

Un patron formalise la relation faite et éprouvée, qu'il est possible de réutiliser ou dont il est proposé de s'inspirer, en confiance, entre une solution-type optimale et un problème, par exemple de conception, d'organisation ou de travail considéré comme classique ou récurrent. Dans le cadre MBSE, un patron de conception (design pattern) est vu comme un modèle décrivant problème et solution à un certain niveau d'abstraction.

C'est donc une façon dont le praticien peut représenter une connaissance et expérience pouvant être réutilisée dans des contextes similaires en conception ou en organisation. Il peut aider à identifier et résoudre des problèmes en représentant ou imitant cette connaissance ou expérience. Les objectifs sont :

- Gagner en temps et en confiance
- De faciliter la réflexion puis la modélisation d'une solution, par exemple, élaborer un modèle de décision sur la base de modèles de décisions adressant des problèmes

comparables et éprouvés et donc, à terme, réduire le temps nécessaire à la réflexion et à la modélisation ;

- De faciliter, enfin, le travail collaboratif en partageant des bibliothèques de patrons adressant différents problèmes que les futurs architectes et Ingénieurs doivent résoudre.

Les concepts associés au concept de patron intégré dans EVA-CIME Entreprise sont issus de la spécification Structured Patterns Metamodel Standard (Object Management Group (OMG) 2017). Les principaux concepts retenus ici sont suffisants pour décrire un patron, son contenu et ses relations, gérer dans le temps et faire évoluer les instances issues de ce patron et garder une trace de l'utilisation de tout ou partie de ces éléments instanciés dans un ou plusieurs projets (Figure 56). Les définitions associées à ces éléments sont synthétisées dans le Tableau 19. Ces concepts sont illustrés dans deux exemples (Figure 57 et Figure 58) et leur manipulation est détaillée dans la démarche opératoire EVA-CIME entreprise.

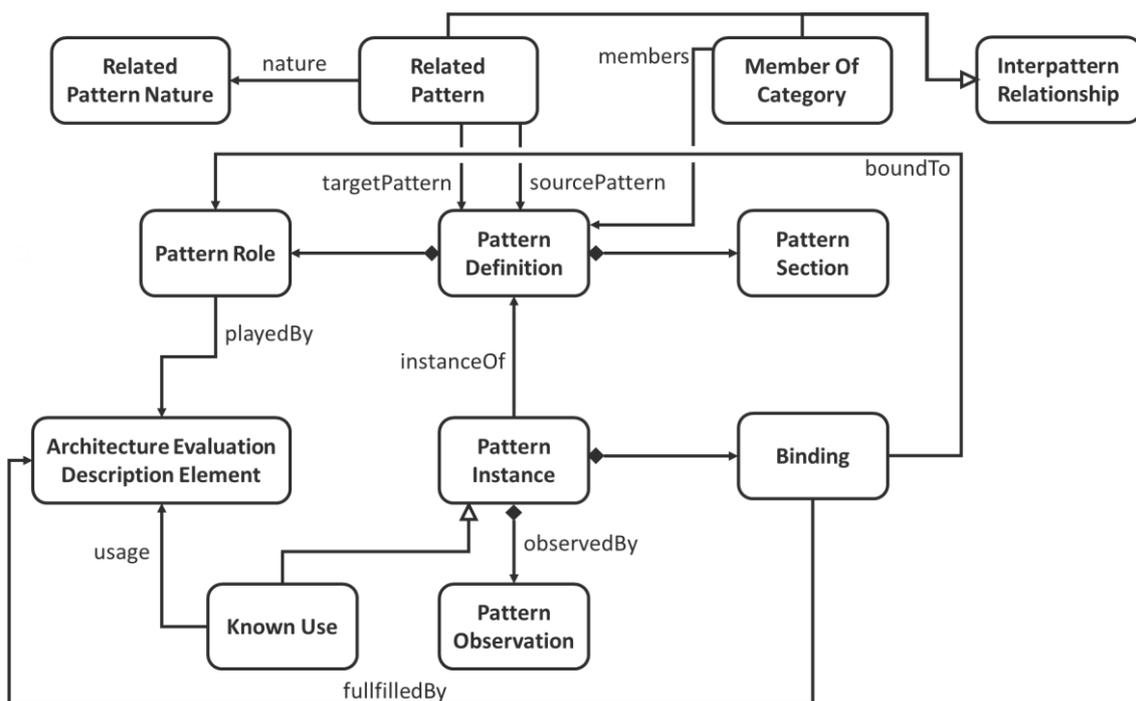


Figure 56. Concepts de pattern utilisés dans EVA-CIME Entreprise

Un élément de description d'architecture (*ArchitectureEvaluationDescriptionElement*) est un élément abstrait de généralisation pour tous les concepts utiles à décrire la mission de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture.

Tableau 19. Synthèse des concepts de patrons et définitions associées

CONCEPT	DEFINITION	EXEMPLE
Définition de patron - Pattern Definition	Une définition de patron permet de spécifier un patron. Elle représente la manière d'exprimer ce patron.	Patron de processus d'approbation
Instance de Patron - Pattern Instance	Une instance de patron représente un patron utilisé par les acteurs et associé à son expression concrète dans un modèle. Cette instance indique la définition de patron associée. Plusieurs instances de patron peuvent être associées à une unique définition de patron.	Processus d'approbation d'un modèle
Section de Patron - Pattern Section	Une section de patron est une description partielle d'une définition de patron. Celle-ci peut être textuelle ou alors être une ressource (p. ex. modèle, fichier, etc.) associée contenant la description de cette section de patron.	Nom
Participant du Patron - Pattern Role	Un patron est défini familièrement comme un ensemble de relations entre un ensemble d'entités. Les participants du patron décrivent l'ensemble des éléments au sein d'un patron, entre lesquels ces relations seront décrites.	Vérification
Liaison (Binding)	Une liaison associe un participant du patron avec un ou plusieurs éléments du modèle qui « joue ce rôle » pour une instance particulière de patron qui contient cette liaison. Les participants mis en relation doivent être des associés à la définition de patron dont l'instance de patron est l'instance.	Vérification

CONCEPT	DEFINITION	EXEMPLE
Observation de Patron (Pattern Observation)	Lorsqu'il est déterminé qu'une instance de patron existe (cela peut être fait au moment de l'instanciation si elle est volontaire ou après coup, par exemple, lors du stade de clôture), il est utile d'enregistrer quand, comment et par qui (humain)/quoi (outil d'analyse de modèle). Cet enregistrement est fait via une observation de patron. Ces informations peuvent permettre à un futur vérificateur de valider ou non que le patron ait bien été utilisé et de justifier sa possible obsolescence.	- observationDate = 30/09/2021 - observationMethod = Instanciation du patron - observationAuthor = J. Bourdon
Usage Connu (KnownUse)	Le concept d'usage connu décrit des exemples connus des instances de patron dans des situations réelles. Il est associé à une description et une référence vers une ressource (p. ex. modèle, répertoire projet, etc.).	Processus d'approbation de modèle pour la modélisation de flux de déchets
Relation entre Patron (Interpattern Relationship)	Une relation entre patron est une relation entre patrons et peut être spécialisée en une relation de patron connexe ou de membre de la catégorie. Les relations entre patrons définissent des classes pour permettre une recherche et une association sémantique dans un référentiel ou un catalogue de définition de patron. Une définition de patron peut avoir de multiples connexions avec des définitions de patrons connexes, c.-à-d. des patrons qui ont un lien, caractérisé par une nature, avec le patron source. Les définitions de patron peuvent également être regroupées en catégorie pour faciliter la recherche.	N/A
Patron Connexe (Related Pattern)	Le concept de patron connexe est une spécialisation d'une relation entre patron qui pointe une définition de patron source et une définition de patron cible qui sont connexes. Diverses natures peuvent être associées à ce concept.	Relation entre la définition de patron d'approbation et la définition de patron des rôles d'approbations

CONCEPT	DEFINITION	EXEMPLE
Nature de Patron Connexe (Related Pattern Nature)	La nature de patron connexe décrit la relation entre deux définitions de patron. À une nature est associé un nom et une description.	Requiert est un exemple de nature. Le Tableau 20 présente quelques exemples de nature.
Membre de la Catégorie (MemberOfCategory)	Le concept de membre de la catégorie est une spécialisation d'une relation entre patron permettant d'associer une définition de patron à une catégorie.	N/A

Tableau 20. Exemples de nature de relation entre patron

NOM DE LA NATURE	DESCRIPTION DE LA NATURE
Enfant	La définition de patron source est un composant de la définition de patron cible.
Requiert	La définition de patron source requiert la définition de patron cible.
RequisPar	La définition de patron source est requis par la définition de patron cible.
Variante de	La définition de patron source est une variante de la définition de patron cible (et vice versa)
Résout	La définition de patron source résout la définition de patron cible.

Un exemple d'instanciation du concept de *définition de patron* est illustré Figure 57.

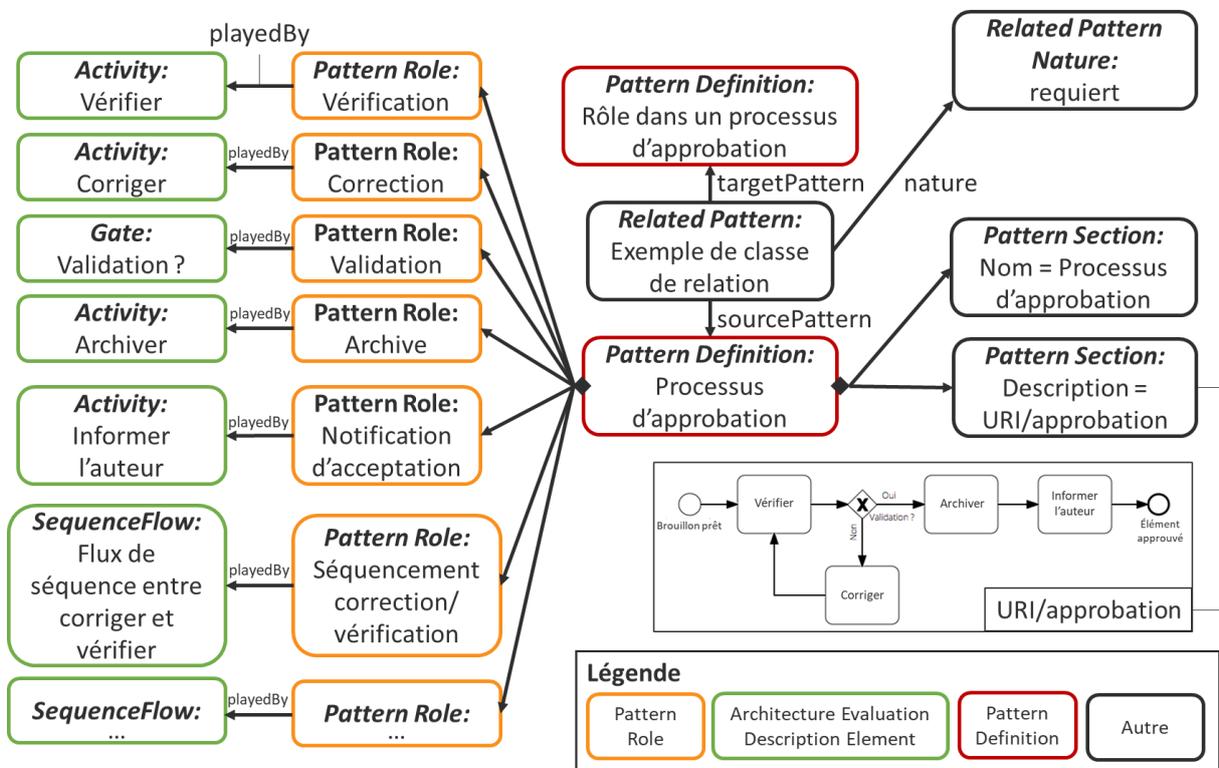


Figure 57. Exemple d'instanciation du concept de définition de patron pour un processus d'approbation

À cette *définition de patron* est associée une *section de patron* « Nom » et une *section de patron* « Description » autorisant à référencer (via son URI) un modèle illustratif. La *définition de patron* spécifie l'ensemble des *participants du patron* et les éléments de modèle qui participent. Cette *définition de patron* requiert une autre *définition de patron* qui spécifie les *définitions de rôle (RoleDefinition)* dans un processus d'approbation.

Un exemple d'instanciation du concept d'*instance de patron* est illustré Figure 58. Cette *instance de patron* est issue de la *définition de patron* précédente. Elle contient les liens entre les éléments du modèle et les *participants du patron*. De plus, elle contient également une *observation de patron* créée lors de l'instanciation du patron par l'auteur du modèle le 30 septembre 2021. Enfin, après validation (par exemple, lors de la clôture) que cette *instance de patron* est conforme aux spécifications de la *définition de patron* correspondante, elle est transformée en *usage connu* et viens documenter la *définition de patron*.

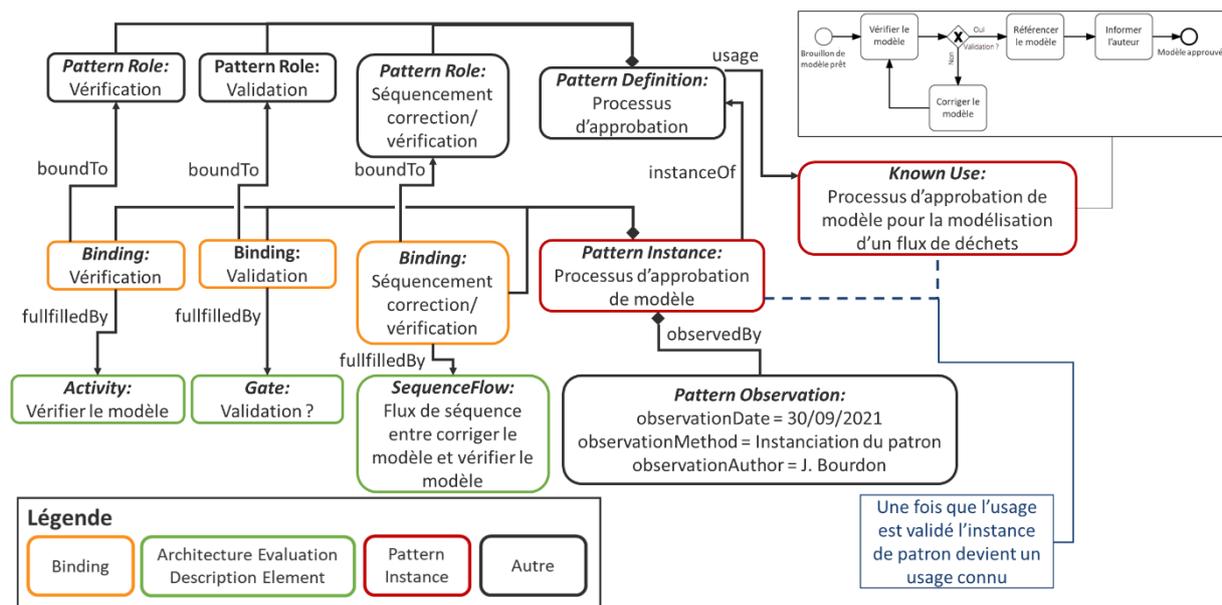


Figure 58. Exemple d'instanciation du concept d'instance de patron pour un processus d'approbation de modèle

4e - II.1.C. Modèle de maturité (Maturity Model)

Un modèle de maturité définit une échelle de mesure de la maturité. Cette dernière est une mesure de la capacité d'une organisation dans une discipline particulière, dans ce cas l'évaluation d'architecture. Ce modèle est utile pour apprécier le niveau de maturité actuelle de l'entreprise en évaluation d'architecture, cibler un niveau de maturité à atteindre à l'avenir ou encore apprécier le niveau de maturité exigée pour réussir un projet spécifique. De plus, il

inclut souvent des préconisations d'actions à mener pour passer au niveau de maturité suivant.

4e - II.2 Extension du cadre de description en support à EVA-CIME Entreprise

Pour rappel, le cadre de description qui supporte EVA-CIME Projet est constitué de deux axes. Le premier correspond aux questionnements et le second correspond aux étapes d'évaluation d'architecture. Pour supporter la capitalisation, la réutilisation et l'harmonisation de l'évaluation d'architecture, il est nécessaire d'étendre le cadre EVA-CIME Projet. Cette extension se traduit par l'ajout d'un troisième axe correspondant au niveau de prescription associé aux éléments modélisés. Le premier niveau de prescription correspond au cadre présenté dans le Chapitre 3. Deux autres niveaux viennent s'ajouter à celui, ainsi, on distingue les trois niveaux de prescription suivant:

- Ce qui est imposé par l'entreprise : il s'agit ici de regrouper les éléments dits de référence et qui doivent donc être obligatoirement ou optionnellement mis en application dans un projet en fonction par exemple de la stratégie de l'entreprise. Ce dernier est nommé le **niveau de référence (REFerence)**.
- Ce qui est préconisé, conseillé ou tout autre élément qui assiste la mise en œuvre, l'exécution et/ou la clôture de l'évaluation d'architecture sur un projet. Par hypothèse, tous les éléments de ce niveau respectent et sont conformes aux éléments du niveau de référence. Ce niveau est nommé le **niveau de conseil (ADVice)**.
- Ce qui est mis en œuvre sur les projets. Ce dernier est nommé le **niveau opérationnel (OPErational)**.

Ainsi, EVA-CIME Entreprise repose sur le parallélépipède schématisé Figure 59. Il est maintenant constitué de 45 points de vue chacun régissant une intersection des 3 axes. Sur la base de la convention de nommage proposée dans le chapitre précédent, la convention de nommage VP-X-Y-Z est utilisée, avec :

X = {WHY ; WHAT ; HOW ; WHO ; WHEN}

Y = {PREP ; EXE ; FIN}

Z = {REF ; ADV ; OPE}

Ce cadre est instancié une première fois, lors de l'initiation (c.-à-d. du premier déploiement) d'EVA-CIME Entreprise et son contenu est entretenu tout au long de la vie de l'entreprise.

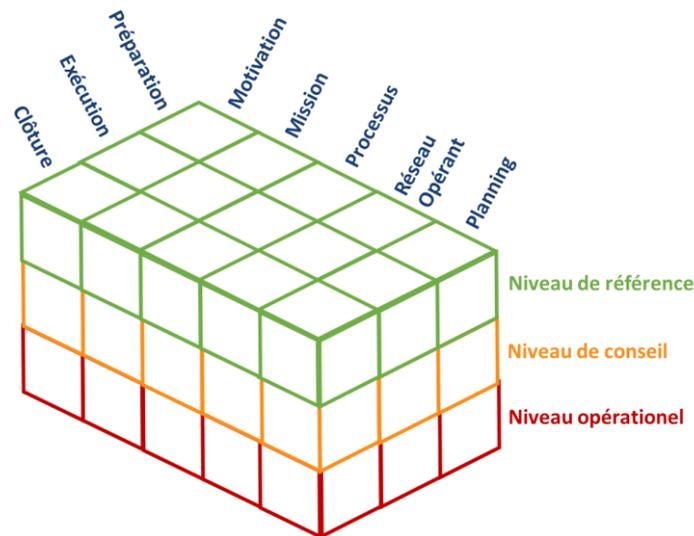


Figure 59. Cadre de description d'EVA-CIME Entreprise sous la forme d'un parallélépipède

Le niveau de référence est constitué dès que l'entreprise s'inscrit dans une démarche d'évaluation d'architecture et le niveau de conseil dès que l'entreprise s'inscrit dans une démarche de capitalisation et réutilisation pour l'évaluation d'architecture.

Le niveau opérationnel est constitué dès lors que l'évaluation d'architecture est mise en place sur un projet. Ce niveau est instancié pour chacun des projets de façon indépendante. Ainsi, il est constitué de l'ensemble des concepts EVA-CIME Projet présentés au chapitre précédent et comme illustré dans la Figure 60.

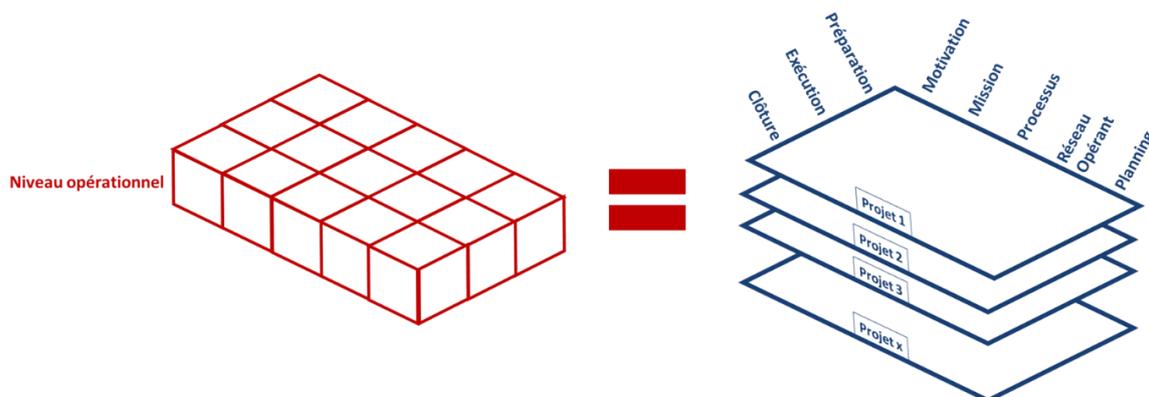


Figure 60. Lien entre le cadre EVA-CIME Projet et le cadre EVA-CIME Entreprise

Cette décomposition du niveau opérationnel est intégrée au parallélépipède comme illustré Figure 61

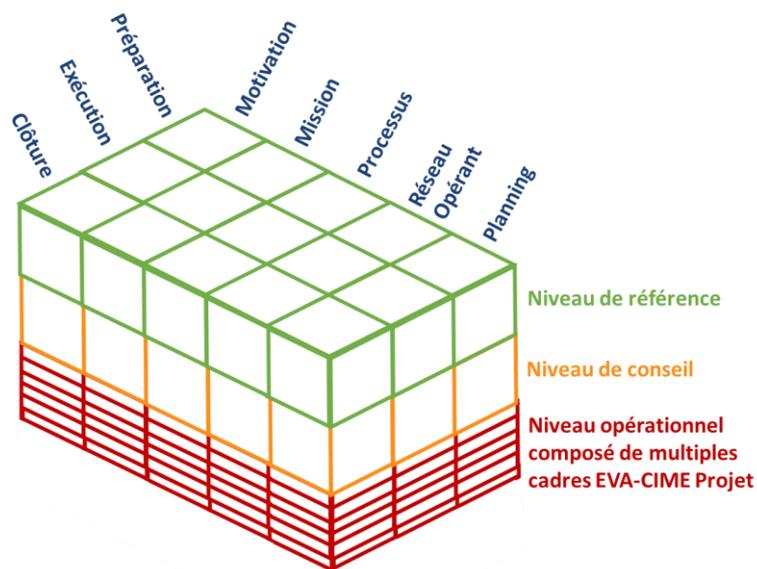


Figure 61. Cadre EVA-CIME du point de vue EVA-CIME Entreprise

Au final, le cadre complet de description d'EVA-CIME peut être représenté selon le point de vue de l'utilisateur EVA-CIME Entreprise (Figure 61) et également selon le point de vue de l'utilisateur d'EVA-CIME Projet (Figure 62) dans un contexte où EVA-CIME Entreprise est mise en œuvre

Lorsque EVA-CIME Entreprise est mise en œuvre, l'une des activités, détaillées dans la démarche opératoire, est d'initier le référentiel d'expertises et de connaissances. Ce référentiel pour un projet est alors constitué des niveaux de référence et de conseil et viendra supporter la démarche opératoire EVA-CIME Projet comme illustré (Figure 62).

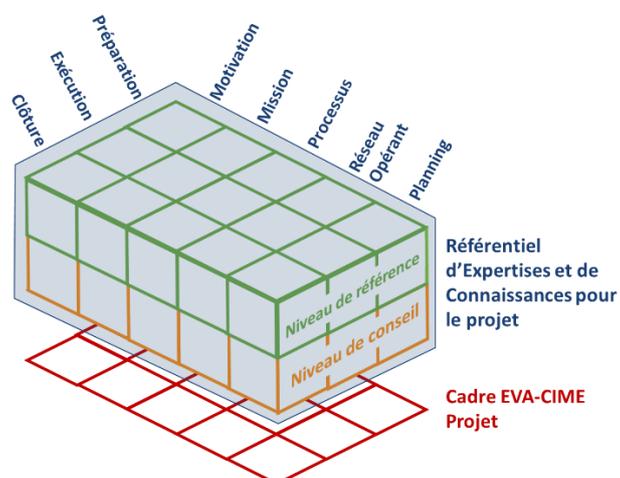


Figure 62. Cadre EVA-CIME du point de vue EVA-CIME Projet avec EVA-CIME Entreprise mise en œuvre

4e - II.3 Démarche opératoire d'EVA-CIME Entreprise

La démarche opératoire d'EVA-CIME se structure autour de trois processus et est modélisée sous la forme d'un diagramme BPMN (Object Management Group (OMG) 2012) dans la Figure 63.

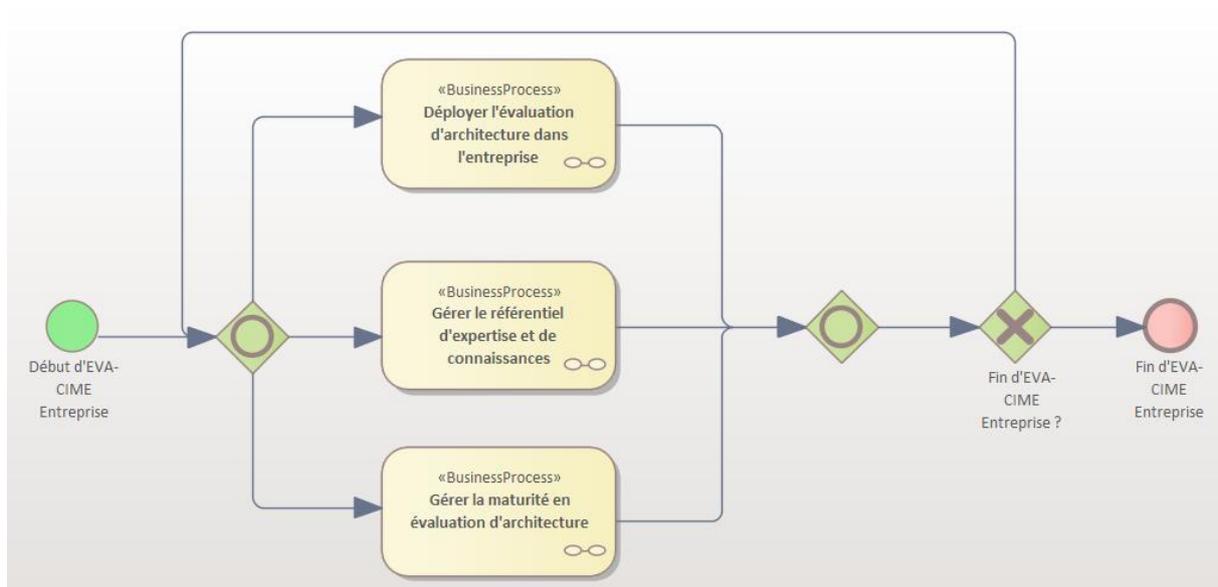


Figure 63. Démarche opératoire haut niveau d'EVA-CIME Entreprise

Ces processus se déroulent en parallèle et ont lieu tout du long de la mise en œuvre d'EVA-CIME entreprise, mise en œuvre qui dure la vie de l'entreprise ou si celle-ci fait le choix d'arrêter l'évaluation d'architecture. Les trois processus de cette démarche opératoire sont le déploiement de l'évaluation d'architecture (avec le pilotage de ce déploiement), la gestion du référentiel d'expertises et de connaissances et la gestion de la maturité en évaluation d'architecture.

4e - II.4 Déployer l'évaluation d'architecture en entreprise

Pour déployer l'évaluation d'architecture en entreprise, il est proposé d'exécuter le processus de déploiement tel que décrit dans la thèse (Cornu 2012). En effet ce processus, initialement développé pour le déploiement du MBSE et de l'IS en entreprise peut aisément être adapté pour l'évaluation d'architecture. Ce processus tel que présenté est générique pour le déploiement de tout processus et activités d'IS. L'évaluation d'architecture, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, est une de ces activités. Nous pouvons donc utiliser ce processus avec l'hypothèse où l'évaluation d'architecture est déployée.

Ce processus de déploiement met en avant cinq activités essentielles :

- Lors de l'**initiation** est défini le projet de déploiement de l'évaluation d'architecture qui permettra de décider si le déploiement est pertinent ou non.
- Lors de la **capture**, l'ensemble des connaissances externes et internes de l'entreprise sur l'évaluation d'architecture sont récoltées et viennent alimenter le référentiel d'expertises et de connaissances.
- Lors de la **conception**, l'évaluation d'architecture est instanciée dans le contexte de l'entreprise sur la base de spécifications telles que celles fournies dans (ISO, IEC, and IEEE 2019a; 2019b) pour l'évaluation d'architecture. De plus l'ensemble des activités d'évaluation d'architecture à déployer est défini ainsi que tous ce qui les supportent.
- Lors du **déploiement** effectif, ces activités sont mises en place concrètement. Cette mise en place doit s'accompagner d'un support aux personnes affectées par ce déploiement et d'encourager une acculturation de l'évaluation d'architecture.
- Finalement, lors de l'**évaluation** de la réussite du déploiement est évaluée pour savoir si les activités déployées sont à pérenniser ou à retravailler.

L'adaptation des activités proposées par (Cornu 2012) pour le déploiement de l'évaluation d'architecture est illustré Figure 64 en comparaison des activités originales. Ces activités sont celle du processus « Déployer l'évaluation d'architecture en entreprise » de la Figure 63.

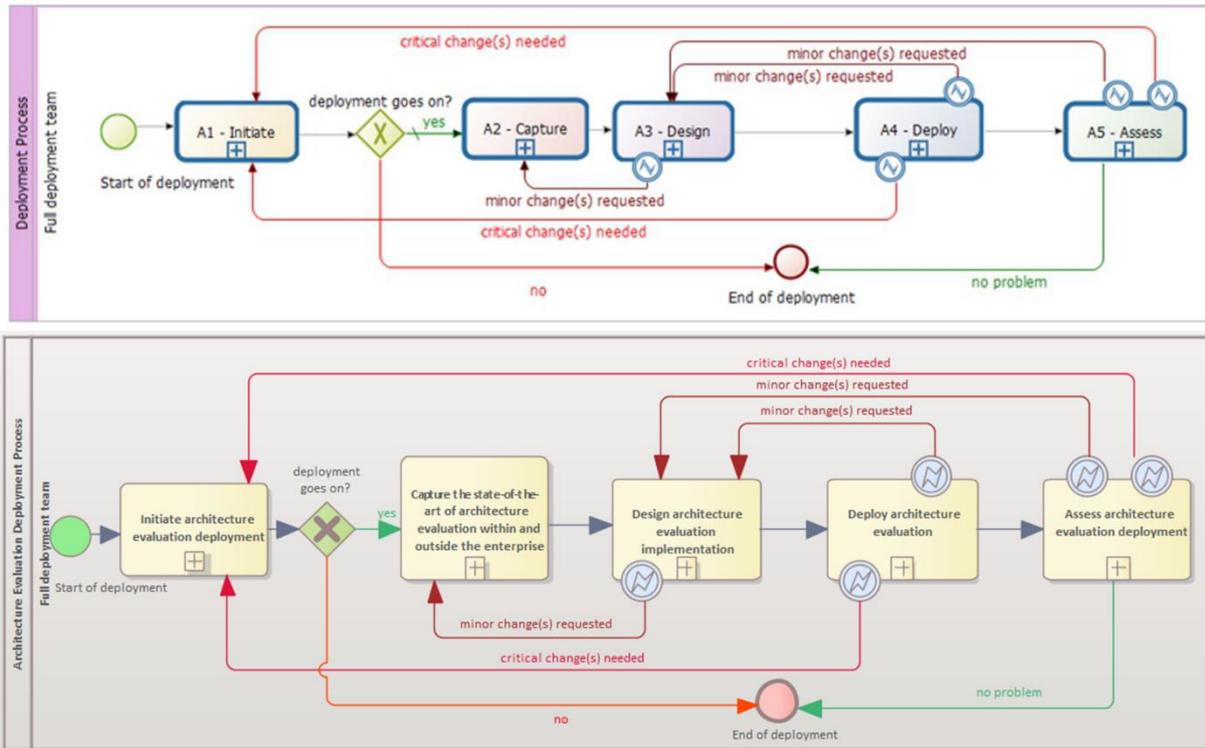


Figure 64. Processus de déploiement proposé par (Cornu 2012) et adaptation de ce processus pour le déploiement de l'évaluation d'architecture

4e - II.5 Gérer le référentiel d'expertises et de connaissances

4e - II.5.A. Initialiser un référentiel d'expertise et de connaissances

Dans un premier temps il est nécessaire d'initialiser une première fois ce référentiel de connaissance. Cette initialisation passe par l'initialisation du niveau de conseil et l'initialisation du niveau de référence. Lors de l'activité de capture, l'objectif est de capturer et formaliser l'ensemble des connaissances sur l'évaluation d'architecture internes et externes à l'entreprise. Afin de mener une identification préliminaire des connaissances en évaluation d'architecture, un formulaire est proposé. Celui-ci permet de savoir si la personne interrogée à déjà ou non participé à de l'évaluation d'architecture. Dans un second temps l'objectif est de connaître les activités réalisées et leur fréquence (analyse de performance, analyse de coûts, etc.), les méthodes utilisées et leur fréquence (Analyse de performance fonctionnelle, analyse de coûts de production, etc.). Enfin, il permet d'obtenir une première appréciation du niveau de compétence sur des approches et méthodes d'évaluation d'architecture. Le formulaire vierge est fourni en Annexe E ainsi qu'une synthèse des réponses obtenues à ce formulaire

4e - II.5.A.a. Initialiser le niveau de conseil du référentiel d'expertises et de connaissances

Les résultats de l'activité de capture lors du déploiement sont utilisés pour initialiser le contenu du référentiel d'expertises et de connaissances. En effet, les différentes méthodes, approches, organisations, etc. considérées comme pertinentes et à partager, viennent alimenter le référentiel de connaissances et d'expertises. Les informations ainsi récoltées par l'équipe en charge du déploiement de l'évaluation d'architecture peuplent le niveau de conseil du cadre EVA-CIME dans la cellule correspondante et permettront de constituer un premier réseau de définition de patron comme illustré Figure 65.

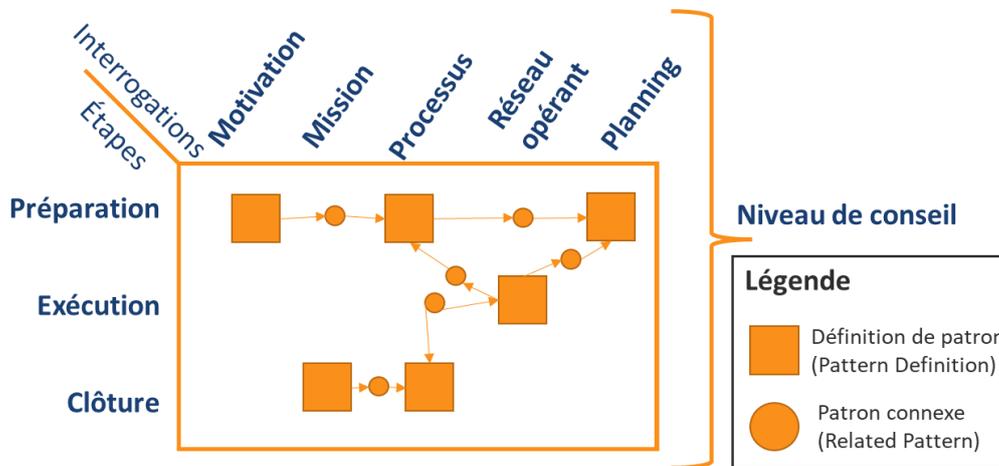


Figure 65. Exemple de réseau de définition de patron dans le niveau de conseil

Quelques exemples de définition de patron pour chacune des cellules du cadre EVA-CIME Entreprise et instanciables lors d'EVA-CIME Projet sont donnés dans le Tableau 21. Un extrait de la définition du patron d'activités d'évaluation de l'efficacité est illustré Figure 66.

Tableau 21. Quelques exemples de patron pour chaque cellule du prisme EVA-CIME dans le niveau de conseil

IDENTIFIANT DE LA CELLULE	EXEMPLE DE DEFINITION DE PATRON
VP-HOW-PREP-ADV	Patron d'activités d'évaluation de l'efficacité (Lô 2013)
VP-HOW-EXE-ADV	Patron de décomposition des tâches d'une activité d'analyse d'incertitude
VP-HOW-FIN-ADV	Patron de retour d'expérience sur un processus
VP-WHO-PREP-ADV	Patron de rôles pour l'utilisation d'ESTRADE (voir Chapitre 5)
VP-WHO-EXE-ADV	Patron de résultats d'appréciation de la valeur
VP-WHO-FIN-ADV	Patron de retour d'expérience sur la méthode d'évaluation ESTRADE (voir Chapitre 5)

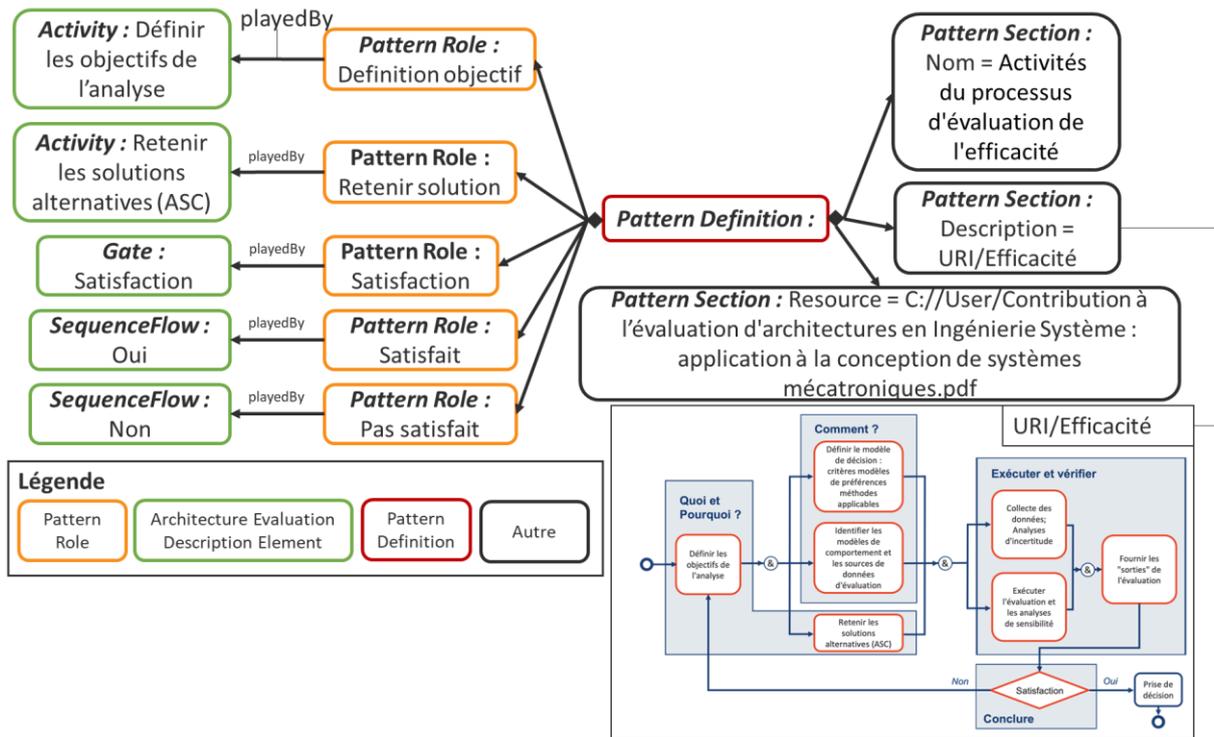


Figure 66. Extrait de la définition de patron pour les activités d'évaluation de l'efficacité

4e - II.5.A.b. Initialiser le niveau de référence du référentiel d'expertise et de connaissances

Lors de l'activité de conception du processus de déploiement de l'évaluation d'architecture, il est intéressant d'intégrer les éléments définis à intégrer dans le niveau de référence du référentiel d'expertises et de connaissances. Ainsi, de la même façon qu'au niveau de conseil, un réseau de définition de patrons est constitué. Par exemple, s'il existe dans le niveau de référence un patron d'activités d'analyse de coûts d'exploitation, toutes les analyses de coûts de conception modélisées au niveau opérationnel doivent être conformes à cette définition de patron. Un exemple des liens entre instances de patron et définitions de patrons selon les niveaux de prescription est illustré Figure 71.

4e - II.5.B. Capitaliser sur l'évaluation d'architecture et ajouter des éléments au référentiel

Certaines activités pratiquées à l'échelle locale (projet), le sont également à l'échelle entreprise, notamment l'activité d'actualisation du REC. Il peut s'agir également de la communication du retour d'expérience projet au niveau entreprise, de la capitalisation de l'évaluation d'architecture Projet une fois celui-ci clôturé pour intégrer les éléments

intéressants dans le niveau de conseil du REC ou, si c'est pertinent, en faire un nouveau standard de l'entreprise et les intégrer dans le niveau de référence du REC et ainsi les diffuser aux autres projets. Ce passage d'activités portées par le projet vers des activités portées par l'entreprise se transcrit par des concepts aux niveaux de conseil et de référence, ces concepts sont illustrés Figure 67 sur la base de l'exemple d'instanciation de la Figure 52.

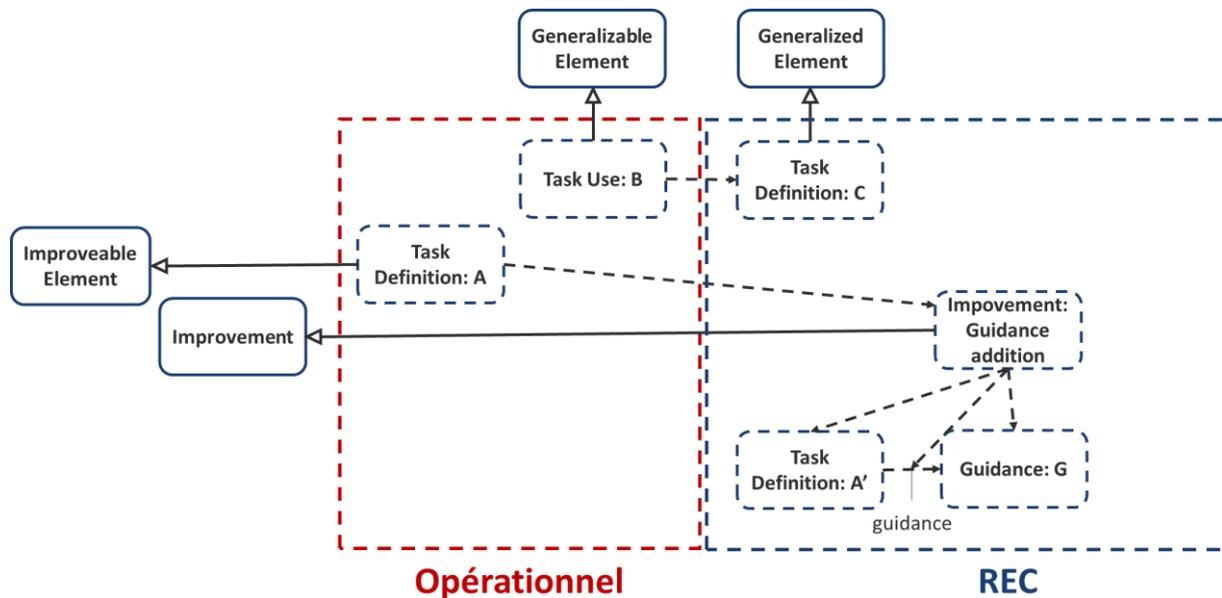


Figure 67. Concepts des niveaux de conseil et de référence permettant de capitaliser sur les suggestions d'amélioration et de généralisation

Par exemple lors de l'exécution de l'évaluation d'architecture et plus particulièrement lors de la récolte du retour d'expériences des lacunes en conseils sont observées pour une *définition de tâche A*. S'ensuit alors une activité, qui peut avoir lieu en parallèle du reste des activités d'évaluation d'architecture, réalisée par le support en EA. Cette activité aboutit à la création d'un guide de réalisation de cette tâche (Guidance G). Une nouvelle *définition de tâche* est créée et intègre cette amélioration dans le modèle. Cette nouvelle *définition de tâche* pourra alors être utilisée, dans un premier cas, dans une nouvelle itération de l'évaluation d'architecture sur le projet et remplacer l'ancienne *définition de tâche*. Ce remplacement est réalisable grâce au concept de variabilité (*Variation*) de SPEM. Ce remplacement est illustré dans la Figure 68. Lors de l'utilisation de la variabilité l'auteur de la modification doit particulièrement être vigilant à l'impact de ce changement sur le reste de l'unité d'organisation.

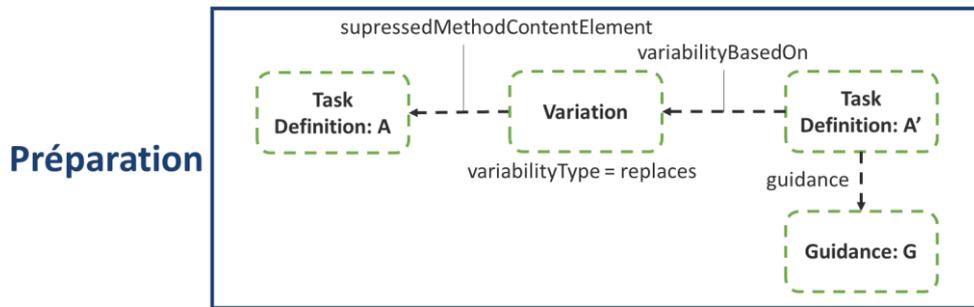


Figure 68. Exemple d'insertion d'une amélioration d'une définition de tâche en préparation

Dans un second cas, ces suggestions peuvent entraîner la création de nouvelles définitions de patron dans le REC, comme illustré Figure 69.

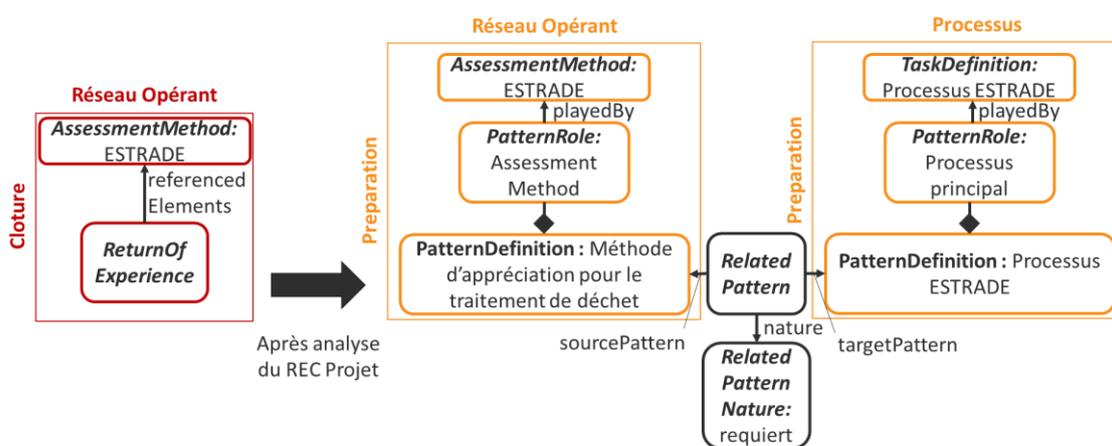


Figure 69. Analyse du REC EVA-CIME Projet menant à la définition d'un patron dans le REC EVA-CIME Entreprise

4e - II.5.C. Utiliser des éléments du référentiel d'expertises et de connaissances

Les éléments présents dans le référentiel d'expertises et de connaissance peuvent lors de la mise en œuvre d'EVA-CIME Entreprise être instancié et ainsi guidé l'utilisateur. Un exemple de cette instanciation est illustré Figure 69.

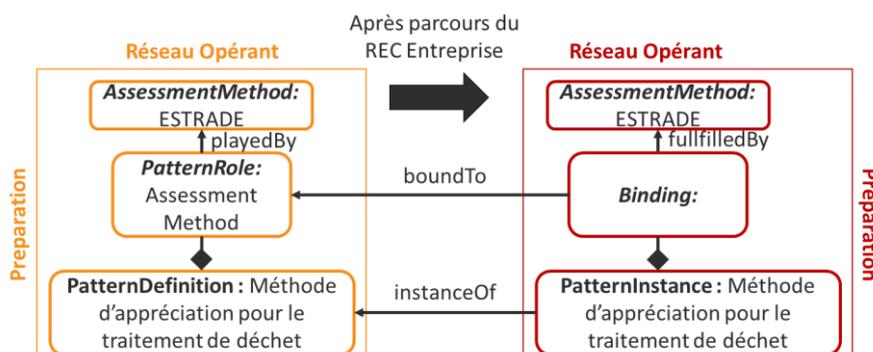


Figure 70. Utilisation d'éléments définis dans le niveau de conseil pour construire le niveau opérationnel

Nous distinguons trois cas possibles d'instanciation d'une définition de patron. Le premier cas est l'instanciation d'une définition de patron depuis le niveau de conseil et cette définition de patron est conforme à une définition de patron du niveau de référence (Figure 71).

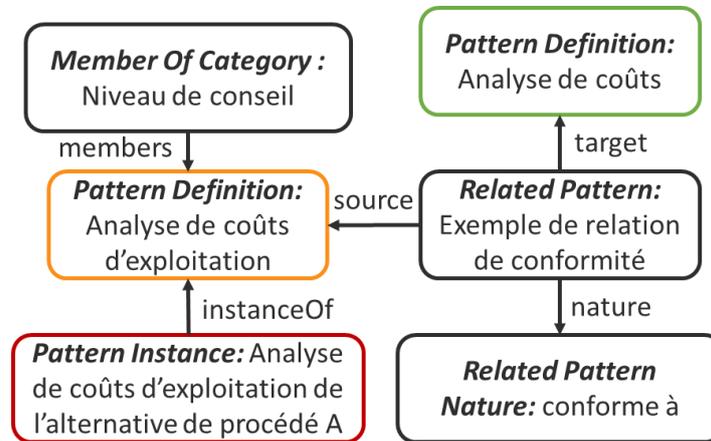


Figure 71. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de conseil conforme à un patron du niveau de référence

Le deuxième cas est l'instanciation d'une définition de patron directement depuis le niveau de référence dans le niveau opérationnelle (Figure 72).

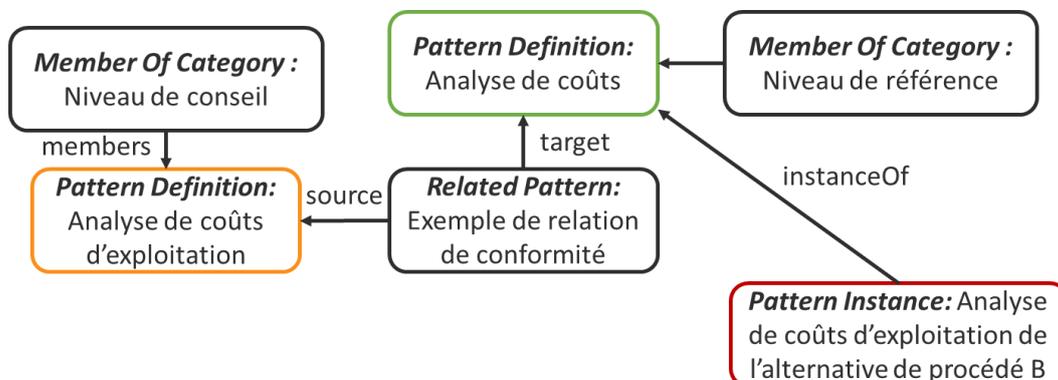


Figure 72. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de référence

Le troisième cas est l'instanciation d'une définition de patron depuis le niveau de conseil sans forcément que celui-ci soit conforme à une définition de patron particulière du niveau de référence (Figure 73).

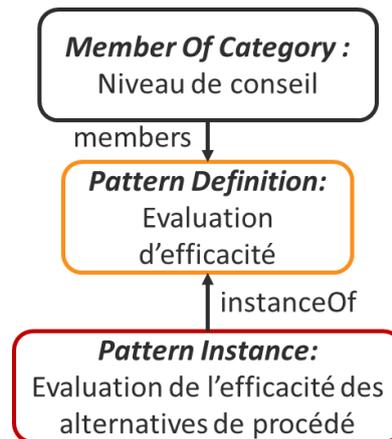


Figure 73. Exemple d'instanciation d'un patron du niveau de conseil

4e - II.6 Gérer la maturité en évaluation d'architecture

Le modèle de maturité présenté dans la suite est une première version réalisée par analogie avec l'approche présentée dans (Gouyon et al. 2009). Il vise l'évaluation d'architecture mais n'intègre pas actuellement les notions de risques et de préconisations telles que mises en avant dans le Capability Maturity Model Integration (CMMI) (CMMI Product Team 2010) et (Gouyon et al. 2009). Ce modèle de maturité doit donc encore évoluer pour être autant que possible conforme aux principes du CMMI.

Sur la base des éléments présentés dans (Gouyon et al. 2009) sur le processus d'IVV, il est proposé d'établir un premier modèle d'évaluation de la maturité de l'évaluation d'architecture au sein de l'entreprise qui repose sur cinq considérations :

- Organisation : des responsabilités entre les différentes unités d'organisation de l'entreprise concernées dans l'évaluation d'architecture doivent être définies. De plus, l'entreprise doit être en mesure et en capacité de diffuser, de sensibiliser et de former les membres des unités d'organisation concernées et, à plus long terme, de toutes les unités et collaborateurs (internes comme sous-traitant par exemple) de l'entreprise, en termes de culture et de pratique de l'évaluation d'architecture pour la rendre systématique sur les projets ;
- Méthodes : des méthodes spécifiques doivent être identifiées et/ou développées pour être intégrées dans un référentiel commun et partagé dans tous les projets ;
- Processus : des processus d'évaluation d'architecture doivent être généralisés et déployés sur l'ensemble des projets de conception ;

- Compétences : les compétences en évaluation d'architecture doivent être identifiées et associées aux personnes les possédant. Ces compétences doivent être entretenues et disséminées au sein de l'entreprise ;
- Moyens : Des moyens matériels et logiciels doivent être identifiés, installés et gérés dans le temps pour assister et supporter l'évaluation d'architecture. Ces moyens doivent être de même budgétisés et harmonisés le plus possible en phase avec le système d'information de l'entreprise.

Pour aider l'entreprise situer et faire évoluer ses pratiques d'évaluation, une échelle de maturité de la capacité à mener des évaluations d'architecture sur tout le cycle de développement est proposée. L'échelle de maturité proposée est décrite Tableau 22.

Un des prérequis à l'utilisation de cette échelle est d'obtenir un consensus sur la notion et la pratique des architectures. Cette échelle est progressive et fondée sur six niveaux de maturité. Le niveau 1 est représentatif d'une organisation qui n'a pas connaissance ni de maîtrise du processus d'évaluation d'architecture et le niveau 6 est représentatif d'une organisation suffisamment mature qui a constitué un système de capitalisation, de dissémination et d'amélioration robuste de l'évaluation d'architecture. A ce dernier niveau, l'entreprise est de fait même en capacité d'accompagner ses partenaires et clients pour acquérir à leur tour cette maturité. Pour chaque intersection entre les axes et niveaux de maturité sont associés des indicateurs pour évaluer l'organisation par rapport à cette échelle. Pour élaborer ces niveaux et indicateurs, une interview a été menée sur la base d'une liste de questions proposant à chaque collaborateur interrogé de faire sa propre auto-évaluation. Ces questions ont été élaborées sur la base de (Blokdyk 2020) et peuvent être retrouvées en Anne.

Tableau 22. Modèle de maturité pour l'évaluation d'architecture (inspiré par (Gouyon et al. 2009))

NIVEAU	ORGANISATION	APPROCHES ET METHODES	PROCESSUS	COMPETENCES	MOYENS
1 - Individuel	L'entreprise n'est pas sensibilisée à l'évaluation d'architecture	Les évaluations restent du ressort de chaque ingénieur de conception et sont menées de façon tacite ou explicite, isolément.	L'évaluation n'est pas considérée comme nécessaire au sein des projets de conception et n'est pas identifiée comme activité du projet.	Aucune compétence en évaluation d'architecture est identifiée.	Aucun moyen (p. ex. modèle, outil de calcul, appui ponctuel sur des experts, sensibilisations des parties prenantes) pour faire de l'évaluation d'architecture n'est identifié
2 - Sensibilisé	L'entreprise est sensibilisée à l'évaluation d'architecture	Dans certains projets, des approches et méthodes sont proposées, voire préconisées aux ingénieurs et au chef de projet (moyenne arithmétique pondérée, etc.).	Des activités d'évaluation d'architecture sont formalisées et mises en œuvre dans certains projets de conception. Des rapports d'évaluation apparaissent dans des études et documents de conception.	Compétences élémentaires et//ou empiriques en évaluation d'architecture sur les méthodes/techniques. Formation partielle établie sur la volonté individuelle.	Les moyens sont identifiés pour certains projets, mais ne sont pas budgétés, managés, ni maintenus.

NIVEAU	ORGANISATION	APPROCHES ET METHODES	PROCESSUS	COMPETENCES	MOYENS
3 - Pratique	L'entreprise a défini des bonnes pratiques en évaluation d'architecture	Des approches et méthodes sont préconisées et partagées entre toutes les parties prenantes de tous les projets, par exemple, pour : Définir des objectifs ; Constituer l'équipe ; Choisir des modèles ; Procéder à des analyses de sensibilité ; Synthétiser des résultats.	Une gestion et la conduite d'évaluations d'architecture orchestrant les activités d'évaluation d'architecture sont formalisées et mises en œuvre dans certains projets de conception.	L'évaluation d'architecture est une compétence reconnue établie à partir des connaissances techniques et de pratiques internes à l'entreprise (référentiel interne de connaissances de types, réglementation/normes, processus, outils, méthodes). Formations proposées sur la base de ce référentiel interne par d'autres parties prenantes de l'entreprise.	Les moyens sont identifiés au niveau de l'entreprise. Le temps consacré à l'évaluation est explicitement estimé pour chaque projet : appel systématique à des experts métiers ; à de la modélisation ; à de la simulation...
4 - codifié	L'entreprise recommande ou impose des pratiques d'évaluations d'architectures selon les normes	Les approches et méthodes sont choisies et mises en œuvre avec les parties prenantes en fonction du contexte, de l'effort d'évaluation d'architecture (type et nature du système, durée de l'évaluation, besoins d'évaluation, objectifs d'évaluation, etc.). Les acteurs tracent les résultats de chaque effort d'évaluation	Une gestion et conduite d'évaluation est généralisée à tous les projets et stades de l'ingénierie, depuis l'analyse du besoin jusqu'à la définition détaillée de la solution.	L'évaluation d'architecture est une compétence reconnue établie sur des connaissances techniques et de pratiques (référentiel normatif de type : ISO 42030, ISO 15288, etc.). Formations reconnues, éventuellement certifiantes proposées par l'entreprise et dispensées par des organismes externes.	Certains moyens sont régis et entretenus au niveau de l'entreprise. La conformité des moyens aux besoins des projets n'est pas nécessairement justifiée et n'est pas actualisée tout au long de la vie du projet.

NIVEAU	ORGANISATION	APPROCHES ET METHODES	PROCESSUS	COMPETENCES	MOYENS
5 - Systématisé	L'évaluation d'architecture est menée en équipe sur toutes les phases des projets de conception de l'entreprise, depuis l'architecting jusqu'à la réalisation. Des unités d'organisation d'évaluation d'architecture sont mises en place par projet.	Les approches et méthodes sont identifiées, choisies et enchainées logiquement dans le temps par les acteurs en assurant la traçabilité et la cohérence des résultats globaux de tous les efforts.	L'évaluation d'architecture permet de justifier, de tracer et d'analyser les impacts de toutes décisions prises lors la conception. Des plans et des rapports d'évaluation sont mis en place systématiquement.	Une culture de l'évaluation d'architecture est présente, entretenue et valorisée dans l'entreprise.	Les moyens sont budgétisés, régis et entretenus. Les moyens passent par une acceptation, mais ne sont pas systématiquement documentés. Les besoins et les moyens correspondants sont actualisés tout au long de la vie du projet. Les moyens sont mis en commun entre les projets de conception.
6 - capitalisé	Une organisation dédiée au sein de l'entreprise capitalise les informations et améliore constamment les connaissances et pratiques en évaluation d'architecture, impliquant et déployant chez les partenaires tout ou partie du processus d'évaluation.	Les approches et méthodes mises en œuvre dans des activités sont évaluées et améliorées en continu. Les méthodes et l'expertise sont généralisables et partageables avec les partenaires.	L'évaluation d'architecture est évaluée et améliorée en continu. Un retour d'expérience permet une capitalisation et le partage des meilleures pratiques d'évaluation.	Il y a une expertise et une capitalisation de la connaissance donnant la capacité à l'entreprise de former des parties prenantes internes et des partenaires (client, sous-traitant, etc.).	Les moyens passent par une acceptation documentée. Les moyens sont administrés et mis à disposition des partenaires. Les moyens sont optimisés par rapport aux objectifs de l'organisation : coût, disponibilité, efficacité, etc.

4e - III. Conclusion

Tout d'abord ont été présentés les concepts d'EVA-CIME Entreprise qui complètent les concepts d'EVA-CIME Projet avec les notions de référentiel d'expertises et de connaissances, de patrons et de modèle de maturité.

Ensuite le cadre de description présenté dans EVA-CIME Projet est étendu pour couvrir les besoins d'EVA-CIME Entreprise ajoutant un nouvel axe de description, les niveaux de prescription. Ces niveaux sont le niveau opérationnel (instanciation projet), le niveau de conseil (conseils et recommandations proposés par l'entreprise et instanciables en projet) et le niveau de référence (les éléments sont imposés par l'entreprise).

La démarche opératoire d'EVA-CIME Entreprise est ensuite détaillée et s'articule autour de trois processus.

Le processus de déploiement permet d'initier le déploiement, capturer les connaissances internes et externes, concevoir et finalement déployer l'évaluation d'architecture entreprise.

En parallèle le processus de gestion du REC permet d'initialiser ce dernier. Cette initialisation passe par l'initialisation du niveau de conseil et l'initialisation du niveau de référence. De plus, le processus de gestion permet de capitaliser sur les efforts précédents pour y ajouter des éléments, et enfin utiliser ces éléments dans en projet.

Enfin le processus de gestion de la maturité s'accompagne d'une première version de modèle de maturité définissant 6 niveaux pour apprécier la maturité en évaluation d'architecture de l'organisation, des méthodes, des processus, des moyens et des compétences.

Le chapitre suivant propose un cas d'application.

Chapitre 5e - Application d'EVA-CIME

5e - I. Introduction

Ce chapitre illustre une application pratique d'EVA-CIME, durant la phase d'Avant-Projet Sommaire (APS) d'une installation de traitement de déchets qui sont présentés dans un premier temps. Dans un second temps, l'étape de préparation d'EVA-CIME Projet (cf. Chapitre 3e) est illustrée sur ce cas d'application avec différents résultats discutés au fur et à mesure. Il est apparu nécessaire de bâtir une méthode spécifique en appliquant EVA-CIME, pour l'évaluation d'architecture de telles installations. Cette méthode porte alors le nom d'ESTRADE pour l'Étude de Scénario de TRAIement de Déchets. Ses composantes sont donc présentées et les résultats de l'étape d'exécution d'EVA-CIME Projet réduite à ESTRADE sont détaillés. Ensuite, l'étape de clôture d'EVA-CIME permet de mettre en évidence les gains identifiés, le retour d'expérience et les améliorations possibles d'ESTRADE. En conclusion, une première expérimentation d'alimentation du REC EVA-CIME Entreprise avec les résultats obtenus est présentée.

5e - II. Présentation du cas d'application

La méthode EVA-CIME a été ici mise en œuvre en parallèle d'un projet réel et déjà démarré d'installation nucléaire, en essayant de ne pas avoir d'impact sur le planning et les ressources de ce dernier. Cette mise en œuvre est donc partiellement fictive bien que basée sur des données réalistes, mais elle permet d'évaluer et de comparer les résultats réels et ceux rendus possibles avec EVA-CIME avec un certain niveau de confiance et de fidélité au cas réel.

La mise en œuvre d'EVA-CIME s'inscrivait dans un contexte où le MBSE était également en expérimentation sur le projet. Une équipe avait la charge de cette expérimentation, nommée ci-après équipe de déploiement du MBSE.

Le périmètre de l'expérimentation d'EVA-CIME s'est restreint à l'évaluation du zonage radiologique contribuant à la définition des attendus de sûreté. Les objectifs pour les acteurs du projet et sponsors de cette expérimentation étaient de savoir si EVA-CIME permettait de :

- Mieux maîtriser les impacts inter-métier pour le coordinateur ;
- Identifier rapidement les conflits entre différentes spécifications de l'installation ;
- Améliorer les supports de communication avec le client ;
- Assister les spécificateurs métiers lors des études ;
- Identifier, analyser et pallier l'impact d'un changement de données d'entrée sur les études.

Certains mots de vocabulaire étant propres au domaine du cas d'application, un lexique est proposé dans le Tableau 23.

Tableau 23. Lexique du cas d'application

TERME	DESCRIPTION
Procédé	Un procédé est une activité ayant des éléments d'entrées (matières premières ou personnes) et des éléments de sorties (produits finis ou personnes). Il y a donc transformation d'objets (ici des déchets) ayant certaines caractéristiques en entrée et d'autres en sortie.
Nombre LPCA	Il s'agit d'une valeur numérique associée à une pièce. Elle est calculée, entre autres, à partir de l'activité radiologique totale et du volume du local étudié. Le LPCA est nécessaire pour déterminer le zonage radiologique. Il permet de pré-évaluer les risques résultant de la contamination atmosphérique et de mettre en place les dispositions pour limiter ces risques.
Activité Radiologique Totale	L'activité radiologique totale d'un local correspond au nombre de désintégration par unité de temps et par unité de volume. Elle s'exprime en Bq/m ³ .
Scénario de traitement de déchets	Regroupe les fonctions, équipements et flux impliqués dans un procédé de traitement de déchets.
Zonage radiologique (Classe de confinement)	Catégorie normalisée définissant les mesures de confinement à mettre en place. Ces classes se notent de C1 à C4, C4 correspondant à la catégorie nécessitant le plus de mesures et de contraintes.

La mission de cette installation est de conditionner les déchets en les adaptant aux normes (dimensionnelles, radiologiques et physico-chimiques) des différents exutoires de stockage ou d'entreposage qui les recevront une fois conditionnés. Ce projet est au stade de l'avant-projet. Différents concepts d'EVA-CIME sont alors mis en avant et des architectures

alternatives de solution de conditionnement sont proposées en tenant compte des préoccupations suivantes des parties prenantes :

- Faisabilité : Le système est-il réalisable ?
- Financier : Les coûts sont-ils acceptables ?
- Fonctionnel : comment traiter les déchets en tenant compte de toutes les spécificités ?
- Non fonctionnel : combien de temps un déchet passe-t-il entre sa réception et son expédition ? Les opérateurs sont-ils toujours en sécurité ? Quels sont les impacts du mouvement des déchets dans l'installation sur l'accessibilité des salles de traitement à distance ?

EVA-CIME doit donc guider et aider à l'évaluation des alternatives qui, bien qu'abstraites, représentent des voies futures possibles qui seront alors détaillées et éventuellement confortées dans la phase de conception suivante. En d'autres termes, ces solutions d'architecture devront à leur tour être évaluées à nouveau selon les principes d'EVA-CIME.

5e - III. Application d'EVA-CIME Projet

5e - III.1 Application de l'étape de préparation d'EVA-CIME Projet

La première étape consiste à préparer l'évaluation d'architecture et donc exécuter l'activité de préparation d'EVA-CIME Projet tel que décrit dans le Chapitre 3.

5e - III.1.A. Initier et ajuster EVA-CIME pour les besoins du projet

Pour assister l'utilisateur d'EVA-CIME, un patron de structuration en dossier du projet de modélisation de l'évaluation d'architecture est proposé dans EVA-CIME et instancié dans le projet. Un extrait de ce patron et de l'instance associée sont illustrés Figure 74.

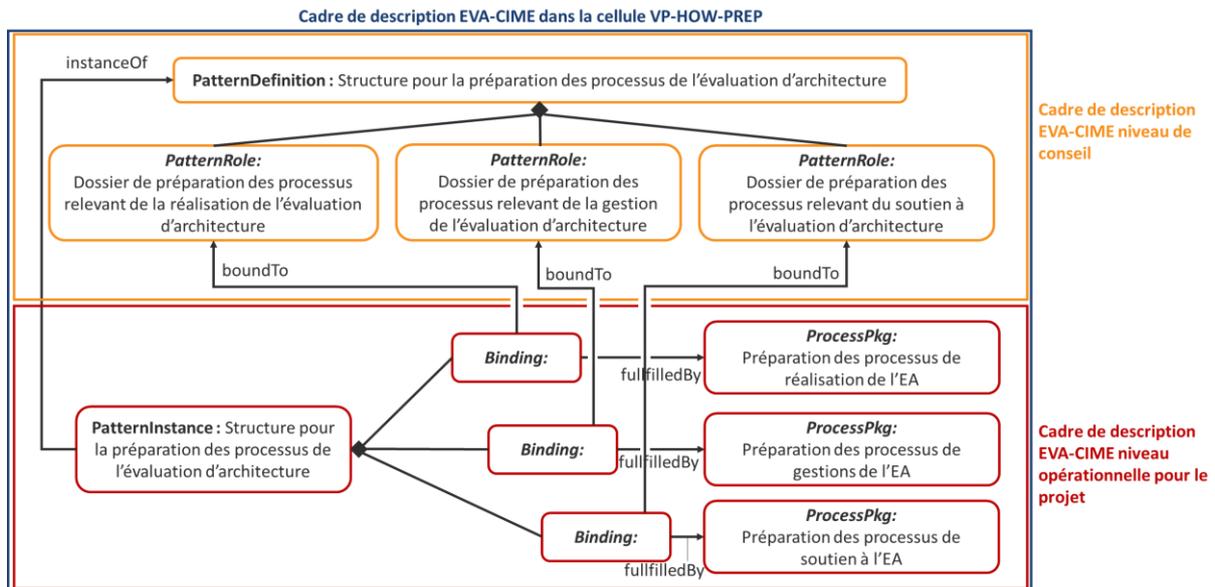


Figure 74. Extrait d'un patron de structuration de projet de modélisation d'évaluation d'architecture.

Une fois la structure du projet de modélisation établie, il faut s'accorder sur les langages à utiliser. En termes de langages de modélisation, les acteurs du projet sont familiers du langage implémenté dans Capella. L'outillage implémentant tous les langages d'EVA-CIME dans un environnement unique n'étant pas développé à ce stade : le choix est donc fait de se limiter à l'utilisation des langages présents dans cet outil CAPELLA, notamment pour définir l'unité d'organisation. L'attribution des langages aux différentes vues est synthétisée dans le Tableau 24.

Tableau 24. Personnalisation du cadre de modélisation fourni en support à EVA-CIME pour le cas d'application

Point de vue d'EVA-CIME	Langages disponibles (model kinds) dans Capella (Roques 2018; Voirin 2017)
Motivation	Operational Capabilities diagram
Mission	Mission Blank diagram
Processus	Operational Activity Interaction diagram, Functional Dataflow Blank diagram
Réseau opérant	Operational Architecture diagram, Operational Role diagram, System Architecture diagram et Logical Architecture diagram
Planning	Exchange Scenario, Functional Scenario et Operational Process description, Functional Chain description,

5e - III.1.B. Décrire l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture pour le cas d'application

Cette étape permet alors de définir l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture pour ce projet. Les résultats de ces activités sont synthétisés dans le Tableau 25.

Tableau 25. Synthèse des éléments de modèle de la préparation de l'évaluation d'architecture

Vue	Éléments de modèle de la préparation de la réalisation	Élément de modèle de la préparation du support	Élément de modèle de la préparation de la gestion
Motivation	S'assurer que les choix de conception respectent les exigences de sûreté Minimiser les niveaux radiologiques de locaux	Assister l'évaluation d'architecture	Assurer au moins le niveau de sûreté imposé par l'ASN (Agence de sûreté nucléaire) Changement dans les données d'entrée
Mission	Caractériser les propriétés de sûreté de l'architecture INB Quantifier le rayonnement reçu par un opérateur Estimer la radioactivité maximale d'une pièce Estimer la quantité de déchets dans une pièce	Fournir et maintenir tous les moyens techniques et de communication	Piloter l'évaluation de la sûreté tout au long du projet
Processus	Décomposer les critères de sûreté en critères plus concrets Identifier les facteurs d'évaluation Choisir les méthodes d'évaluation (dans le Référentiel) ou demander le développement des méthodes d'évaluation Effectuer les analyses Qualifier le zonage radiologique Fournir un rapport d'évaluation	S'assurer de la mise à disposition des ressources Faciliter l'exploitation des données et des connaissances Faire développer de nouveaux points de vue de l'architecture de l'INB et les type de modèle pour pouvoir mener l'EA. Développer des modèles et des vues de l'architecture ou des architectures de l'INB.	Identifier les parties prenantes pour les questions d'évaluation de la sûreté Elaborer un plan de gestion de l'évaluation de la sûreté. Imposer aux praticiens de l'EA les règles de l'entreprise concernant les questions de sûreté Rechercher les meilleures approches, méthodes et pratiques dans le référentiel. Surveiller, évaluer et contrôler les activités d'évaluation de l'architecture afin de rendre compte aux ingénieurs de conception du niveau de sûreté estimé et de faire éventuellement des recommandations.
Réseau Opérant	Praticiens de l'analyse de sûreté, ingénieur de sûreté, ingénieur procédé, simulateurs de sûreté, référentiel d'expertise et de connaissances d'entreprise.	Support aux analyses de sûreté, système d'information, outils de flux de travail, moyens de simulation, ingénieurs procédés, référentiel d'expertise et de connaissances d'entreprise	Gestionnaires de l'AE de sûreté, expert en sûreté, ASN, directives/règles et référentiel d'expertise, de connaissances d'entreprise.

Vue	Éléments de modèle de la préparation de la réalisation	Élément de modèle de la préparation du support	Élément de modèle de la préparation de la gestion
Planning	Données de planning associées aux tâches nécessaires aux estimations des niveaux atteints sur les sous-critères	Données de planning associées à la construction des modèles	Données de planning associées à la collecte des données nécessaire à l'évaluation

Des exemples de diagrammes représentant ces éléments de modèles sont disponibles en Annexe D.

5e - III.1.C. Collecter les informations nécessaires à l'évaluation d'architecture

Afin d'être en capacité de réaliser l'évaluation de l'architecture, un certain nombre d'informations sur l'architecture doivent être collectées. Ces informations ont préalablement été identifiées lors de l'étape précédente et plus particulièrement lors de l'élaboration du réseau opérant. Les informations nécessaires sont synthétisées dans le Tableau 26.

Tableau 26. Synthèse des informations nécessaires et possibles modèles pour y accéder

Information nécessaire	Vue correspondante de l'INB	Exemple de langage de modélisation
Transformations que les déchets subissent	Fonctionnelle (Statique)	Enhanced Functional Flow Block Diagram (eFFBD)(Lightsey 2001) or Physical Function Blank Diagram (PFBD) (Voirin 2017) or Exchange Scenario (ES) (Voirin 2017), BPMN (Object Management Group (OMG) 2012), Structured Analysis and Design Technique (SADT)
Séquence de transformations	Fonctionnelle (Comportement dynamique)	eFFBD (Lightsey 2001) or Logical Functional Chain Description (LFCD) (Voirin 2017) or ES (Voirin 2017), BPMN (Object Management Group (OMG) 2012), Structured Analysis for Real-Time systems (SA-RT)
Procédé qui effectue la transformation	Logique (Structure)	Matrice d'allocation Composant/Fonction or Logical Architecture Blank diagram (LAB) (Voirin 2017) or ES (Voirin 2017)
Besoins et prérequis du procédé	Logique (Structure) + Fonctionnelle (Statique)	SADT + Matrice d'allocation Composant/Fonction ou LAB (Voirin 2017)
Contraintes liées aux transformations	Logique (Structure) + Fonctionnelle (Statique)	SADT + Matrice d'allocation Composant/Fonction ou LAB (Voirin 2017)
Temps associés à la transformation	Fonctionnelle (Comportement)	EFFBD or ES [32], Réseau de Petri, IDEF3 (Idef.com 2019), langages de simulation (AnyLogic (Karpov et al. 2005))
Localisation du procédé	Physique (Géographique)	Matrice d'allocation Procédé/Salle allocation matrix ou LAB (Voirin 2017)
État/Statut de l'installation	Comportement	Diagramme de machine états (Voirin 2017; Al-Fedaghi 2020)
Différents scénarios/alternatives	Compositions des vues précédentes	/

Comme décrit dans le Chapitre 1, il est courant dans l'industrie nucléaire que les projets de développement d'INB soient document-centriques. Ce cas d'application en est un

exemple. Une étape de transition vers des modèles aptes à donner accès aux informations nécessaires est donc primordiale ici, en préliminaire de l'exécution des activités d'évaluation. Cette approche et les résultats obtenus sont décrits dans (Jérémy Bourdon et al. 2022) et se résume en quatre activités principales :

- Activité de collecte des besoins de modélisation : une première collecte des besoins en matière de modélisation est réalisée comme ceux décrits dans le Tableau 26 pour ce cas d'application ;
- Activité de préparation de la modélisation : les besoins étant cadrés, l'équipe de déploiement du MBSE établit une première ébauche d'un cadre de modélisation à respecter ;
- Activité de collecte de données : sur la base de l'ensemble des types de modèles, l'équipe de déploiement MBSE définit les données jugées nécessaires pour produire les modèles attendus en entrée des activités d'évaluation ;
- Activité de modélisation : dès que suffisamment de données ont été récoltées, les modèles attendus sont construits pas à pas. L'activité de modélisation se poursuit jusqu'à ce que les parties prenantes de l'évaluation d'architecture jugent que les besoins définis pour l'évaluation d'architecture sont couverts. Ces modèles doivent être vérifiés et validés avant d'être utilisés en évaluation d'architecture.

Les modèles générés par ces activités seront utilisés par les praticiens de l'évaluation d'architecture pour analyser et évaluer les alternatives de procédés de conditionnement des déchets de l'INB visée. Néanmoins, il est utile de définir une méthode qui sera utilisée autant de fois que nécessaire pour apprécier ces alternatives de procédés de traitement de déchet.

5e - III.1.D. Développer une méthode d'évaluation d'architecture pour les besoins du cas d'application

Pour adresser les objectifs énoncés en introduction, une méthode basée modèle d'évaluation d'architecture, ESTRADÉ, a été développée.

Par hypothèse, cette méthode s'appuie bien entendu sur une démarche et sur des modèles. Les concepts manipulés dans cette méthode sont issus de (Object Management Group (OMG) 2018). Les types de modèles sont en cours de spécification néanmoins les

capacités qu'ils doivent fournir sont clairement identifiées. De plus, cette méthode nécessite encore d'être harmonisée avec les concepts définis dans EVA-CIME.

Les activités de la démarche, les modèles associés et capacités attendues sont synthétisés dans le Tableau 27.

Tableau 27. *Activité et diagramme associé pour ESTRADÉ*

Nom de l'activité	Diagrammes associés	Rôle du diagramme/modèle
Identifier toutes les propriétés jugées pertinentes pour pouvoir évaluer un scénario.	Représentation des indicateurs	Définir l'ensemble des indicateurs que l'on veut observer Définir l'ensemble des indicateurs invariants communs à toute l'étude (e.g. masse volumique de l'eau) Définir l'ensemble des indicateurs intermédiaires issus du dimensionnement permettant de déduire les indicateurs recherchés depuis des indicateurs supposés connus.
	Représentation détaillée des indicateurs	Permet de définir pour un indicateur, les valeurs avant modification de l'architecture, les valeurs exigées et le regroupement de ces valeurs dans un vecteur.
	Représentation des alertes	Permet de définir les différentes alertes pour les indicateurs (p. ex. hauteur de la cuve supérieure à la hauteur de la salle).
Affiner le modèle d'indicateur en définissant les métiers impactés, les seuils associés ainsi que les solutions proposées pour le passage des seuils	Diagramme de formule	Permet de définir la relation entre n valeurs.
	Diagramme des métiers	Permet de définir l'ensemble des métiers du projet.
	Diagramme des responsabilités	Permet de définir dans quel périmètre métier intervient l'indicateur.
	Diagramme de relation métier/valeurs seuil	Permet d'associer un métier à une valeur seuil (i.e. une valeur à partir de laquelle le métier est considéré comme impacté).
	Diagramme de solution	Permettre de proposer une solution face à un seuil et de relier cette solution à des métiers quand c'est possible.
Définir le modèle global	Diagramme d'influence partiel	Permet de faire le lien entre plusieurs indicateurs via une formule.
	Diagramme de formule	Permet de définir une formule.
	Diagramme d'influence local	Permet d'afficher les indicateurs souhaités et les formules les liant.
	Diagramme d'influence global	Permet d'afficher l'ensemble des indicateurs et les formules les liant.
Analyser	Diagramme d'étude	Permet d'extraire pour un indicateur recherché l'ensemble des formules et indicateurs initiaux permettant son calcul.

5e - III.1.E. Conclusion

Après avoir initié EVA-CIME sur le projet, l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture et, plus particulièrement, de l'évaluation de la sûreté a été mise en place. L'élaboration de l'unité d'organisation a fait apparaître que certains modèles devaient spécifiquement être réalisés pour l'évaluation d'architecture. En conséquence une approche

permettant d'opérer une transition depuis les documents vers les modèles contenant les informations nécessaires a été menée. De plus, il existe un réel besoin pour une méthode pour l'étude de traitement de déchets, ce qui a motivé le développement d'ESTRADE dont les résultats de mise en œuvre sont présentés dans la section suivante.

5e - III.2 Application de l'étape d'exécution

Sur demande des personnes dont le rôle est de supporter l'évaluation d'architecture (Support d'EA voir 3e - III.3) ; l'étape de modélisation (5e - III.1.C) a été réalisée par l'entité en charge du support à l'évaluation d'architecture, permettant d'obtenir le jeu de modèles décrivant les différentes architectures. Sur cette base, les contributeurs métier (voir réseau opérant du Tableau 25) ont complété les modèles avec des informations spécifiques (valeur d'activité des salles, ...) afin d'obtenir une description suffisamment complète pour permettre l'évaluation

Ensuite, une étude menée par un ingénieur sûreté permet d'obtenir les valeurs d'activités des salles. Ces valeurs viennent paramétrer le modèle de l'architecture du système étudié pour compléter sa description. Un exemple de diagramme résultant de ces activités est présenté Figure 75.

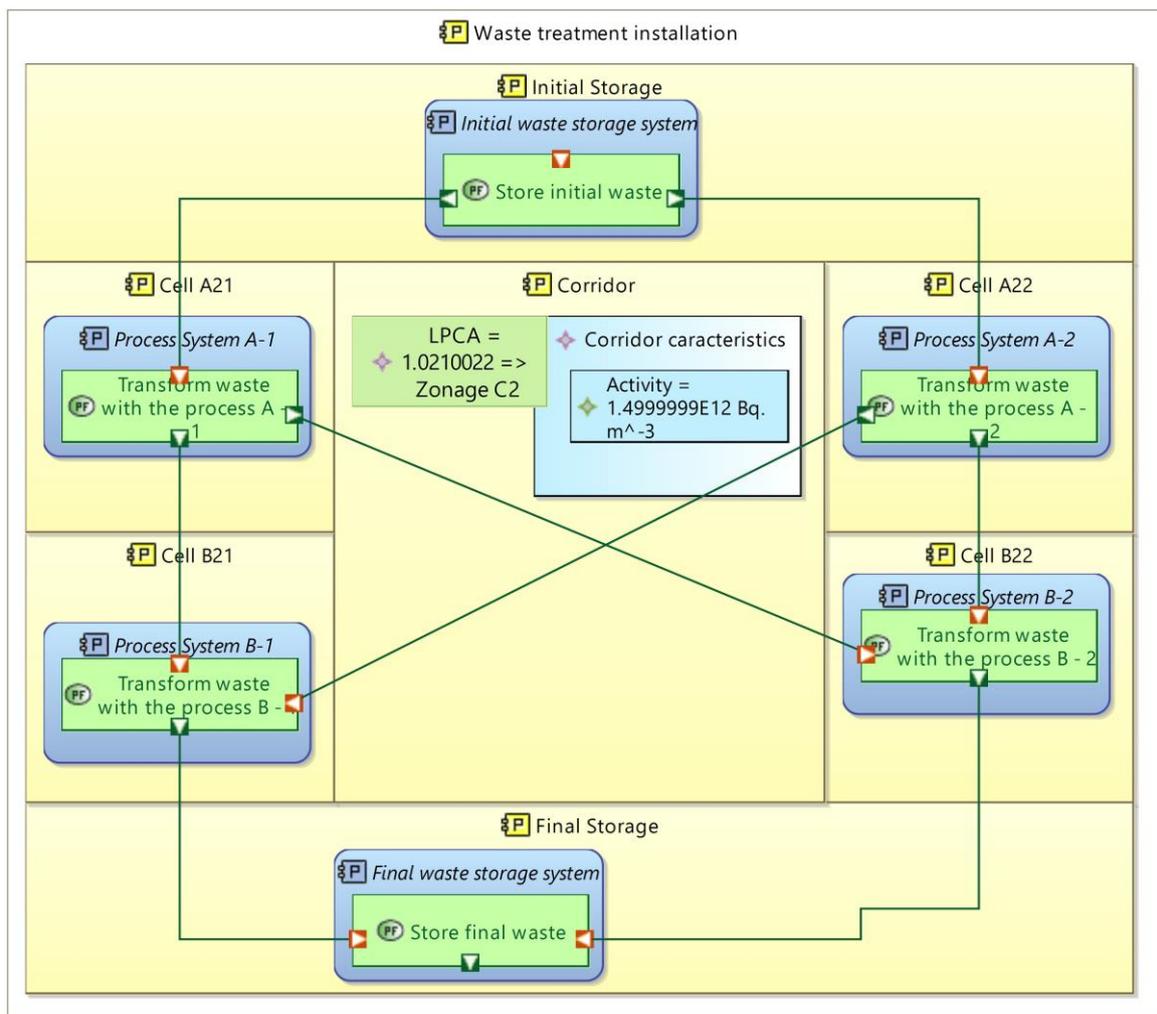


Figure 75. Exemple de modèle avec les informations d'activités radiologique d'une salle qui est le couloir

Les alternatives d'architecture ayant été modélisées selon les souhaits du praticien de l'EA, l'évaluation peut être réalisée. Les résultats de la réalisation des activités d'évaluation sont présentés dans le Tableau 28.

Tableau 28 Résultats de la réalisation d'ESTRADE sur le cas d'application.

Objectif	Facteur	Méthode d'évaluation	Résultat
Établir la quantité de radiation reçues par un opérateur	Zonage radiologique	ESTRADE	Activité totale: 1.5 Bq/m3 Nombre LPCA: 1.02 Zonage radiologique: C2

Un exemple de modèle est illustré Figure 76 et reprend les informations obtenues à l'issue de cette étape d'exécution de ce cas d'application.

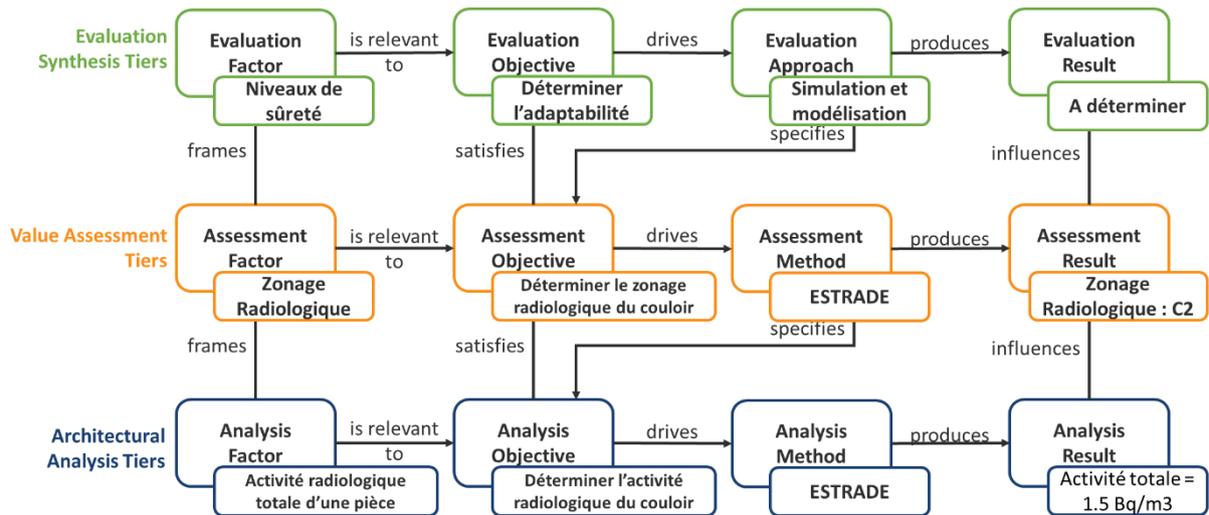


Figure 76. Modèle d'évaluation d'architecture pour le cas d'application

5e - III.3 Application de l'étape de clôture

Lors de l'étape de clôture, une des activités à mener est la collecte des retours d'expériences. Des retours sont présentés ci-dessous sur la méthode ESTRADE et sur le nouveau type de modèle développé pour les besoins de l'évaluation d'architecture sur ce cadre d'application.

5e - III.3.A. Retour d'expérience sur ESTRADE

5e - III.3.A.a. Gains apportés par ESTRADE

ESTRADE, de par son approche basée modèles, permet de relier les différents attributs de l'architecture entre eux en les reliant par des formules. Cela permet, en cas de changement, tels que la modification des attentes des parties prenantes ou une meilleure précision sur les entrées de l'installation, d'identifier rapidement les décisions qui pourraient être remises en cause ou mettre en évidence de nouvelles alternatives qui jusqu'à présent n'étaient pas viables. Dans un contexte basé document cette identification est difficile du fait de l'absence de lien entre les informations d'un document. Dans le cas de notre application, si les données sur les déchets changent, il est possible de relancer rapidement l'évaluation des différentes alternatives par simple reparamétrage des entrées ou des modèles. Une étude préliminaire des gains nous laisse à penser que la méthode basée modèle ESTRADE et les automatismes subséquents permettraient de gagner 40% de temps lors de l'analyse de l'impact sur l'architecture d'un changement des hypothèses sur les flux de déchets entrants.

5e - III.3.A.b. Lacunes d'ESTRADE

Ce résultat est prometteur mais nécessite d'être validé dans le contexte réel d'un projet. Dans un contexte basé sur les documents, l'élaboration initiale du modèle pour l'évaluation demande un effort en temps et en coûts supérieur à la seule exécution d'une évaluation d'architecture. D'autres lacunes sont observées comme : le vocabulaire utilisé dans la méthode ESTRADE n'est pas forcément intelligible de tous les acteurs projets concernés.

5e - III.3.A.c. Généralisation d'ESTRADE

La démarche ESTRADE a été reprise pour être généralisée à l'ensemble des installations de traitement de déchets.

5e - III.3.B. Retour d'expérience sur le type de modèle développé pour décrire le zonage radiologique

EVA-CIME promulguant l'utilisation de modèle, a entraîné la demande d'un développement d'un nouveau point de vue de description de l'architecture du système pour une préoccupation récurrente (impact de l'évolution des caractéristiques des déchets sur le zonage radiologique de l'infrastructure) dans les installations nucléaires. Ceci a permis d'accélérer et de procéder plus tôt à l'évaluation de cette préoccupation. Avec les bons efforts de communication et de soutien, cette représentation peut être généralisée et utilisée pour d'autres projets sans nouveaux coûts et efforts de développement car déjà développée.

5e - IV. Application d'EVA-CIME Entreprise

Sur la base des éléments suggérés dans le retour d'expérience associé à ESTRADE, il est envisageable d'élaborer un ensemble de définitions de patron pour décrire ESTRADE à intégrer dans le REC EVA-CIME. Cet ensemble de définitions de patron regroupe les patrons ESTRADE pour chacun des points de vue décrits dans le cadre EVA-CIME. Enfin, le cas d'application intègre l'ensemble des usages connus pour chacun de ces patrons. Les différents patrons, leurs participants et leur localisation dans le cadre sont synthétisés dans le Tableau 29. Ces définitions de patrons sont mises au niveau de conseil du cadre de description car ESTRADE n'est pas imposé dans l'entreprise. Lors de l'amélioration du patron pour combler les lacunes (5e - III.3.A.b) identifiées dans ce premier retour d'expérience, les concepts

présentés dans le Chapitre 4 seront utilisés pour associer l'ancienne version et la nouvelle version de la définition du patron.

Tableau 29. Ensemble de définition de patrons réalisable à partir du développement d'ESTRADE

Nom de la définition de patron	Participant du patron	Localisation dans le cadre
Exemple de motivations, influenceurs et impacts potentiels pour ESTRADE	Identifier, analyser et pallier l'impact d'un changement de données d'entrée sur les études ; Producteur de déchet, Exutoire ; Changement des flux entrant, Changement des exigences des exutoires	VP-WHY-PREP-ADV
Mission générique associé à ESTRADE	Déterminer une propriété d'un scénario de traitement de déchet	VP-WHAT-PREP-ADV
Processus d'ESTRADE	Identifier toutes les propriétés jugées pertinentes pour pouvoir évaluer un scénario, Affiner le modèle d'indicateur en définissant les métiers impactés, les seuils associés ainsi que les solutions proposées pour le passage des seuils, Définir le modèle global, Analyser	VP-HOW-PREP-ADV
Rôle et types de modèles d'ESTRADE	Programmeur, Ingénieur procédé, Concepteur de solutions, Spécificateurs métiers, Chef du projet ; Représentation des indicateurs, Représentation détaillée des indicateurs, Représentation des alertes, Diagramme de formule, Diagramme des métiers, Diagramme des responsabilités, Diagramme de relation métier/valeurs seuil, Diagramme de solution, Diagramme d'influence partiel, Diagramme de formule, Diagramme d'influence local, Diagramme d'influence global, Diagramme d'étude	VP-WHO-PREP-ADV

5e - V. Conclusion

Les objectifs d'évaluation d'architecture identifiés lors d'EVA-CIME ont encouragé le développement d'un cadre de description de l'architecture d'une installation de traitement de déchets nucléaire prenant en compte les activités qui seraient menées en évaluation d'architecture.

La mise en œuvre de ce point de vue a permis de comparer et de définir rapidement un ensemble d'alternatives de processus en ce qui concerne le zonage radiologique et l'impact sur les différentes disciplines impliquées dans la conception. Finalement, en reliant tous les efforts d'évaluation, il est plus facile de tirer parti des résultats des évaluations passées pour mener d'autres évaluations. Par exemple, pour évaluer la sûreté des opérateurs dans le temps, il est utile de connaître l'activité radiologique au sein de l'installation. De même, pour l'évaluation de certaines préoccupations (par exemple, le stockage des déchets en réception est-il suffisamment dimensionné ?), il peut être nécessaire d'avoir des informations sur l'architecture des systèmes externes au système étudié (par exemple, quel est le type de déchets fournis).

EVA-CIME, en assurant la cohérence et la relation des évaluations, doit garantir que toute modification sera répercutée sur l'ensemble des évaluations afin, au plus tôt, d'identifier les risques de reprise et de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour les réduire. Il a été jugé intéressant d'intégrer dans la démarche opératoire d'EVA-CIME une étape d'identification et de développement de points de vue pour modéliser les propriétés nécessaires à l'évaluation. Le point de vue radiologique développé à partir des besoins formalisés avec EVA-CIME a été ajouté à la démarche MBSE développée au sein d'Assystem.

Les concepts et représentations qui lui sont associés sont capitalisés pour d'autres projets qui auraient à évaluer ou décrire une architecture au regard de telles préoccupations. Sur la base de son application, le cadre proposé semble couvrir et permettre la description de l'effort d'évaluation. Il intègre les concepts nécessaires à la création d'un plan d'évaluation de l'architecture qui est le livrable de l'étape de préparation. A l'échelle du projet, il a été considéré comme pertinent de capitaliser le point de vue créé pour les besoins de l'évaluation d'architecture, celui-ci étant réutilisable pour d'autres parties de l'installation.

Conclusion Générale : synthèse, limites et perspectives

Trois challenges ont été étudiés durant ces travaux pour répondre à une problématique industrielle dans le domaine nucléaire : l'évaluation d'architectures de solutions.

L'objectif de recherche, annoncé dès le chapitre 2, était d'établir les conditions pour assister un collectif d'acteurs en soutenant efficacement et en toute confiance leurs activités d'évaluation (en tenant compte des préoccupations des parties prenantes par exemple : performances, sûreté, maintenabilité ou autres exigences), de comparaison, d'argumentation, de traçabilité et d'aide au choix d'alternatives architecturales de solutions durant un projet.

Les contributions développées pour répondre à ces challenges et aux manques identifiés sont synthétisées ci-dessous.

1^{er} challenge à relever : il s'agissait d'identifier les modèles et des moyens de modélisation permettant de décrire sans ambiguïtés des solutions d'architecture d'INB selon une approche système.

Ces travaux se sont particulièrement concentrés sur le manque constaté suivant : il n'y a pas consensus sur la notion d'architecture, le MBSE en propose une définition reconnue en ingénierie mais qui ne couvre pas les phases amonts ESQ et APS, il y a un manque d'approche basée modèle de l'EA.

Pour cela, EVA-CIME promeut :

- **Concepts** : un méta modèle cohérent et validé mettant en avant des classes de concepts, leurs attributs, les relations entre concepts et les contraintes essentielles traduisant et formalisant de manière non-ambiguë et sémantiquement interopérable les concepts et liens entre concepts nécessaires pour mener à bien l'évaluation d'architecture. Ces concepts sont issus de plusieurs domaines : description d'architecture, évaluation d'architecture (EA), déploiement de processus et de méthodes en entreprise, gestion de projets, patron et modèle de maturité

- **Langages** : un cadre de description qui présente les différents langages de modélisation utiles à l'évaluation d'architecture et permettant de manipuler les concepts définis dans le méta-modèle. Ces langages sont regroupés selon trois axes, les questionnements sur l'EA, les étapes de l'EA et les niveaux de prescription.
- **REC** : le référentiel d'expertises et de connaissances (REC) permet de regrouper les éléments de connaissance pour appliquer et éprouver EVA-CIME de manière globale : patrons, pratiques, guides, etc. à la fois pour soutenir et faciliter la modélisation, et pour mettre en évidence les aspects méthodologiques et organisationnels qu'EVA-CIME propose.

2^{ème} challenge à relever : il s'agissait d'évaluer et justifier au plus tôt le choix de la solution la plus satisfaisante malgré les évolutions possibles des besoins et avec une exigence de traçabilité.

Ces travaux se sont particulièrement concentrés sur le manque constaté suivant : il y a des normes sur l'EA mais pas de méthode permettant de déployer et conduire l'EA sur un projet (normes non prescriptives sur le sujet).

Pour cela, EVA-CIME projet promeut :

- **Concepts** : la déclinaison EVA-CIME Projet emploie les concepts d'EVA-CIME en se limitant aux domaines autres que ceux des patrons et du modèle de maturité.
- **Langages** : EVA-CIME Projet n'instancie qu'un seul des niveaux de prescription du cadre de description, le niveau opérationnel. Ce niveau est instancié à chaque fois qu'un projet est mené et requiert l'application d'EVA-CIME.
- **Démarche opératoire** : EVA-CIME Projet s'articule autour de trois grandes étapes qui sont la préparation, l'exécution et la clôture de l'évaluation d'architecture.

En conséquence, EVA-CIME via sa démarche opératoire Projet permet de donner un cadre de et un mode de déploiement de l'EA sur un projet spécifiquement à un niveau concret. De plus, par le biais de la formalisation d'une étape de préparation, cette approche peut être initiée au plus tôt dès les phases d'avant-projet (ESQ, APS, APD).

3^{ème} challenge à relever : il s'agissait de capitaliser et réutiliser les retours d'expérience des projets antérieurs, les compétences présentes ou acquises dans l'entreprise et les aspects organisationnels mis en œuvre dans l'élaboration d'architectures, leur vérification, leur validation et leur évaluation.

Ces travaux se sont particulièrement concentrés sur le manque constaté suivant : il n'y a pas de méthode permettant de capitaliser les Retours d'Expérience sur les EA projets en entreprise ni de guide pour faire évoluer les bonnes pratiques et les compétences en EA dans l'entreprise.

Pour cela EVA-CIME Entreprise promeut :

- **Concepts** : la déclinaison EVA-CIME Entreprise manipule tous les concepts d'EVA-CIME.
- **Langages** : les niveaux de conseil et de référence du cadre de description sont les principaux niveaux manipulés par EVA-CIME Entreprise. Le contenu des niveaux opérationnels (un par projet) est accessible mais n'a pas vocation à être modifié lors d'EVA-CIME Entreprise.
- **Démarche opératoire** : EVA-CIME Entreprise est composée de trois principaux processus. Le premier est le processus de déploiement de l'évaluation d'architecture en entreprise, le deuxième est le processus de gestion du référentiel d'expertises et de connaissances et enfin, le troisième est le processus de gestion de la maturité de l'évaluation d'architecture.
- **REC** : EVA-CIME Entreprise est en charge d'initialiser et d'entretenir le REC. Le contenu de ce REC est détaillé dans EVA-CIME. Ce REC est alimenté en continu avec les retours issus de l'étape de clôture des différents efforts d'évaluation d'architecture menés dans l'entreprise dans les projets.

Les résultats présentés dans le Chapitre 5, cependant certaines limitations apparaissent :

- EVA-CIME nécessite d'être maintenant testée in situ à plus grande échelle pour évaluer réellement les gains et limitations de la méthode. Pour cela, différents projets réels, dès leur démarrage si possible, et visant différents types d'INB sont nécessaires pour disposer d'une évaluation et d'une confrontation suffisante avec le terrain. A cette fin, un protocole expérimental de tests, reproductible et d'évaluation in situ est fondamental pour une comparaison objective des résultats de ces tests. Il s'agirait d'appliquer EVA-CIME pour mettre en œuvre sa propre évaluation.
- Malgré l'objectif affichée d'être agnostique de l'outillage support retenu, il est nécessaire, pour valider, promulguer et mettre en pratique plus en avant la méthode, de disposer d'outils ou, de préférence, d'un outil implémentant la totalité d'EVA-CIME tout en étant totalement interopérable avec tous les outils actuellement utilisés par les acteurs métier. Dans le cadre de la démonstration outillée chez Assystem, ces outils métier sont essentiellement CAPELLA, Entreprise Architect et Cameo.
- La méthode EVA-CIME ne permet actuellement pas de réaliser la V&V des résultats qu'il s'agisse des modèles ou des comportements et KPI de l'organisation. En effet, il n'y a pas de concept ni de langage permettant la simulation de la constitution et du comportement de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture dans un projet donné : analyser l'impact de la mise en place de l'évaluation d'architecture sur le projet, sur ses ressources, son planning, etc.
- EVA-CIME doit alimenter et, à terme, intégrer des techniques et approches d'aide à la décision que les acteurs métier ont l'habitude d'utiliser.
- EVA-CIME ne prend pas en compte la possibilité d'un fonctionnement en entreprise étendue. Les projets et informations du REC sont supposés limités à une entreprise unique.

De fait, il est proposé , en perspectives, afin d'assurer la continuité de ces travaux, de réduire ces limitations et d'enrichir la méthode EVA-CIME, les axes de R&D suivants :

- Outiller EVA-CIME avec un environnement complet prenant en charge la modélisation de l'Unité d'organisation en charge de l'évaluation, du système évalué et le Projet pour faire le système ;
- Par ce que la méthode a été développée sur la base de concepts généraux du domaine de l'ingénierie, EVA-CIME doit pouvoir s'appliquer à d'autres domaines que celui du nucléaire. Il s'agit alors de promouvoir, d'adapter et de tester cette méthode dans d'autres secteurs industriels ;
- Intégrer et interopérer plus de langages dans EVA-CIME pour couvrir l'ensemble des besoins ou fournir des moyens faciles d'accès pour son extension ;
- Décliner EVA-CIME au niveau inter-entreprises pour viser des projets et des connaissances d'évaluation d'architecture non plus limités à une seule entreprise.
- Construire des réseaux opérant sur la base des activités à mener et des collaborateurs disponibles possédant les connaissances ou aptes à être formés. Se diriger vers une construction de l'unité d'organisation en charge de l'évaluation d'architecture la plus automatisée possible sur la base d'un *delivery process*.
- Mettre en œuvre une itération complète du modèle de maturité et intégrer ce modèle de maturité à un modèle de maturité plus global qui serait celui de l'ingénierie système ;

Références

- Al-Fedaghi, Sabah. 2020. "Modeling the Semantics of States and State Machines." *Journal of Computer Science* 16 (7): 891–905. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2020.891.905>.
- Alsharif, Samer, and Aslihan Karatas. 2016. "A Framework for Identifying Causal Factors of Delay in Nuclear Power Plant Projects." *Procedia Engineering* 145: 1486–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.187>.
- Architecture Capability Team. 2020. "NATO ARCHITECTURE FRAMEWORK Version 4," no. January 2018.
- Bakhshi, Javad, Vernon Ireland, and Alex Gorod. 2016. "Clarifying the Project Complexity Construct: Past, Present and Future." *International Journal of Project Management* 34 (7): 1199–1213. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.002>.
- Barbacci, Mario, Paul Clements, Anthony J. Lattanze, Linda M. Northrop, and William Wood. 2003. "Using the Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM) to Evaluate the Software Architecture for a Product Line of Avionics Systems : A Case Study." *Technical Note* - *CMU/SEI-2003-TN-012*, no. July: 31. <http://www.sei.cmu.edu/library/abstracts/reports/03tn012.cfm>.
- Bass, Len, Paul Clements, and Rick Kazman. 2003. *Software Architecture in Practice*. Addison-Wesley Professional.
- Bériot, Dominique. 2014. *Manager Par l'approche Systémique: Préface de Michel Crozier*. Editions Eyrolles.
- Berliner, Callie, and James A Brimson. 1988. *Cost Management for Today's Advanced Manufacturing : The Cam-I Conceptual Design*. Boston (Mass.) : Harvard business school press. <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:000739988>.
- Berthélemy, Michel, Jean-Guy Devezeaux De Lavergne, Thierry Dusquesnoy, and Mathonnière Gilles. 2016. "Énergie Nucléaire : Les Enjeux Économiques - Encyclopédie de l'énergie."

- May 30, 2016. <https://www.encyclopedie-energie.org/enjeux-economiques-de-energie-nucleaire/>.
- Bill, Schnindel. 2017. "MBSE Maturity Assessment : Related INCOSE & ASME Efforts, and ISO 15288," 1–44.
- BKCASE Editorial Board INCOSE. 2016. *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge SEBoK 2.2. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*. <http://g2sebok.incose.org/app/mss/menu/index.cfm>.
- Blanchard, B S, and W J Fabrycky. 1981. *Systems Engineering and Analysis*. Edited by W J Fabrycky and J H Mize. *Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems Engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Blokdyk, Gerardus. 2020. *Process Maturity Assessment A Clear and Concise Reference*. Edited by The Art of Service.
- Bonjour, Eric. 2008. "Contributions à l'instrumentation Du Métier d'architecte Système : De l'architecture Modulaire Du Produit à l'organisation Du Système de Conception." Habilitation à Diriger des Recherches, Besançon: Université de Franche-Comté.
- Bonjour, Eric, Samuel Deniaud, and Jean Pierre Micaëlli. 2013. "A Method for Jointly Drawing up the Functional and Design Architectures of Complex Systems during the Preliminary System-Definition Phase." *Journal of Engineering Design* 24 (4). <https://doi.org/10.1080/09544828.2012.737457>.
- Bourdon, Jeremy, Pierre Couturier, Vincent Chapurlat, Robert Plana, Victor Richet, and Benjamin Baudouin. 2020. "Towards a Contribution to the Early V&V and Evaluation of Architectural Solutions for Nuclear Infrastructures Project Delivery." In *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2020-Sept:897–904. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9211990>.
- Bourdon, Jérémy, Pierre Couturier, Vincent Chapurlat, Robert Plana, Victor Richet, and Benjamin Baudouin. 2022. "Document to Model Transition for Architecture Evaluation Approach: Application to a Nuclear Infrastructure Project." In *10th IFAC MIM 2022 Conference*. Elsevier.

- Cameron, G. 2013. "Stakeholders, Issues, And The Shaping Of Large Engineering Projects." *Engineering Project Organization Conference*.
- Clements, Paul, Rick Kazman, and Mark Klein. 2001. "Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies," 19–42.
- CMMI Product Team. 2010. "CMMI for Development, Version 1.3." Pittsburgh, PA. <http://resources.sei.cmu.edu/library/asset-view.cfm?AssetID=9661>.
- Commission, European, and Directorate-General for Informatics. 2017. *New European Interoperability Framework : Promoting Seamless Services and Data Flows for European Public Administrations*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2799/78681>.
- Cook, David, and William D. Schindel. 2015. "Utilizing MBSE Patterns to Accelerate System Verification." *INCOSE International Symposium* 25 (1): 1085–1100. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2015.00117.x>.
- Cornu, Clémentine. 2012. "Contribution à La Prise En Compte de l'interopérabilité Pour Le Déploiement de Processus Complexes Dans Une Grande Entreprise : Proposition d'un Guide Méthodologique Outillé Pour Les Processus d'Ingénierie Système." Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00817933>.
- Couturier, Pierre, Mambaye Lô, Abdelhak Imoussaten, Vincent Chapurlat, and Jacky Montmain. 2014. "Tracking the Consequences of Design Decisions in Mechatronic Systems Engineering." *Mechatronics* 24 (7): 763–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.03.004>.
- Crawley, Edward F. 2007. "ESD. 34 Systems Architecting—Lecture Notes." MA.: MIT *Engineering Systems Division, IAP*.
- Desroches, Alain, Dominique Baudrin, and Michel Dadoun. 2009. *L'analyse Préliminaire Des Risques: Principes et Pratiques*. Hermes science publications. https://books.google.fr/books/about/L_analyse_pr%C3%A9liminaire_des_risques.html?id=I89kPgAACAAJ&redir_esc=y.

- Dufresne, Thomas, and James Martin. 2003. "Process Modeling for E-Business." In *INFS 770 – Methods for Information Systems Engineering: Knowledge Management and E-Business Spring 2003*.
- Emes, M. R., P. A. Bryant, M. K. Wilkinson, P. King, A. M. James, and S. Arnold. 2012. "Interpreting 'Systems Architecting.'" *Systems Engineering* 15 (4): 369–95. <https://doi.org/10.1002/sys.21202>.
- Faisandier, Alain. 2014. *Notions de Système et d'ingénierie de Système*. Vol. 1. Sinergy'Com.
- . 2017. *Evaluation et Preuve Du Système*. Sinergy'Com.
- Fiorèse, Serge, and Jean-Pierre Meinadier. 2012. "Découvrir et Comprendre l'ingénierie Système." *CEPADUES Editions, ISBN 978 (36493.005)*: 6.
- Firesmith, Donald. 2006. "QUASAR : A Method for the QQuality Assessment of Software-Intensive System ARchitectures," no. July.
- Foley, Aoife, Beatrice M. Smyth, Tomislav Pukšec, Natasa Markovska, and Neven Duić. 2017. "A Review of Developments in Technologies and Research That Have Had a Direct Measurable Impact on Sustainability Considering the Paris Agreement on Climate Change." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 (February): 835–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.215>.
- Galinier, Stephane, and Claude Y Laporte. 2018. "Connecting Business Development and Systems Engineering with ISO/IEC 29110 Standard in Small and Medium Enterprises of France." In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544393>.
- Gianni, Daniele, Andrea D'Ambrogio, and Andreas Tolk. 2014. *Modeling and Simulation-Based Systems Engineering Handbook*. CRC Press. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=EoiZBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=gianni+dambrogio+tolk&ots=N6dF-EUXUY&sig=d2haKuO2-eT8i9OQcrKemcpsaWw&redir_esc=y#v=onepage&q=gianni%20dambrogio%20tolk&f=false.

- Gouyon, David, Stéphane Chaigneau, Jean-Marc Quiot, Nicolas Veaux, and Vincent Chapurlat. 2009. "A Notation to Measure and Improve Efficiency with Regards to Integration, Validation and Verification of Systems Integration Verification Validation Assessment Notation (IV2AN)." *IFAC Proceedings Volumes* 42 (4): 1358–63. <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0187>.
- Graves, Tom. 2009. "What's the Difference between Architecture and Design?" 2009. <http://weblog.tetradian.com/2009/10/09/architecture-versus-design/>.
- Grosu, Radu, Cornel Klein, Bernhard Rumpe, and Manfred Broy. 1996. "State Transition Diagrams.TUM-I 9630." München, Germany.
- Haskins, Cecilia, Kevin Forsberg, Michael Krueger, D Walden, and D Hamelin. 2006. "Systems Engineering Handbook." In *INCOSE*, 9:13–16.
- Itzel, Karla, Karla Gomez Sotelo, Xin Yi, Claude Baron, Philippe Esteban, Citlalih Yollohtli, Alejandra Estrada, Luis Jesús, and Laredo Velazquez. 2018. *Avez-Vous Identifié Toutes Les Parties Prenantes ?*
- Jankovic, Marija, and Claudia Eckert. 2016. "Architecture Decisions in Different Product Classes for Complex Products." *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 30 (3): 217–34. <https://doi.org/DOI: 10.1017/S0890060416000214>.
- Jouault, Frédéric, and Jean Bézivin. 2006. "KM3: A DSL for Metamodel Specification." In *Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems*, edited by Roberto Gorrieri and Heike Wehrheim, 171–85. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Karpov, Yuri G, Rostislav I Ivanovski, Nikolai I Voropai, and Dmitri B Popov. 2005. "Hierarchical Modeling of Electric Power System Expansion by Anylogic Simulation Software." In *2005 IEEE Russia Power Tech*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524731>.
- Kazman, Rick, Mark Klein, and Paul Clements. 2000. "ATAM : Method for Architecture Evaluation," no. August.
- Keller, Wolfgang. 2012. "EA Frameworks & TOGAF The Open Group Architecture Framework," 0–62. https://www.hpi.uni-potsdam.de/hirschfeld/teaching/past/itua12/media/Itua12_06_TOGAF.pdf.

- Kendall, Julie E., and Kenneth E. Kendall. 1993. "Metaphors and Methodologies: Living beyond the Systems Machine." *MIS Quarterly* 17 (2): 149. <https://doi.org/10.2307/249799>.
- Khalil, Maged, Bernhard Schätz, and Sebastian Voss. 2014. "A Pattern-Based Approach towards Modular Safety Analysis and Argumentation." *Real Time Software and Systems Conference (ERTS 2014)*, 10.
- Lafon, Maxence, Vincent Chapurlat, Jean-François Milot, and Cyril Moitrier. 2018. "The D&D of Nuclear Facilities: A Systemic Approach for Project Organization and Monitoring." *Waste Management Symposia 2018*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01930261>.
- Leigh, Doug. 2009. "SWOT Analysis." *Handbook of Improving Performance in the Workplace: Volumes 1-3*, 115–40.
- Lemazurier, L., V. Chapurlat, and A. Grossetête. 2017. "An MBSE Approach to Pass from Requirements to Functional Architecture." *IFAC-PapersOnLine* 50 (1): 7260–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1376>.
- Leyrit, Christian. 2014. "Project of a Radioactive Waste Deep Reversible Disposal Centre in Meuse / Haute-Marne (Cigeo) - From May 15 to December 15 2013." https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:51088164.
- Lightsey, Bob. 2001. "Systems Engineering Fundamentals." DEFENSE ACQUISITION UNIV FT BELVOIR VA.
- Lô, Mambay. 2013. "Contribution à l'évaluation d'architectures En Ingénierie Système : Application à La Conception de Systèmes Mécatroniques."
- Luzeaux, Dominique, and Jean-René Ruault. 2008. *Systèmes de Systèmes: Concepts et Illustrations Pratiques*. Hermes science publications.
- Marca, David A, and Clement L McGowan. 1987. *SADT: Structured Analysis and Design Technique*. McGraw-Hill, Inc.
- Mayer, Richard J. 1992. "IDEF1 Information Modeling." *Knowledge Based Systems, Inc., College Station, Texas*.
- Muller, Gerrit. 2011. *Systems Architecting*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11816>.

- Nandonde, Felix Adamu. 2019. "A PESTLE Analysis of International Retailing in the East African Community." *Global Business and Organizational Excellence* 38 (4): 54–61. <https://doi.org/10.1002/joe.21935>.
- Navas, Juan, Stephane Bonnet, Philippe Tannery, and Jean-Luc Voirin. 2018. "Architecture Design of Nuclear Power Plants Systems through Viewpoints-based Systems Analysis." In *INCOSE International Symposium*, 28:1093–1108. Wiley Online Library.
- . 2012. *Business Process Model and Notation*. Edited by Jan Mendling and Matthias Weidlich. *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Vol. 125. Lecture Notes in Business Information Processing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33155-8>.
- Office of Aerospace Studies. 2016. "Analysis of Alternatives (AoA) Handbook."
- Parnell, Gregory S., Nicolas Shallcross, Eric Specking, and Matthew Phillips. 2021. "MBSE Enabled Trade-Off Analyses." *INCOSE International Symposium* 31 (1): 1406–16. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2021.00909.x>.
- Pfister, F., V. Chapurlat, M. Huchard, C. Nebut, and J.-L. Wippler. 2012. "A Proposed Meta-Model for Formalizing Systems Engineering Knowledge, Based on Functional Architectural Patterns." *Systems Engineering* 15 (3): 321–32. <https://doi.org/10.1002/sys.21204>.
- Poulin-Dubois, Diane, and David H. Rakison. 1999. "A Developmental Theory of Implicit and Explicit Knowledge." *Behavioral and Brain Sciences* 22 (5): 782–782. <https://doi.org/10.1017/S0140525X99522188>.
- Prun, Daniel. 2022. "Session 1 : Les Concepts et Leur Modélisation." In *École d'Ingénierie Système 2022*, edited by Association Française d'Ingénierie Système.
- Rashid, Muhammad, Muhammad Waseem Anwar, and Aamir M Khan. 2015. "Toward the Tools Selection in Model Based System Engineering for Embedded Systems—A Systematic Literature Review." *Journal of Systems and Software* 106: 150–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.04.089>.
- Raymond McLeod Jr. 1994. *Systems Analysis and Design: An Organizational Approach*.

- Rechtin, Eberhardt, and Mark W. Maier. 2010. *The Art of Systems Architecting*. Vol. 20001178. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420058529>.
- Roques, Pascal. 2018. *Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method. A Practical Guide to Capella*. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53. <https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=45071116>.
- Ryan, Alex J. 2008. "What Is a Systems Approach?" *ArXiv Preprint ArXiv:0809.1698*.
- Sage, Andrew P, and William B Rouse. 2014. *Handbook of Systems Engineering and Management*. John Wiley & Sons.
- Schindel, W. 2005. "Pattern-Based Systems Engineering: An Extension of Model-Based Systems Engineering," 1–4. <papers3://publication/uuid/AE546263-F4E9-44C9-9F80-4CE71753B5FA>.
- Sillitto, Hillary G. 2010. "Design Principles for Ultra-Large-Scale (ULS) Systems." *INCOSE International Symposium* 20 (1): 63–82. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01057.x>.
- Smolander, K. 2002. "Four Metaphors of Architecture in Software Organizations: Finding out the Meaning of Architecture in Practice." In *Proceedings International Symposium on Empirical Software Engineering*, 211–21. IEEE Comput. Soc. <https://doi.org/10.1109/ISESE.2002.1166942>.
- Sow, Diadié. 2017. "Contribution à l'évaluation et à l'amélioration Multicritères En Contexte Incertain : Application à La Conception Préliminaire."
- Tricot, André, Gilles Sahut, and Julie Lemarié. 2016. *Le Document: Communication et Mémoire*. De Boeck Supérieur.
- Varaine, F, G Rodriguez, D Settimo, Jm Hamy, S Romdhane, Rp Benard, A Remy, et al. 2017. "Astrid Project, from Conceptual to Basic Design Progress Status Astrid Project, from Conceptual to Basic Design: Progress Status." <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02419661>.

- Voirin, Jean Luc. 2017. *Model-Based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method. Model-Based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method.* <https://doi.org/10.1016/c2016-0-00862-8>.
- Walden, David D, Garry J Roedler, Kevin Forsberg, R Douglas Hamelin, and Thomas M Shortell. 2015. *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities.* John Wiley & Sons.
- Wilson, James M. 2003. "Gantt Charts: A Centenary Appreciation." *European Journal of Operational Research* 149 (2): 430–37. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00769-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00769-5).
- Wu, Quentin, David Gouyon, Eric Levrat, and Sophie Boudau. 2019. "A Review of Know-How Reuse with Patterns in Model-Based Systems Engineering." In *A Review of Know-How Reuse with Patterns in Model-Based Systems Engineering: Proceedings of the Ninth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M Paris 2018*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04209-7>.
- Yourdon, Edward. 1989. *Modern Structured Analysis*. Yourdon press.
- Zachman, John A. 2003. "The Zachman Framework for Enterprise Architecture." *Primer for Enterprise Engineering and Manufacturing.*[Si]: Zachman International.
- Zwaan, Bob van der. 2013. "The Role of Nuclear Power in Mitigating Emissions from Electricity Generation." *Energy Strategy Reviews* 1 (4): 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2012.12.008>.

Webographie et Standard

"Article 6 Du Décret N°93-1268 Du 29 Novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d'oeuvre Confiées Par Des Maîtres d'ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé." 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article 9 Du Décret N°93-1268 Du 29 Novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d’oeuvre Confiées Par Des Maîtres d’ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article 10 Du Décret N°93-1268 Du 29 Novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d’oeuvre Confiées Par Des Maîtres d’ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article 11 Du Décret N°93-1268 Du 29 Novembre 1993 Relatif Aux Missions de Maîtrise d’oeuvre Confiées Par Des Maîtres d’ouvrage Publics à Des Prestataires de Droit Privé.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article D2171-5 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d’esquisse ESQ.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article D2171-6 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d’avant-Projet Sommaire APS.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article D2171-7 Marchés Globaux et Éléments de Mission : Études d’avant-Projet Définitif APD.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

“Article D2171-10 Marchés Globaux : Études de Projet PRO.” 2019. *Code de La Commande Publique*, Avril.

“Article D2171-11 Marchés Globaux : Objet Des Études d’exécution EXE.” 2019. *Code de La Commande Publique*.

Assystem Energy and Operations Services. 2021. “Note Méthode Gestion Documentaire Générique Maitrise d’oeuvre.”

Autorité de Sûreté Nucléaire. 2021. “Les Missions de l’ASN.” 2021. <https://www.asn.fr/tout-sur-l-asn/presentation-de-l-asn/les-missions-de-l-asn>.

Centre d’évaluation de documentation et d’innovation pédagogiques (CEDIP). 2011. “Grille d’analyse Pour Un Retour d’expérience (REX).” <https://www.cedip.developpement-durable.gouv.fr/le-retour-d-experience-une-methode-une-grille-a891.html>.

Cour des comptes. 2020. “La Filière EPR.” www.ccomptes.fr.

- Folz, Jean-Martin. 2019. "Rapport Au Président Directeur Général d'EDF: La Construction de l'EPR de Flamanville." *République Française*, October.
- Gassilloud, Thomas, and Piednoir Stéphane. 2021. "L'énergie Nucléaire Du Futur et Les Conséquences de l'abandon Du Projet de Réacteur Nucléaire de 4e génération «Astrid»."
- Group, The Open. 2019. "The TOGAF® Standard, Version 9.2 Translation Glossary: English – French." <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.
- Idef.com. 2019. "IDEF3 – Process Description Capture Method – IDEF." 2019. <https://www.idef.com/idef3-process-description-capture-method/%0Ahttp://www.idef.com/idef3-process-description-capture-method/>.
- IEC. 2019. "IEC 31010 Gestion Des Risques — Techniques d'évaluation Des Risques." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- IEEE. 2005. "IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process." *IEEE Computer Society*.
- INCOSE. 2016. "SeBok." *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*, no. October 2019: 945. <http://g2sebok.incose.org/app/mss/menu/index.cfm>.
- IPCC. 2022. "Change Climate Change 2022 - Mitigation of Climate." <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>.
- ISO. 2020. "ISO 19440:2020 Enterprise Modelling and Architecture — Constructs for Enterprise Modelling." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:19440:ed-2:v1:en:term:3.30>.
- ISO, IEC, and IEEE. 2011. "ISO/IEC/ IEEE 42010:2011 Systems and Software Engineering — Architecture Description." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. <https://doi.org/10.1007/BF01077867>.
- . 2019a. "ISO/IEC/IEEE 42020:2019 Software, Systems and Enterprise — Architecture Processes." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- . 2019b. "ISO/IEC/IEEE 42030:2019 Software, Systems and Enterprise — Architecture Evaluation Framework." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.

- ISO/IEC. 2016. "ISO/IEC TR 29110-1:2016 Systems and Software Engineerin - Lifecycle Profiles for Very Small Entities (VSEs) - Part 1 : Overview." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*. <https://www.iso.org/standard/62711.html>.
- ISO/IEC/IEEE. 2019. "ISO/IEC/IEEE 21840:2019 Systems and Software Engineering - Guidelines for the Utilization of ISO/IEC/IEEE 15288 in the Context of System of Systems (SoS)." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- ISO/IEC/IEEE 15026-1. 2019. "ISO/IEC/IEEE 15026-1:2019 Systems and Software Engineering — Systems and Software Assurance — Part 1: Concepts and Vocabulary." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- ISO/IEC/IEEE 15288. 2015. "ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and Software Engineering—System Life Cycle Processes." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- ISO/IEC/IEEE 15289:2019. 2019. "Systems and Software Engineering - Content of Life-Cycle Information Items (Documentation) - IEEE Standard." *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland* 2019: 1–94. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8767110>.
- Object Management Group (OMG). 2008a. "Business Process Maturity Model (BPMM)."
- . 2008b. "Software & Systems Process Engineering Meta-Model Specification V2.0," no. April: 236. <http://www.omg.org/spec/SPEM/2.0/PDF>.
- . 2015. "Business Motivation Model." <https://www.omg.org/spec/BMM/1.3/PDF>.
- . 2017. "Structured Patterns Metamodel Standard." <http://www.omg.org/spec/SPMS/20170601/SPMS.xmi><http://www.omg.org/spec/SPMS/20160301/PHORML.xml><http://www.omg.org/spec/SPMS/20160301/APML.xmi>.
- . 2018. "Structured Metrics Metamodel," no. June. <https://www.omg.org/spec/SMM/1.2/>.
- . 2019. "OMG Systems Modeling Language." <https://www.omg.org/spec/SysML/20181001/sysmldi.xmi>.
- "Loi N° 85-704 Du 12 Juillet 1985 Relative à La Maîtrise d’ouvrage Public et à Ses Rapports Avec La Maîtrise d’œuvre Privée." 1985.

Syndex. 2015. "Les Enjeux de La Sous-Traitance Nucléaire En France." www.syndex.fr.

"The ISO/IEC 25000 Series of Standards." 2022. ISO 25000 STANDARDS. 2022.
<https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards>.

Annexe A. Extraits du méta-modèle d'EVA-CIME

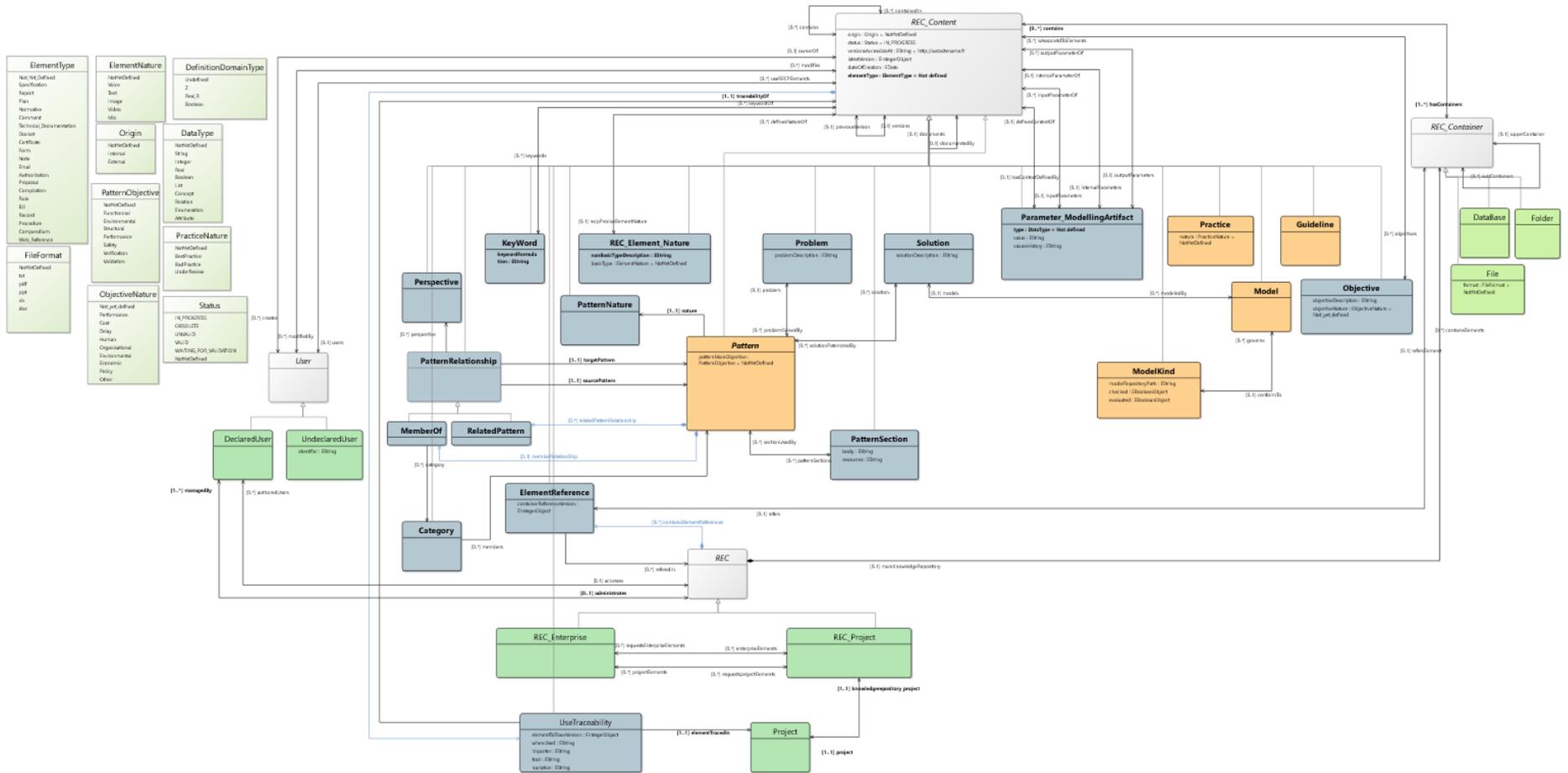


Figure 77. Extrait du méta-modèle centré sur le REC et sa structure

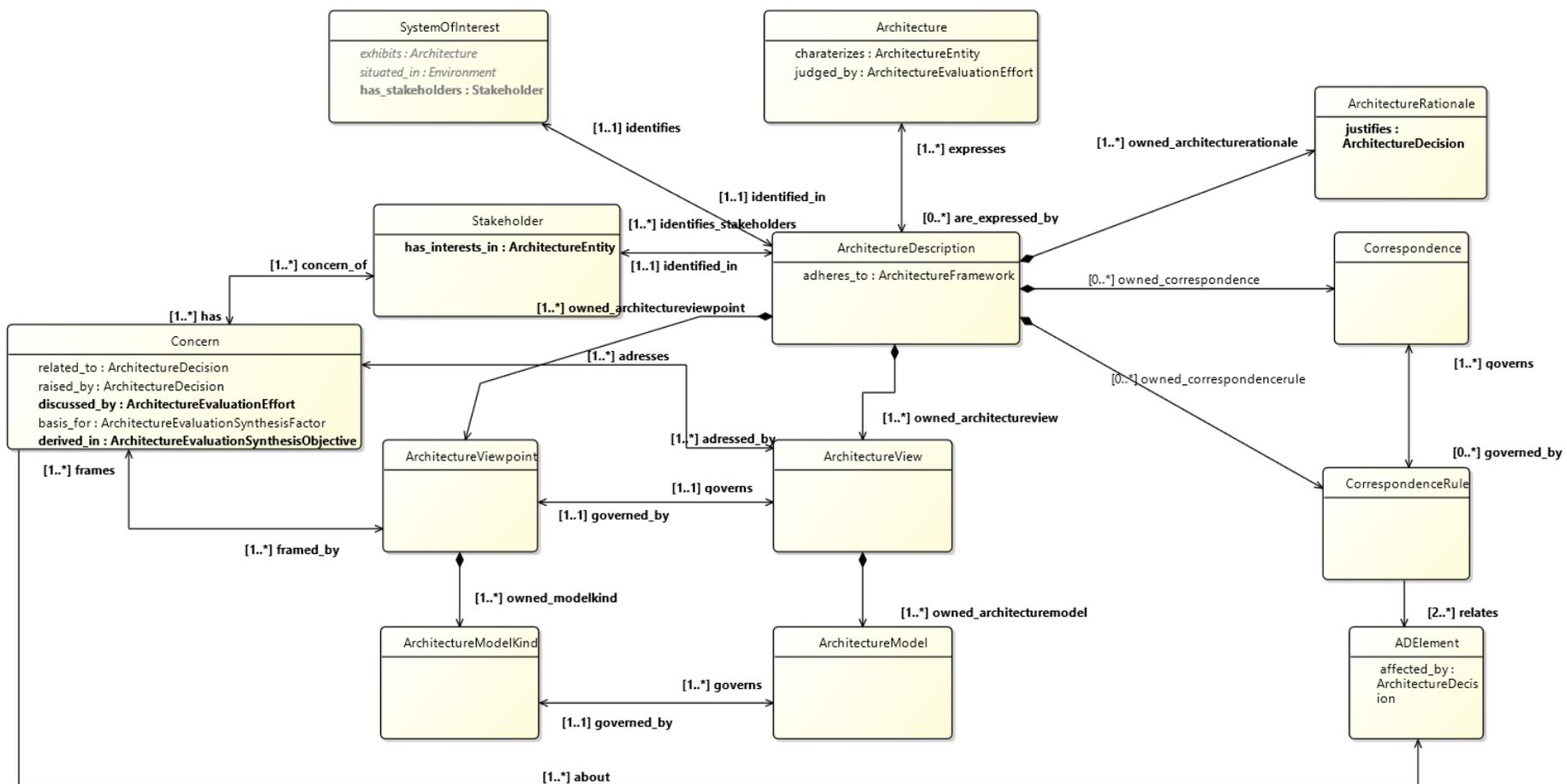


Figure 78. Méta-modèle pour la description d'architecture

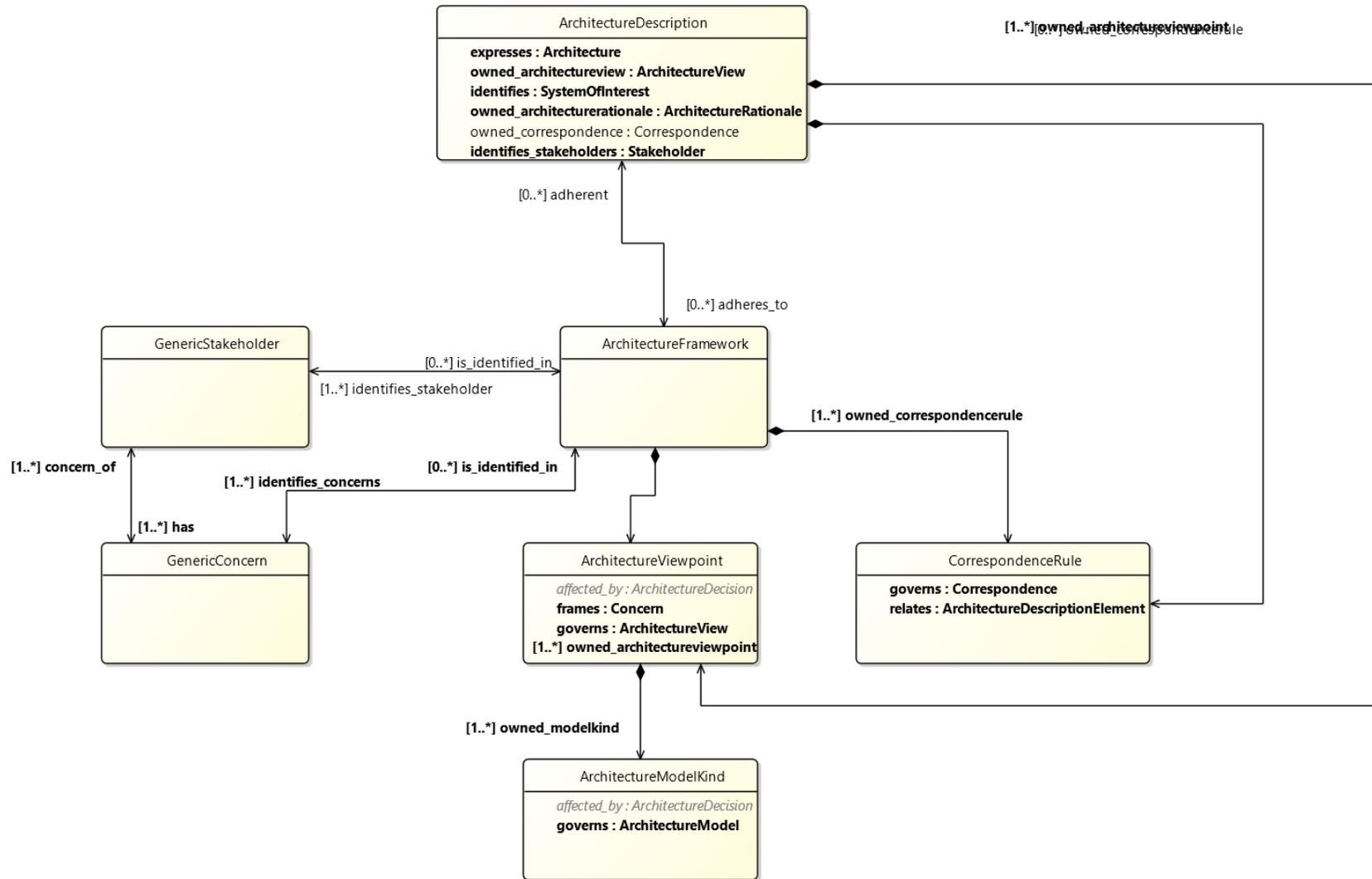


Figure 79. Méta-modèle pour un cadre de description d'architecture

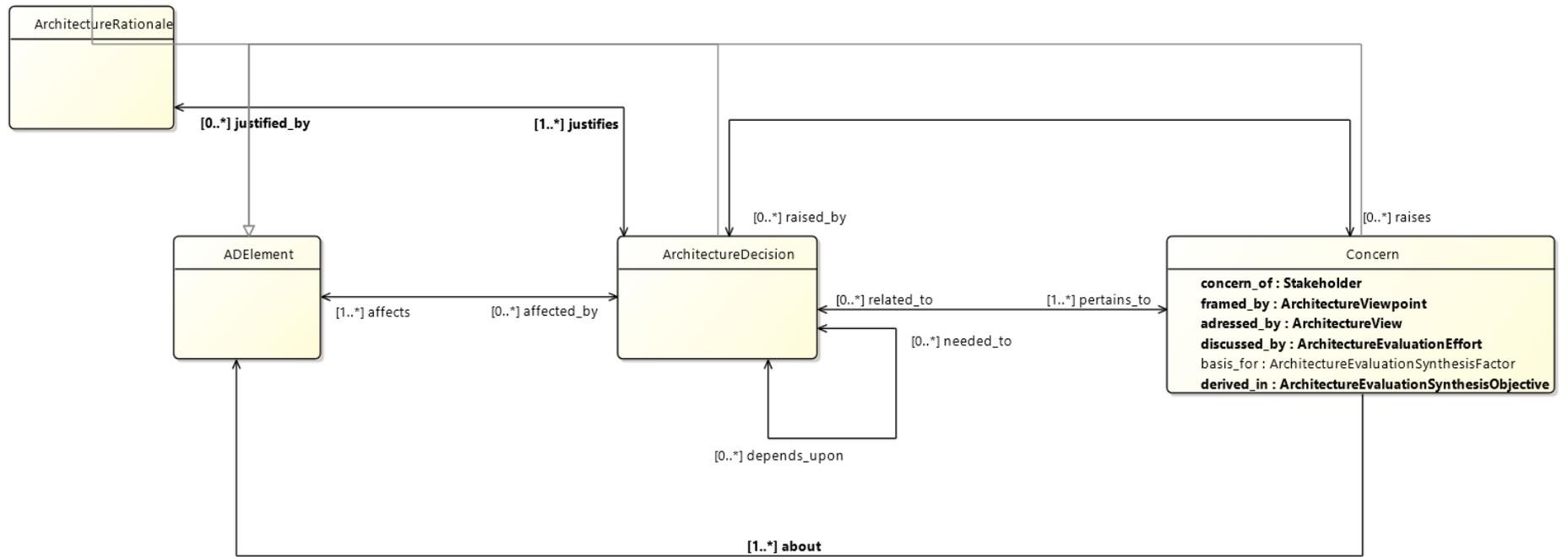


Figure 80. Méta-modèle pour les décisions d'architecture

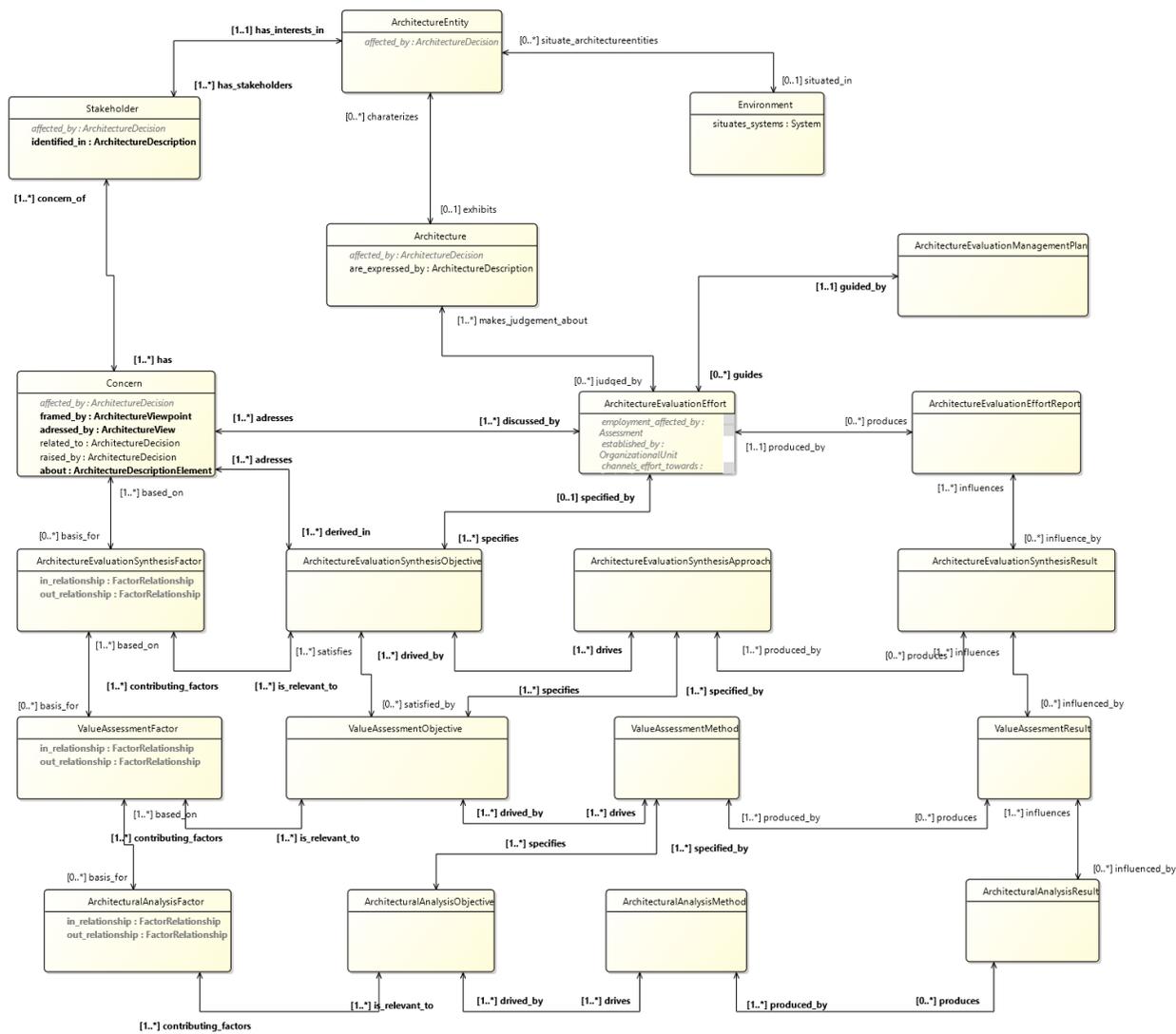


Figure 81. Méta-modèle pour l'évaluation d'architecture

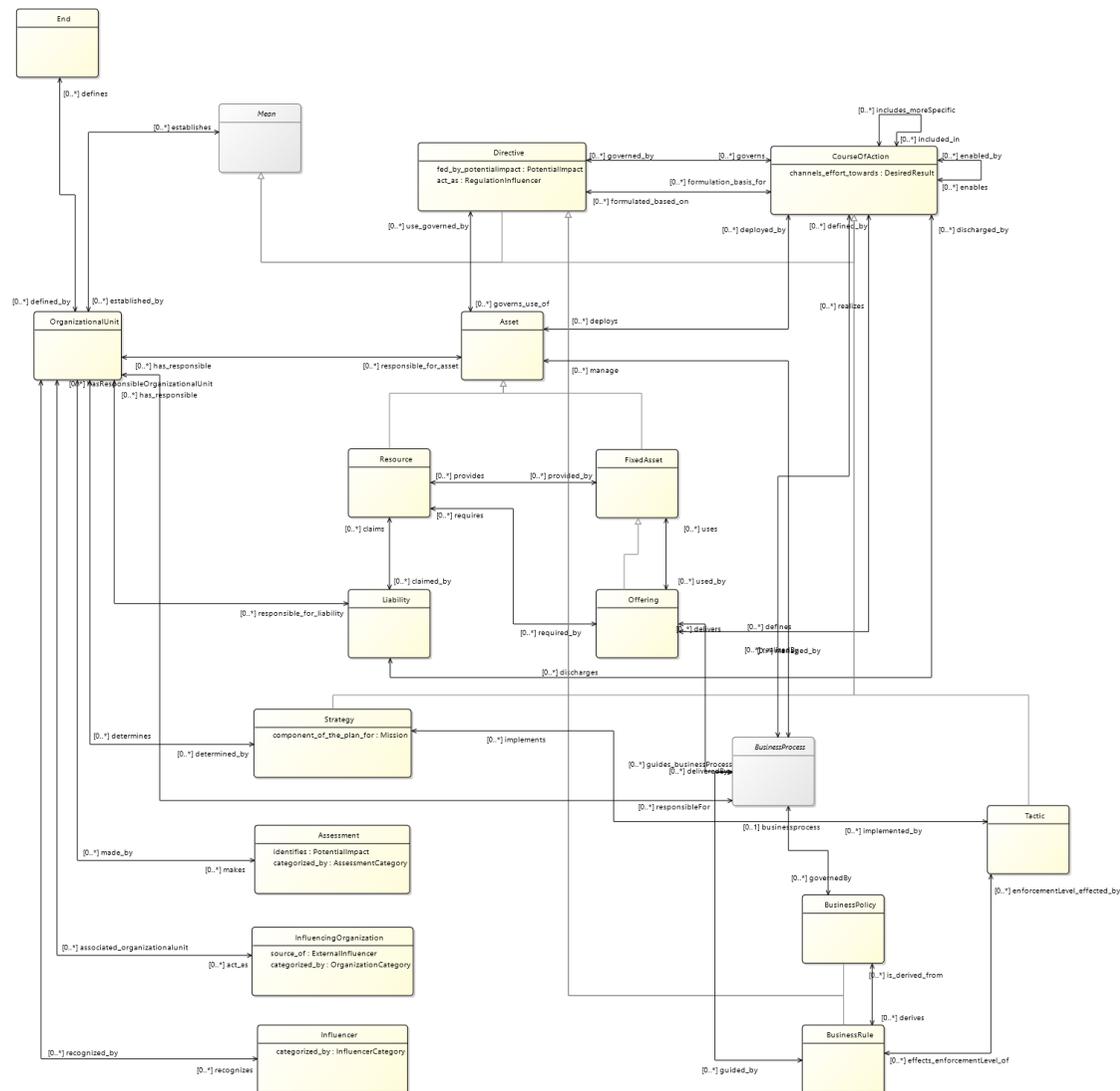


Figure 82. Meta-model Pour décrire les relation d'une unité d'organisation

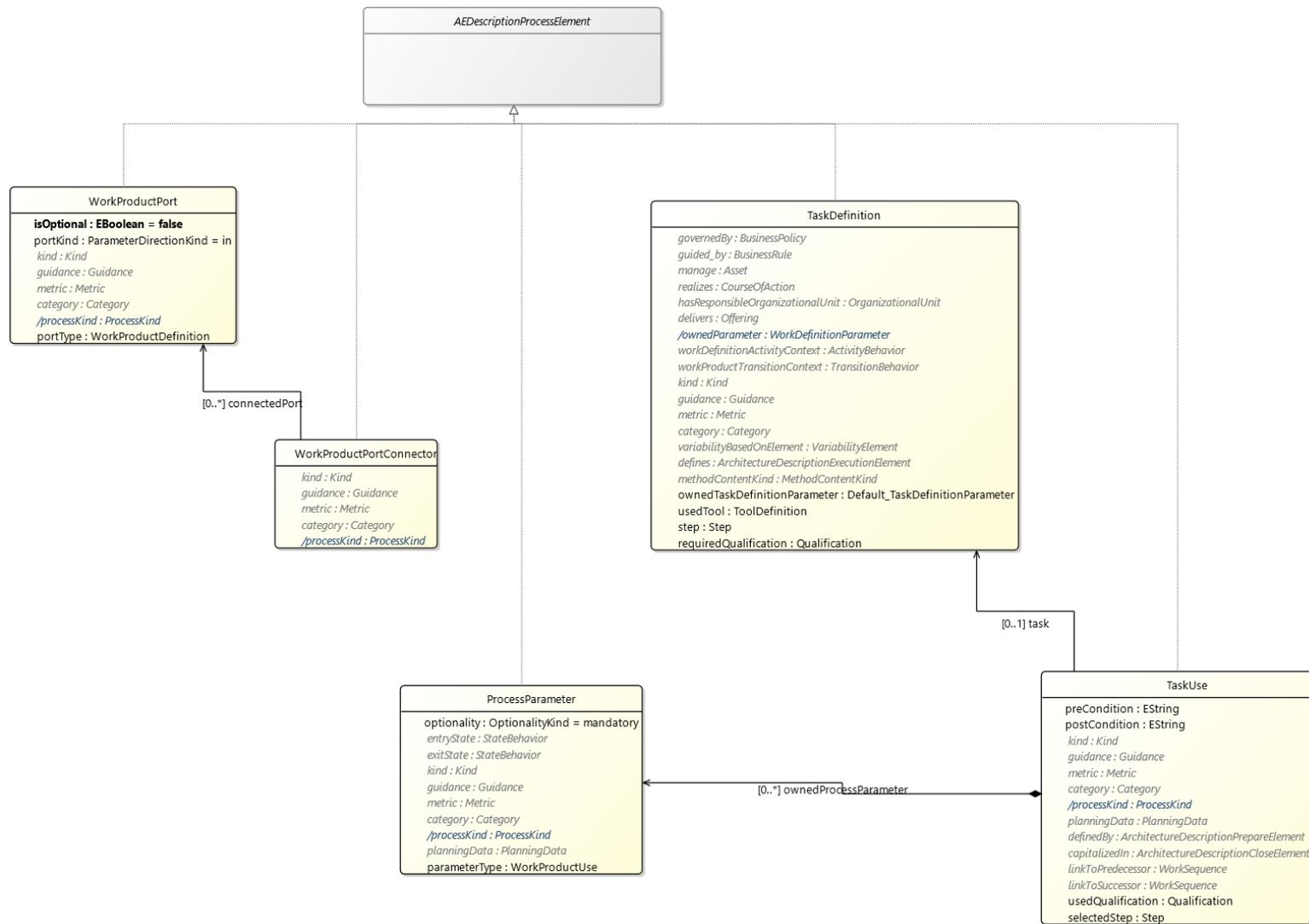


Figure 83. Méta-modèle des principaux concepts de la dimension processus

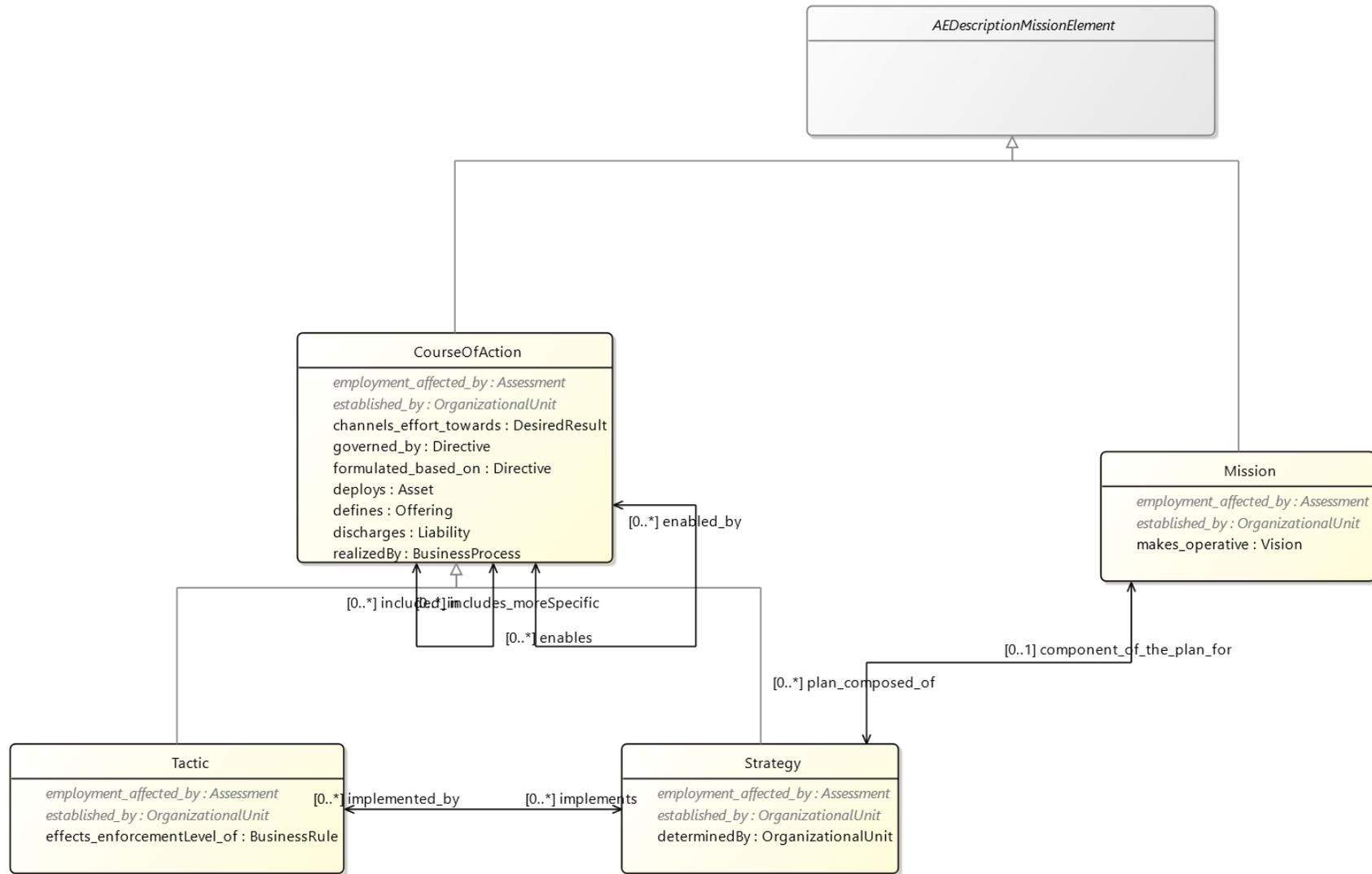


Figure 84. Méta-modèle des principaux concepts pour la dimension Mission

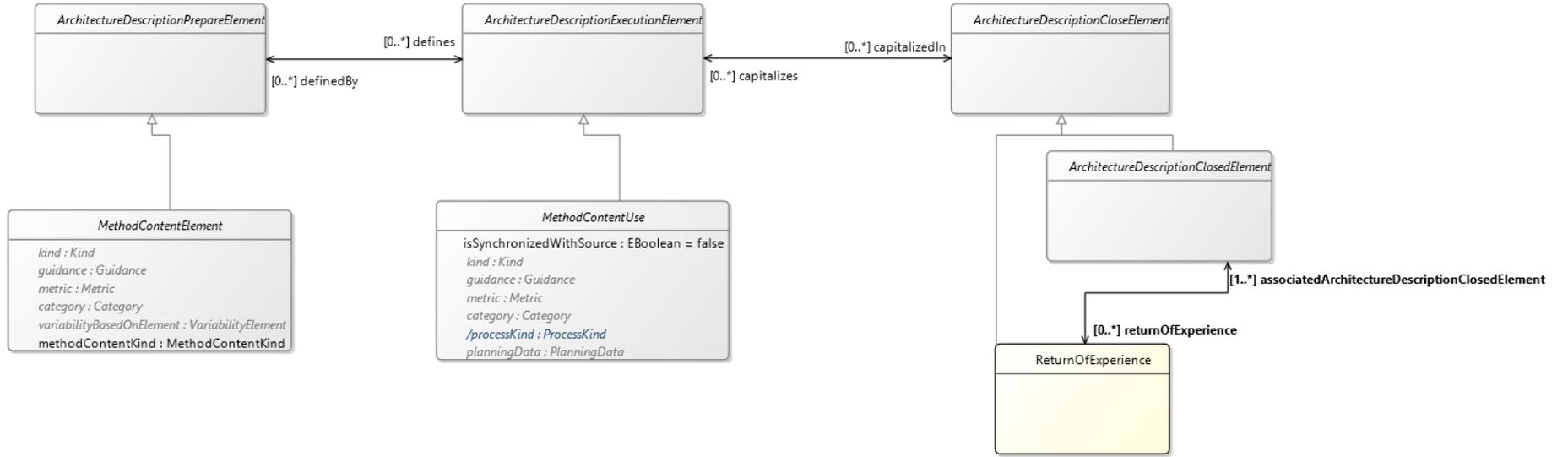


Figure 86. Méta-model des relations entre les étapes d'évaluation d'architecture

Annexe B. Démarche opératoire EVA-CIME Projet avec les flux d'informations

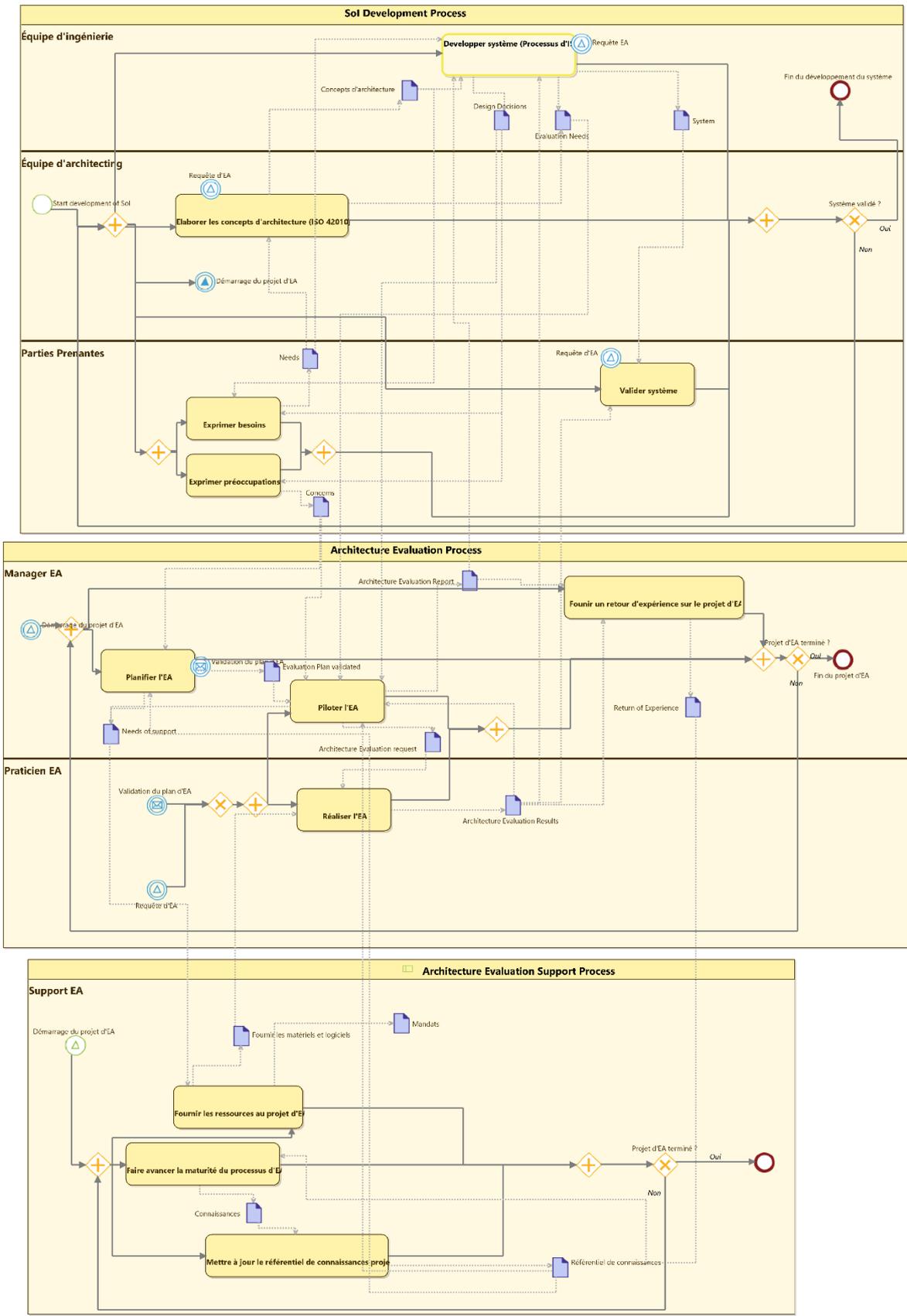


Figure 87. Démarche opératoire EVA-CIME Projet avec les flux d'information

Annexe C. Questions associées au modèle de maturité

Chacune des questions doit faire l'objet d'une réponse parmi : Ne Sais Pas ; Totalemment d'accord ; Plutôt d'accord ; Neutre ; Plutôt en désaccord ; Totalemment en désaccord.

Tableau 30. Liste de questions pour l'axe organisation du modèle de maturité

N°	QUESTION	REPONSE
1	Une fois que les responsabilités en évaluation d'architecture sont définies, elles sont clairement communiquées à chaque partie prenante	
2	Les objectifs d'évaluation d'architecture sont clairement communiqués	
3	Les rôles et les responsabilités pour l'évaluation d'architecture sont identifiés et documentés	
4	Les rôles et les responsabilités de gouvernance de l'évaluation d'architecture sont documentés	
5	Les parties prenantes du projet savent qui est impliqué dans l'évaluation d'architecture	
6	Les parties prenantes du projet savent qui est responsable pour chaque tâche d'évaluation d'architecture	
7	Les parties prenantes du projet connaissent bien les attentes pour chaque rôle et responsabilité	
8	En tant que partie prenante du projet, je sais qui est impliqué dans l'évaluation d'architecture	
9	En tant que partie prenante du projet, je sais qui est responsable pour chaque tâche d'évaluation d'architecture	
0	1 En tant que partie prenante du projet, je connais bien les attentes pour chaque rôle et responsabilité	
1	1 Un temps est alloué pour clairement définir rôles et responsabilités de l'évaluation d'architecture	

Tableau 31. Liste de questions pour l'axe méthode du modèle de maturité

N°	QUESTION	REPONSE
1	Les parties prenantes du projet savent comment définir les rôles et les responsabilités pour l'évaluation d'architecture	
2	Les parties prenantes du projet savent comment appliquer le processus d'évaluation d'architecture dans chacun des processus d'ingénierie, tout au long d'un projet	

N°	QUESTION	REPONSE
3	Les parties prenantes du projet savent comment appliquer le processus d'évaluation d'architecture dans au moins un des processus d'ingénierie, tout au long de ce projet	
4	En tant que partie prenante du projet, je sais comment définir les rôles et les responsabilités pour l'évaluation d'architecture	
5	En tant que partie prenante du projet, je sais comment appliquer le processus d'évaluation d'architecture dans chacun des processus d'ingénierie, tout au long d'un projet	
6	En tant que partie prenante du projet, je sais comment appliquer le processus d'évaluation d'architecture dans au moins un des processus d'ingénierie, tout au long de ce projet	

Tableau 32. Liste de questions pour l'axe processus du modèle de maturité

N°	QUESTION	REPONSE
1	Les parties prenantes du projet connaissent le processus d'évaluation d'architecture de l'entreprise	
2	Les parties prenantes du projet connaissent les processus proposés dans les normes qui évoquent l'évaluation d'architecture	
3	Les parties prenantes du projet savent l'importance et les enjeux de l'évaluation d'architecture pour mon projet	
4	Les parties prenantes du projet savent l'importance et les enjeux de l'évaluation d'architecture pour l'entreprise	
5	En tant que partie prenante du projet, je connais le processus d'évaluation d'architecture de l'entreprise	
6	En tant que partie prenante du projet, je connais les processus proposés dans les normes qui évoquent l'évaluation d'architecture	
7	En tant que partie prenante du projet, je sais l'importance et les enjeux de l'évaluation d'architecture pour mon projet	
8	En tant que partie prenante du projet, je sais l'importance et les enjeux de l'évaluation d'architecture pour l'entreprise	

Tableau 33. Liste de questions pour l'axe compétences du modèle de maturité

N°	QUESTION	REPONSE
1	Je sais ce qu'est l'évaluation d'architecture	
2	Je connais et pratique une technique d'évaluation d'architecture	

N°	QUESTION	REPONSE
3	Je sais quelles compétences sont nécessaires pour faire de l'évaluation d'architecture	
4	Je sais comment améliorer ces compétences	
5	J'attends que l'entreprise me propose des formations à l'évaluation d'architecture	
6	Je peux organiser ou dispenser une formation à l'évaluation d'architecture en interne dans l'entreprise	
7	Je peux organiser ou dispenser une sensibilisation à l'évaluation d'architecture en interne dans l'entreprise	
8	Je peux organiser ou dispenser une formation à l'évaluation d'architecture auprès des partenaires de l'entreprise	
9	Je peux organiser ou dispenser une sensibilisation à l'évaluation d'architecture des partenaires de l'entreprise	

Tableau 34. Liste de questions pour l'axe moyens du modèle de maturité

N°	QUESTION	REPONSE
1	Je sais quelles sont les sources que l'on peut utiliser pour rassembler les informations pour des évaluations d'architecture.	
2	Je sais où trouver ou qui questionner pour accéder à des retours d'expériences d'évaluation d'architecture	
3	Je sais où trouver ou qui questionner pour accéder aux documents décrivant les activités d'évaluation d'architecture qui sont mises en place dans un projet	
4	Je sais où trouver ou qui questionner pour accéder aux documents décrivant le processus d'évaluation d'architecture de l'entreprise	

Annexe D. Exemples de diagrammes pour représenter les éléments d'EVA-CIME Projet

Pour soutenir la description de l'unité organisationnelle, différents langages de modélisation peuvent être employés. Ici les langages de modélisation utilisés sont ceux implémentés dans l'outil Capella

Par exemple, les différentes parties prenantes impliquées dans les questions d'évaluation de la sûreté étant identifiées, la Figure 88 montre un Mission Blank diagram permettant de formaliser ces parties prenantes (rectangles bleus) et leurs missions respectives (ellipses brunes) dans la vue mission.

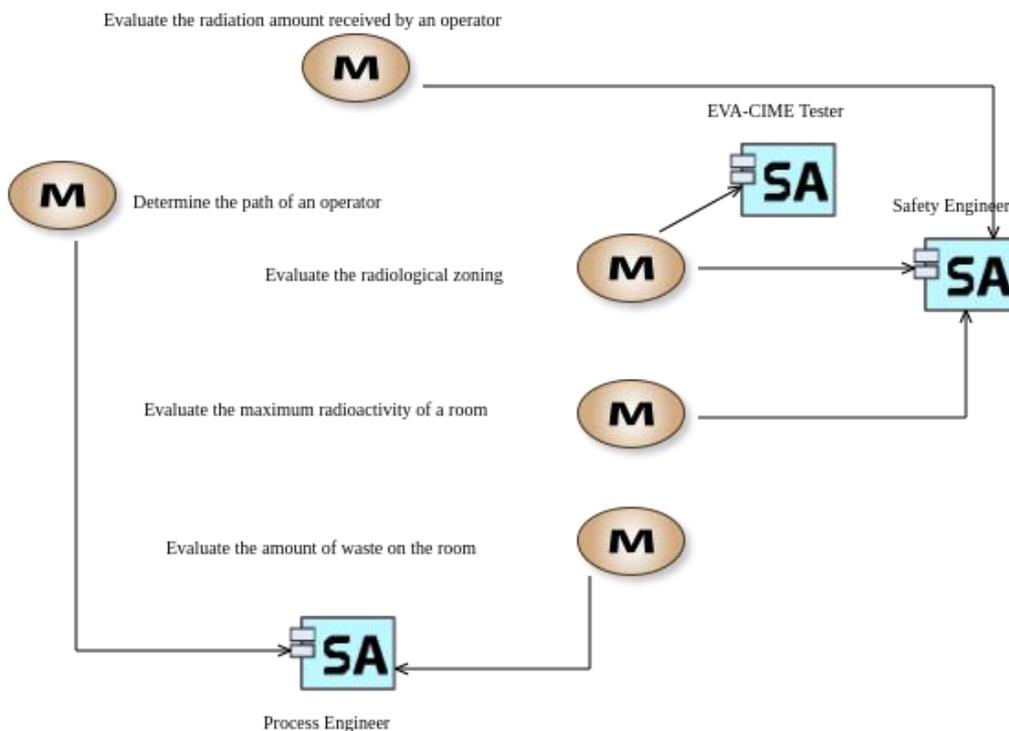


Figure 88. Missions de l'évaluation d'architecture et périmètres des parties prenantes impliquées, instanciation d'un type de modèle du point de vue mission, personnalisé pour le cas d'application.

Le réseau opérant doit être également défini. A titre d'exemple, la Figure 89 présente un Operational Architecture diagram permettant de formaliser une partie du réseau opérant dans la vue réseau opérant de l'évaluation d'architecture via des entités opérationnelles (carré gris).

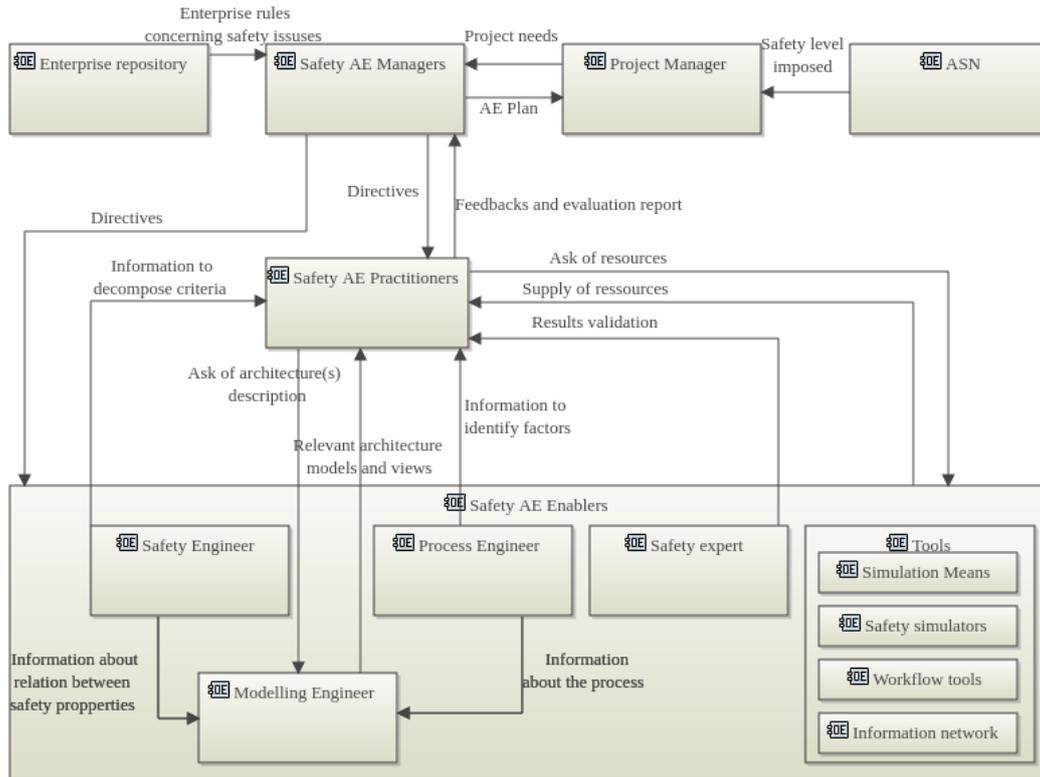


Figure 89. Extrait du réseau opérant de l'évaluation d'architecture, instanciation d'un type de modèle du point de vue réseau opérant personnalisé pour le cas d'application.

Le séquençement des activités d'évaluation d'architecture doit finalement être défini. La Figure 90 présente une Operational Process description permettant de formaliser le séquençement des activités d'évaluation d'architecture (carrés orange et carrés verts) dans la vue planning. Les carrés verts représentent les activités qui ont réellement été exécutées dans le cas d'application.



Figure 90: Extrait du séquençage des activités de l'évaluation d'architecture, instantiation d'un type de modèle du point de vue planning personnalisé pour le cas d'application.

Annexe E. Formulaire pour capturer les connaissances en évaluation d'architecture

E.1. Formulaire pour capturer des connaissances internes en évaluation d'architecture

Figure 91. Formulaire pour capturer les connaissances interne en évaluation d'architecture

(voir page suivante)



L'analyse système en ingénierie ☞

Les personnes impliquées dans des projets d'ingénierie de systèmes sont inévitablement appelées à devoir choisir et argumenter rationnellement entre plusieurs alternatives de solutions. Que vous soyez praticien, seulement intéressé ou concerné, nous souhaitons connaître votre avis, vos préférences voire vos pratiques et retours d'expérience sur ce que nous appelons dans la suite l'analyse système.

Nous vous proposons pour cela de remplir le questionnaire ci-dessous qui a pour but de cartographier les pratiques et besoins en analyse système pour tous les acteurs métier impliqués dans un projet d'ingénierie.

Pour aller plus loin avant de commencer ce questionnaire, l'analyse système a deux objectifs essentiels :

- Evaluer les différences et les écarts entre les propriétés de chacune de ces alternatives de solution par rapport à une solution idéale répondant aux exigences de toutes les parties prenantes du projet (coûts, temps de mise en service, performance, ...)
- Comparer ces alternatives entre elles afin d'aider au choix de celle qui devrait être l'objet des développements futurs et de justifier ce choix.

* Obligatoire

Introduction

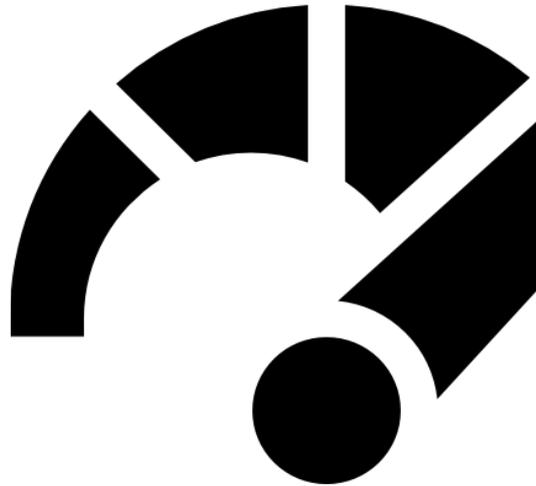
Que pensez-vous de l'affirmation suivante ?

1

Étant donnée la définition ci-dessus, je pense avoir déjà été impliqué dans des activités d'analyse système.

- C'est vrai
- C'est faux

Activités d'analyse de performance



par exemple : temps d'exécution, consommation d'énergie, fiabilité, ...

2

J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités : *

- Jamais
- Une fois
- Quelques fois
- Régulièrement

3

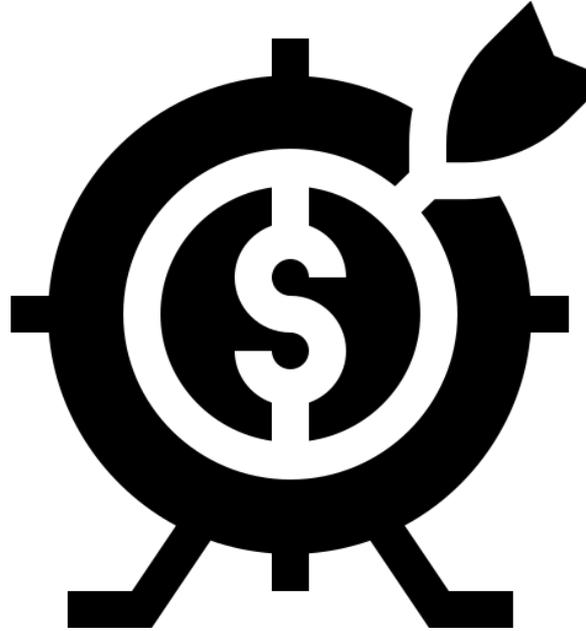
Cette implication s'est faite au travers de : *

	Jamais	Une fois	Quelques fois	Régulièrement
Analyse de performance de fonction (débit de matière, intensité de démarrage, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de propriétés opérationnelles (interopérabilité, sûreté de fonctionnement, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4

Autres types d'analyse de performance (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

Activités d'analyse de
coûts



5

J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités : *

- Jamais
- Une fois
- Quelques fois
- Régulièrement

6

Cette implication s'est faite au travers de : *

	Jamais	Une fois	Quelques fois	Régulièrement
Analyse de coûts matériel d'un produit	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de coûts d'étude et développement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de coûts de production	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de coûts d'exploitation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de coûts de soutien	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7

Autres types d'analyse de coûts (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

Activités d'analyse de risques techniques



8

J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités : *

- Jamais
- Une fois
- Quelques fois
- Régulièrement

9

Cette implication s'est faite au travers de : *

	Jamais	Une fois	Quelques fois	Régulièrement
Analyse de criticité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de vulnérabilité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de menaces	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse d'impact	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

10

Autres types d'analyse de risques techniques (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

Autres activités d'analyse

11

Avez vous été impliqué dans d'autres analyses qui n'ont pas été citées ? *

Oui

Non

12

Lesquels ? *

Compétences sur les approches et méthodes

13

Mon niveau de compétences sur les approches d'évaluation *

	Ne connais pas	Quelques connaissances	Appliqué dans un projet	Appliqué dans plusieurs projets	Maîtrise
Revue de concept	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parcours de modèle (Model walkthrough)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Audit de conformité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Enquête de satisfaction	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse multicritère	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Modélisation pour l'évaluation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Simulation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Analyse de la valeur	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14

Autre(s) approche(s) d'évaluation ?

15

Je connais des méthodes d'agrégation d'opinion *

- Je ne connais pas
- J'ai quelques connaissances
- J'ai déjà appliqué sur un projet
- J'ai déjà appliqué sur plusieurs projets
- Je maîtrise

16

Agrégation d'opinion *

- Delphi
- Fusion d'avis d'experts
- Autre

17

Je connais des méthodes et outils d'analyse de la qualité *

- Je ne connais pas
- J'ai quelques connaissances
- J'ai déjà appliqué sur un projet
- J'ai déjà appliqué sur plusieurs projets
- Je maîtrise

18

Méthodes et outils d'analyse de la qualité *

- Méthode Atam
- QFD
- Diagramme de Kano
- PDCA
- Autre

19

Je connais des méthodes d'analyse de risques *

- Je ne connais pas
- J'ai quelques connaissances
- J'ai déjà appliqué sur un projet
- J'ai déjà appliqué sur plusieurs projets
- Je maîtrise

20

Méthodes et outils d'analyse de risques *

- Amdec
- Mosar
- Arbres de défaillance
- RAMS
- Autre

21

Je connais des méthodes d'analyse multicritère *

- Je ne connais pas
- J'ai quelques connaissances
- J'ai déjà appliqué sur un projet
- J'ai déjà appliqué sur plusieurs projets
- Je maîtrise

22

Analyse multicritère *

- Méthode sans agrégation (Exemples : Analyse du pour et contre, Minimax, Maximin, ...)
- Méthode d'agrégation (Exemples : moyenne arithmétique pondérée, moyenne géométrique pondérée, MAUT...)
- Méthodes de comparaison puis d'agrégation (Exemples : AHP, Macbeth, ...)
- Méthodes de surclassement (Exemples : Electre, Prométhée, ...)
- Méthode d'agrégation non additive (Exemples : Intégrale de Choquet, intégrale de Sugeno)
- Prise en compte de l'incertitude et de l'imprécision (Exemples : Analyse de sensibilité, approches possibiliste, probabiliste ou qualitative)
- Autre

23

Utilisez-vous d'autres approches ou méthode d'analyse système non citée ?

Propositions

24

Pour chacune de ces affirmations quantifier le bénéfice qu'elle vous apporterait (1: non bénéfique et 6 : très bénéfique) ? *

	Sans opinion	1	2	3	4	5
Savoir définir des critères d'évaluation pour choisir des solutions en conception	<input type="radio"/>					
Savoir quantifier les impacts d'un choix technique sur le besoin d'un client et inversement	<input type="radio"/>					
Savoir construire des scénarios pour analyser la qualité d'une solution technique	<input type="radio"/>					
Disposer de ressource (expertise interne) dédiée à l'évaluation et l'analyse système	<input type="radio"/>					
Disposer de référentiels	Sans opinion	1	2	3	4	5

Prendre
davantage le
temps
d'analyser
des
propositions
techniques
avant d'en
choisir une

<input type="radio"/>					
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Avoir recours
plus
systématique-
ment à la
simulation
pour évaluer
les
performances
d'une
proposition
technique

<input type="radio"/>					
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Savoir
comment les
parties
prenantes
interagissent
avec le
système

<input type="radio"/>					
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

<input type="radio"/>					
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

25

Avez-vous d'autres propositions ? (sous la forme Proposition1 [Évaluation1] ; Proposition2 [Sans opinion ou 1 ou ... ou 6] ; ...)

Informations

26

Enfinement aviez-vous déjà fait de l'analyse système ? *

- Oui
- Non

27

Nombre d'années d'expérience *

- 0 - 2 ans
- 3 - 5 ans
- 6 - 10 ans
- 11 - 15 ans
- + 15 ans

28

Quel est votre niveau de poste actuel *

- Consultant junior
- Consultant senior
- Expert
- Coordinateur Technique
- Chef de projet
- Directeur de projet
- Manager Technique
- Autre

Ce contenu n'a pas été créé ni n'est approuvé par Microsoft. Les données que vous soumettez sont envoyées au propriétaire du formulaire.

 Microsoft Forms

E.2. Synthèse des réponses au formulaire pour capturer des connaissances internes en évaluation d'architecture

Figure 92. Synthèse des réponses au formulaire pour capturer des connaissances internes en évaluation d'architecture

(voir page suivante)

L'analyse système en ingénierie

8

Réponses

10:07

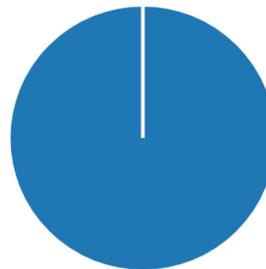
Durée moyenne de remplissage

Actif

État

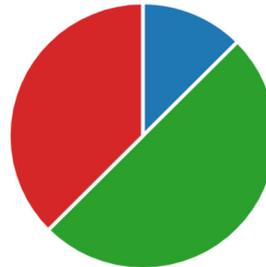
1. Étant donnée la définition ci-dessus, je pense avoir déjà été impliqué dans des activités d'analyse système.

● C'est vrai	8
● C'est faux	0



2. J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités :

● Jamais	1
● Une fois	0
● Quelques fois	4
● Régulièrement	3

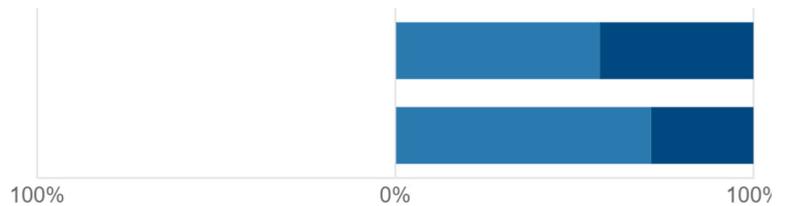


3. Cette implication s'est faite au travers de :

■ Jamais
 ■ Une fois
 ■ Quelques fois
 ■ Régulièrement

Analyse de performance de fonction (débit de matière, intensité de démarrage, ...)

Analyse de propriétés opérationnelles (interopérabilité, sûreté de fonctionnement, ...)



4. Autres types d'analyse de performance (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

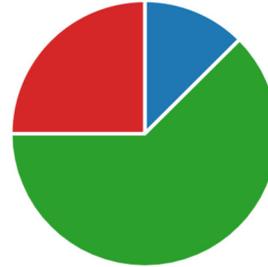
1
Réponses

Dernières réponses

"Analyse multicritère pour choix de solution technique ou d'implanta..."

5. J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités :

● Jamais	1
● Une fois	0
● Quelques fois	5
● Régulièrement	2



6. Cette implication s'est faite au travers de :

■ Jamais
 ■ Une fois
 ■ Quelques fois
 ■ Régulièrement

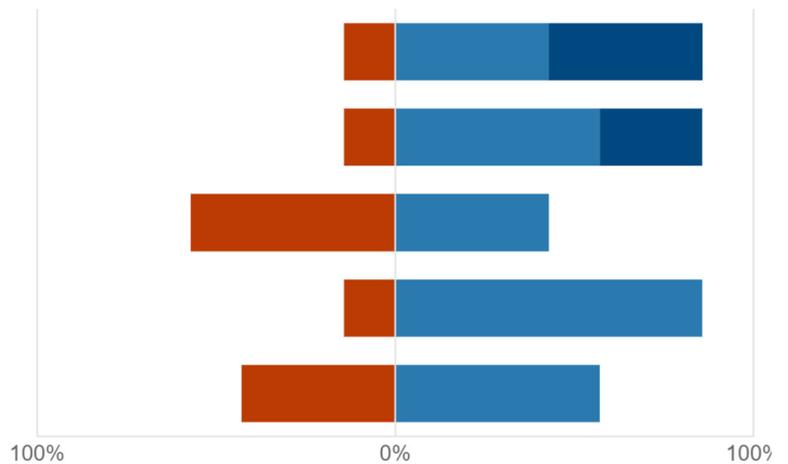
Analyse de coûts matériel d'un produit

Analyse de coûts d'étude et développement

Analyse de coûts de production

Analyse de coûts d'exploitation

Analyse de coûts de soutien



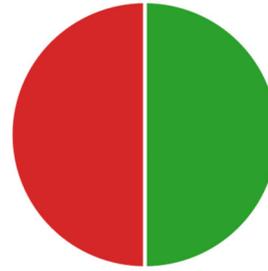
7. Autres types d'analyse de coûts (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

0
Réponses

Dernières réponses

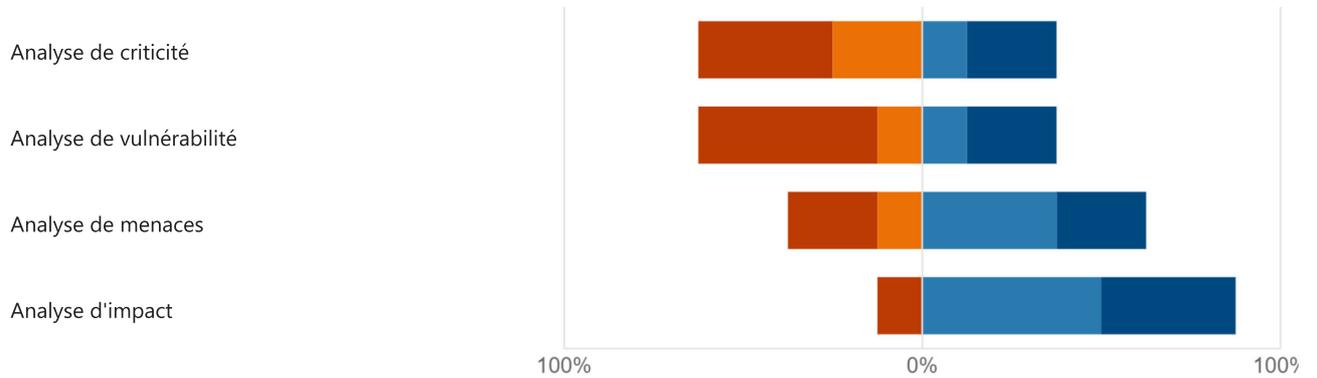
8. J'ai déjà été impliqué dans ce genre d'activités :

● Jamais	0
● Une fois	0
● Quelques fois	4
● Régulièrement	4



9. Cette implication s'est faite au travers de :

■ Jamais
 ■ Une fois
 ■ Quelques fois
 ■ Régulièrement



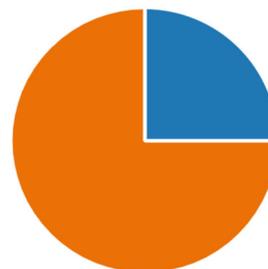
10. Autres types d'analyse de risques techniques (sous la forme NomAnalyse1 [une des fréquences du tableau ci-dessus] ; NomAnalyse2 [Jamais ou ... ou Régulièrement] ; ...) :

0
Réponses

Dernières réponses

11. Avez vous été impliqué dans d'autres analyses qui n'ont pas été citées ?

● Oui	2
● Non	6



12. Lesquels ?

2
Réponses

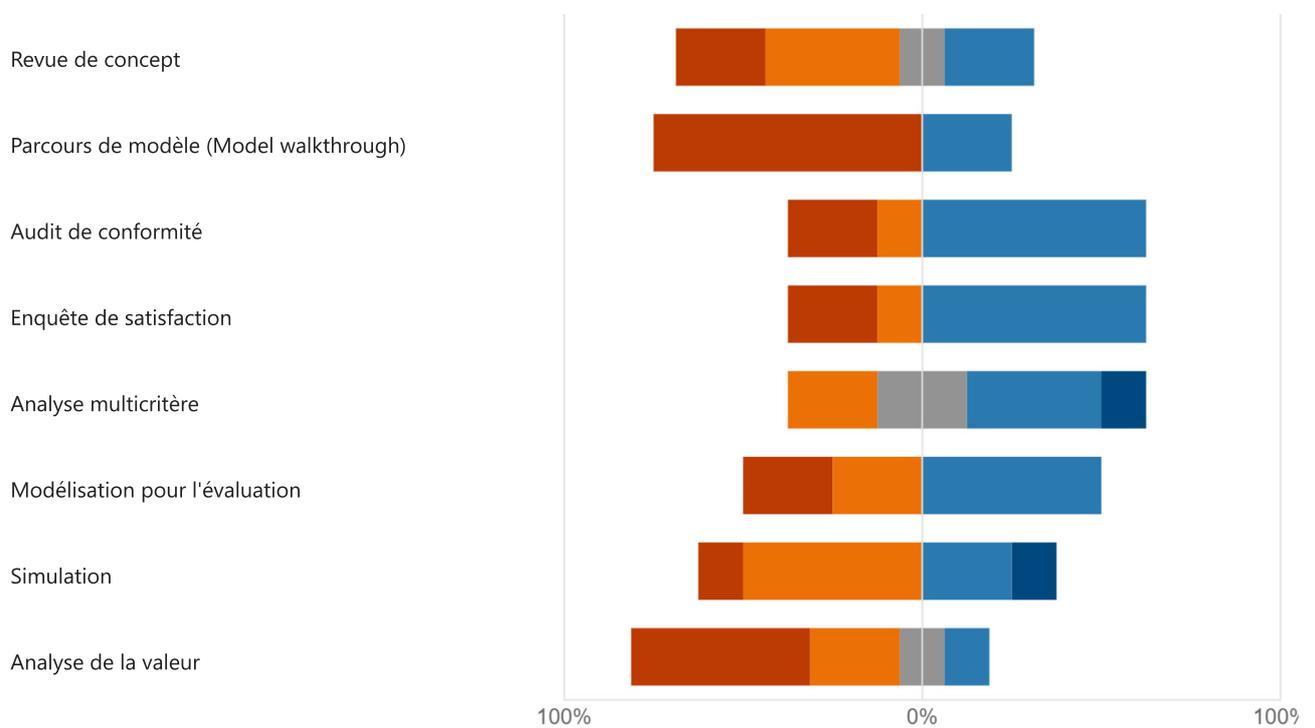
Dernières réponses

"analyse de coût de transformation des processus analyse de coût de ...

"AMDEC, HAZOP, SURETE (tous type de risque), Analyse de type cost ...

13. Mon niveau de compétences sur les approches d'évaluation

■ Ne connais pas ■ Quelques connaissances ■ Appliqué dans un projet ■ Appliqué dans plusieurs projets
■ Maîtrise



14. Autre(s) approche(s) d'évaluation ?

2
Réponses

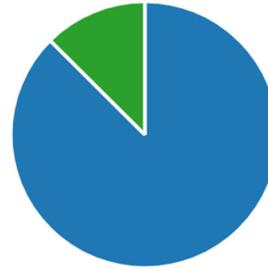
Dernières réponses

"Ingénierie Systeme"

"Reuves Maquettes, Revues de conception"

15. Je connais des méthodes d'agrégation d'opinion

● Je ne connais pas	7
● J'ai quelques connaissances	0
● J'ai déjà appliqué sur un projet	1
● J'ai déjà appliqué sur plusieurs p...	0
● Je maîtrise	0



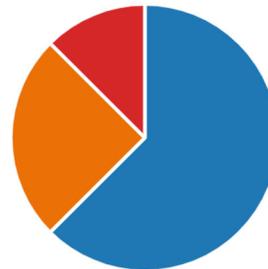
16. Agrégation d'opinion

● Delphi	0
● Fusion d'avis d'experts	0
● Autre	1



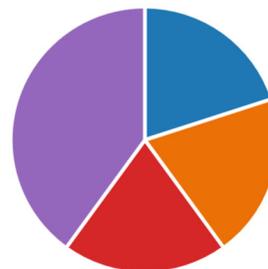
17. Je connais des méthodes et outils d'analyse de la qualité

● Je ne connais pas	5
● J'ai quelques connaissances	2
● J'ai déjà appliqué sur un projet	0
● J'ai déjà appliqué sur plusieurs p...	1
● Je maîtrise	0



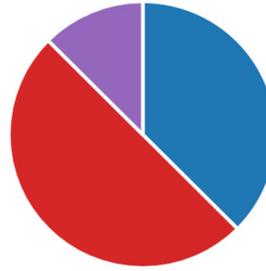
18. Méthodes et outils d'analyse de la qualité

● Méthode Atam	1
● QFD	1
● Diagramme de Kano	0
● PDCA	1
● Autre	2



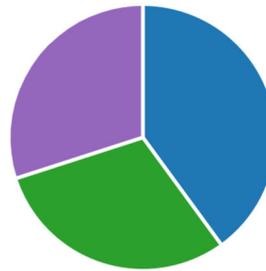
19. Je connais des méthodes d'analyse de risques

● Je ne connais pas	3
● J'ai quelques connaissances	0
● J'ai déjà appliqué sur un projet	0
● J'ai déjà appliqué sur plusieurs p...	4
● Je maîtrise	1



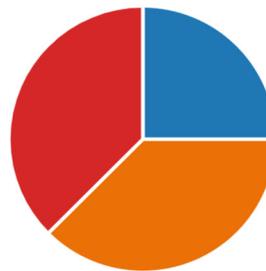
20. Méthodes et outils d'analyse de risques

● Amdec	4
● Mosar	0
● Arbres de défaillance	3
● RAMS	0
● Autre	3



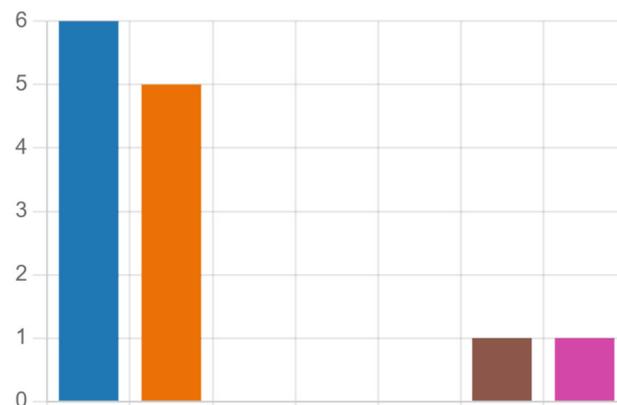
21. Je connais des méthodes d'analyse multicritère

● Je ne connais pas	2
● J'ai quelques connaissances	3
● J'ai déjà appliqué sur un projet	0
● J'ai déjà appliqué sur plusieurs p...	3
● Je maîtrise	0



22. Analyse multicritère

● Méthode sans agrégation (Exem...	6
● Méthode d'agrégation (Exemple...	5
● Méthodes de comparaison puis ...	0
● Méthodes de surclassement (Ex...	0
● Méthode d'agrégation non addi...	0
● Prise en compte de l'incertitude ...	1
● Autre	1



23. Utilisez-vous d'autres approches ou méthode d'analyse système non citée ?

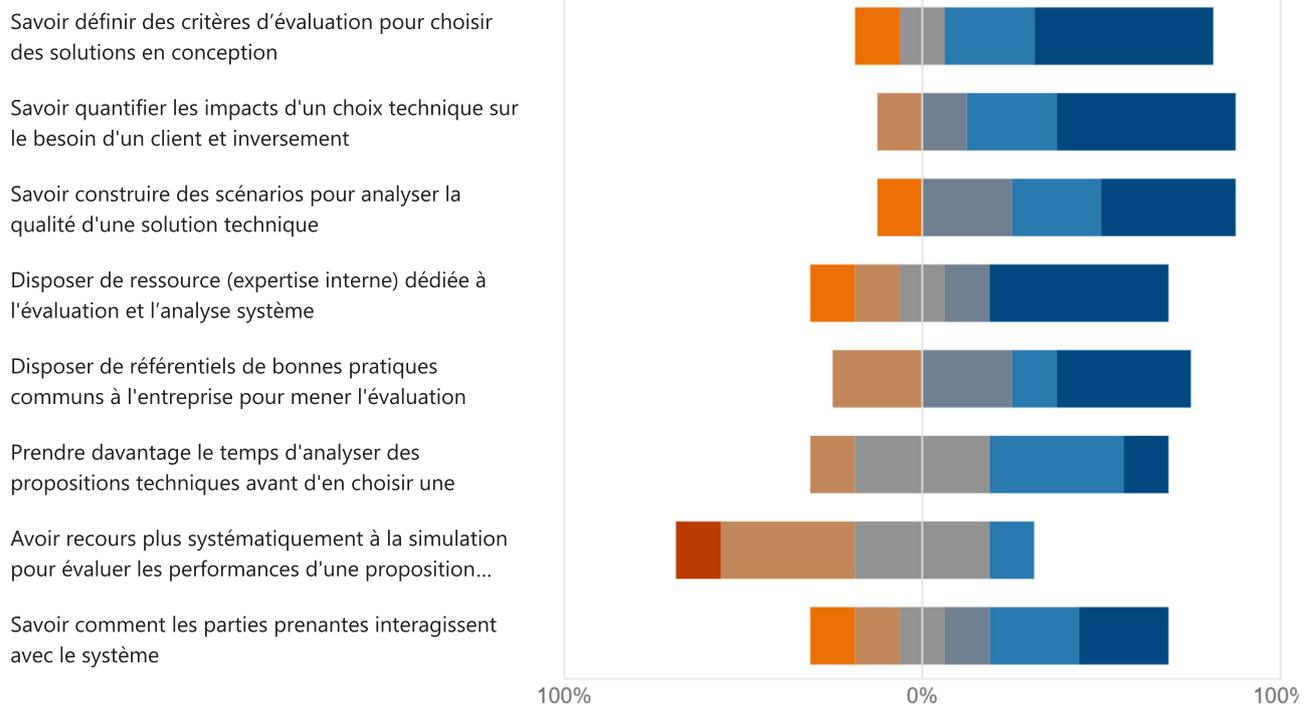
1

Réponses

Dernières réponses
"HAZOP"

24. Pour chacune de ces affirmations quantifier le bénéfice qu'elle vous apporterait (1: non bénéfique et 6 : très bénéfique) ?

■ Sans opinion ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6



25. Avez-vous d'autres propositions ? (sous la forme Proposition1 [Évaluation1] ; Proposition2 [Sans opinion ou 1 ou ... ou 6] ; ...)

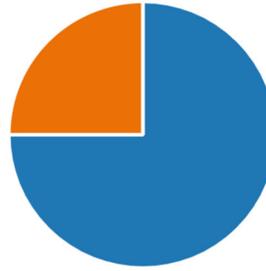
0

Réponses

Dernières réponses

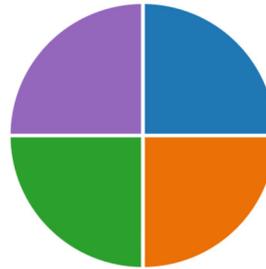
26. Finalement aviez-vous déjà fait de l'analyse système ?

● Oui	6
● Non	2



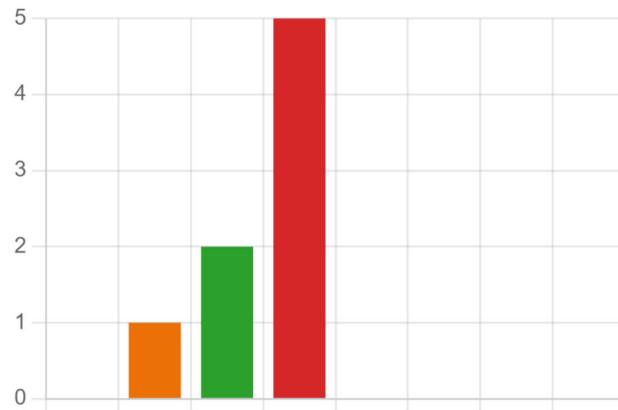
27. Nombre d'années d'expérience

● 0 - 2 ans	2
● 3 - 5 ans	2
● 6 - 10 ans	2
● 11 - 15 ans	0
● + 15 ans	2



28. Quel est votre niveau de poste actuel

● Consultant junior	0
● Consultant senior	1
● Expert	2
● Coordinateur Technique	5
● Chef de projet	0
● Directeur de projet	0
● Manager Technique	0
● Autre	0



Résumé :

Les projets de développement d'installations nucléaires de base (INBs) sont particulièrement complexes en raison de la nature même du système visé, des durées de ces projets, du contexte évolutif (e.g. réglementaire, besoins, ...), des parties prenantes en présence et des exigences de haut niveau auxquelles il faut répondre en matière de performance, de sûreté et de sécurité. La plupart des coûts de ces projets sont engagés à un stade très précoce, dès les premières ébauches de l'architecture d'une INB. Ces premières définitions d'architecture se situent à un niveau conceptuel très élevé et fournissent les premiers principes de solutions. La phase d'ingénierie précise et concrétise l'architecture la plus satisfaisante en suivant les principes et les outils de l'Ingénierie Système, elle se fonde sur l'approche MBSE. Les solutions d'architecture doivent être modélisées, vérifiées, validées, analysées et régulièrement évaluées tout au long du cycle de vie des INB.

Le travail présenté vise à spécifier et à formaliser une méthode baptisée EVA-CIME pour aider les ingénieurs et les architectes à modéliser, vérifier et valider puis à évaluer le plus tôt possible et en toute confiance les différentes solutions architecturales possibles pour le Système d'Intérêt. Ces travaux de recherche se concentrent particulièrement sur le rôle de la méthode attendue pour soutenir, surveiller et sécuriser les activités d'évaluation des architectures candidates.

Les concepts identifiés sont synthétisés et intégrés dans un méta-modèle à partir duquel des langages de modélisation peuvent être proposés pour modéliser les activités, ressources, moyens et techniques, et l'organisation globale nécessaire pour contrôler et mener à bien l'évaluation des architectures. La démarche opératoire reprend et formalise les pratiques et usages à la fois au niveau de l'entreprise pour déployer ces activités d'évaluation et les améliorer, et au niveau des projets de façon plus opérationnelle. La méthode EVA-CIME propose enfin un modèle de maturité de l'évaluation d'architectures pour faciliter le déploiement et de mettre en place une culture et une démarche d'amélioration continue de la méthode au travers de recommandations.

En synthèse, EVA-CIME est une méthode basée sur des modèles pour aider à la mise en place, le pilotage et la clôture de l'évaluation d'architectures au sein d'une organisation.

Abstract:

Nuclear facility development projects (NF) are particularly complex due to the nature of the system involved, the duration of these projects, the evolving context (e.g., regulatory, needs, ...), of the stakeholders involved, and the high-level requirements in terms of performance, safety and security to meet. Most projects' costs are incurred very early, from the first drafts of a NF's architecture.. These early architecture definitions are highly conceptual and provide the first solution directions. The engineering phase specifies and concretizes the most satisfactory architecture by following the principles and tools of Systems Engineering based on the MBSE approach. The architecture solutions must be modeled, verified, validated, analyzed and regularly evaluated throughout the NF life cycle.

The presented work aims at specifying and formalizing a method named EVA-CIME to help engineers and architects model, verify and validate and then evaluate as soon as possible and with confidence the different possible architectural solutions for the System of Interest. This research focuses mainly on the role of the expected method to support, monitor, and secure the evaluation activities of candidate architectures

These identified concepts are synthesized and integrated into a meta-model from which modeling languages can be proposed to model the activities, resources, means, techniques, and the global organization necessary to control and carry out the evaluation of the architectures. The operational approach takes up and formalizes the practices and uses both at the enterprise level to deploy these evaluation activities and improve them and at the project level in a more operational way. Finally, the EVA-CIME method proposes an architecture assessment maturity model to facilitate deployment and establish a culture and a continuous improvement approach to the method through recommendations.

In summary, EVA-CIME is a method based on models to help set up, manage and close the evaluation of architectures within an organization.