



HAL
open science

Méthode basée sur une approche systémique pour l'organisation et le suivi des chantiers d'Assainissement et de Démantèlement d'installations nucléaires

Maxence Lafon

► **To cite this version:**

Maxence Lafon. Méthode basée sur une approche systémique pour l'organisation et le suivi des chantiers d'Assainissement et de Démantèlement d'installations nucléaires. Autre [cs.OH]. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2019. Français. NNT : 2019EMAL0006 . tel-02886626

HAL Id: tel-02886626

<https://theses.hal.science/tel-02886626>

Submitted on 1 Jul 2020

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 D'IMT MINES ALES

En Systèmes Automatiques et Microélectroniques

École doctorale Information, Structure et Systèmes I2S

Unité de recherche Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production LGI2P

Méthode basée sur une approche systémique pour l'organisation et le suivi des chantiers d'Assainissement et de Démantèlement des installations nucléaires

Présentée par Maxence LAFON

Le 28 octobre 2019

Sous la direction de Vincent CHAPURLAT

Devant le jury composé de

Didier CRESTANI, Professeur, Université de Montpellier

Emmanuel CAILLAUD, Professeur, Université de Strasbourg

Éric LEVRAT, Professeur, Université de Lorraine

Philippe GIRONES, HdR, CEA

Vincent CHAPURLAT, Professeur, IMT Mines Alès

Jean-François MILOT, Chef du LTIS, CEA

Cyril MOITRIER, Chef de la CCMA, CEA

Président du jury

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Directeur de thèse

Encadrant

Encadrant

Remerciements

Trois années de réflexions intenses pour appréhender un domaine complexe à de nombreux niveaux, et je dois reconnaître qu'il n'est rien de plus complexe dans ce manuscrit que de retranscrire un ensemble d'émotions, nombreuses et variées, dans une simple case, ou « point de vue » : les Remerciements. Quelle approche utiliser ? Puis-je transposer ma Méthode à cette tâche ?

Me voici donc arrivé à la partie la plus « complexe » de ce manuscrit qui, je l'espère sincèrement, retranscrira correctement ces émotions et intégrera tous celles et ceux qui m'ont permis d'en arriver là. Je me permets d'exprimer ici ma plus grande gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à m'amener jusqu'ici et m'ont donné l'autorisation et le courage de m'exprimer sur ces travaux de recherche.

Je tiens à remercier tout d'abord tous ceux qui ont accepté d'être membres de mon jury de soutenance. Je suis extrêmement reconnaissant envers Emmanuel CAILLAUD et Éric LEVRAT, qui ont accepté d'investir de leur temps pour découvrir, lire, et être rapporteurs de ce manuscrit. Je suis convaincu qu'outre une prise de recul sur cette thèse, cela me permettra de m'améliorer à l'avenir dans mes travaux de recherche.

Je suis également très reconnaissant envers Didier CRESTANI, qui a accepté d'être examinateur dans mon jury de soutenance, mais qui m'a également encouragé dans mes travaux de thèse, d'abord en tant que responsable de la formation SYAM de l'école doctorale I2S, puis chaque année en tant que membre de mes deux CSI.

Cette thèse au CEA n'aurait pas pu voir le jour sans les efforts de Philippe GIRONES qui, au cours de mon projet de fin d'études d'ingénieur, a trouvé dans mes travaux d'Ingénierie Système un grand intérêt à les pousser vers un cadre beaucoup plus global. Merci pour cela et pour les riches échanges que nous avons pu avoir.

Un grand merci également à Cyril MOITRIER pour m'avoir soutenu dans mes travaux depuis mon projet de fin d'études jusqu'à la fin de cette thèse, en m'apportant continuellement de nombreuses connaissances dans le domaine de l'assainissement et du démantèlement nucléaire, via des échanges toujours riches et pragmatiques.

Afin d'accomplir ces travaux de thèse, Jean-François MILOT a été un encadrant admirable. Il m'a proposé un environnement de travail agréable et chaleureux, en étant toujours très disponible et en m'apportant un point de vue complémentaire toujours très riche. Je l'en remercie grandement.

Je souhaiterais tirer mon chapeau à Vincent CHAPURLAT, qui a été un formidable directeur de thèse et m'a supporté depuis maintenant plus de trois ans. Ce fut un véritable coach dans cette aventure qu'est le projet de doctorat. Qui pourrait prétendre à meilleur mentor ? Je n'oublierai jamais comment le mélange entre brainstormings calmes et créatifs, débats virulents et pauses sincères et amicales, fut une recette efficiente (qui je l'espère se perpétuera !) pour, sans cesse, se remettre en question et avancer, tout en restant dans une atmosphère sereine et confidente. Pour cela, vraiment, un énorme merci !

L'équipe du L2ES, devenu LTIS, m'a accueilli en me montrant toujours une grande humanité. Mais cette équipe ne se réduit pas au simple LTIS, elle concerne aussi plus largement le service dont il dépend, le

SA2I. Je remercie ainsi grandement Anne, Jean-Louis, Marie-Hélène, Fanny, Florian, Didier H., Pierre S., Mickaël, François G., Christophe, Sofiane, Aziz, Camilia, Lucas, Nathalie, Sophie et Catherine. Les échanges divers, riches et variés, mais aussi les pauses café du matin et les repas du midi, qui m'auront permis via leurs débats animés de m'exercer à d'autres « thèses », me manqueront beaucoup.

Ce cadre humain a été l'occasion de formidables rencontres qui se sont transformées en amitiés : merci à ma poulette ex-coloc Julie A., à Pierre C., à Anaïs, à Julie P. (beaucoup de Julies géniales !), et à Joshua.

Je remercie également l'ensemble des personnes, du CEA et d'ailleurs, avec qui j'ai pu travailler au cours de cette thèse. Je pense notamment à : Jérémy B., Laurie, Faris, Yann, Fabien mais aussi Éric G., François B., Jean-Marc, Didier L.B., Élise, Jérôme, et Daniel. Merci à l'ensemble des personnes qui m'ont amené vers cette thèse et qui m'ont soutenu pour la réaliser : Jérémy S., Julien, Khalil, Isabelle, Célia, et Camille. Merci à tous ceux qui ont montré leur intérêt pour ces travaux.

Je remercie ensuite les personnels du LGI2P de l'IMT Mines Alès et de l'école doctorale I2S qui m'ont soutenu au cours de ces travaux de thèse, ainsi que les membres de l'AFIS. Je remercie tous les personnels administratifs, d'entretien, de gestion informatique et d'autres fonctions support, qui m'ont offert un espace de travail agréable.

Je remercie enfin tous celles et ceux qui ont participé de loin ou de près à me former durant ces trois années, avec une pensée particulière à Beverley, qui m'a permis de prendre confiance en moi dans l'exercice loin d'être évident qu'est la conférence en anglais.

Il y a trois ans de cela, la simple pensée de parler devant un public m'effrayait. Ma formation d'ingénieur et toutes les très belles activités que j'avais pu réaliser, tant professionnelles qu'humaines, m'avaient déjà permis de découvrir la magie des échanges en équipe et du développement personnel. Mais je tiens à remercier tous celles et ceux qui m'ont permis de pousser plus loin encore ces deux aspects humains au cours de ma thèse.

D'abord l'ambiance, tant constructive que festive, au sein de l'association des jeunes du site de Marcoule, AISTHER. Merci à celles et ceux qui m'ont inspiré l'envie de participer activement à cet effort collectif, et à celles et ceux qui ont permis de l'accomplir en faisant de cette association, et du contexte l'entourant, une belle aventure durant ces trois années. Merci énormément à : Charly, Valentin, Ines, Pierre-François, Marin, Angel, Thomas, Céline, Marie, Bertrand, Trilce, Clément, Victor, Yohann, Lola, Pauline, Asmae, Leïla, David, Marion... Je ne saurais remercier convenablement tout le monde tant vous avez été nombreux à participer à cet effort. Vous avez été pendant ces trois années mes compagnons lors des réunions de l'association, des événements, des repas, des soirées, des week-ends, et des nombreux trajets Marcoule-Avignon ! Je suis heureux que parmi vous certains soient devenus de véritables amis avec qui j'espère continuer à partager d'excellents moments. Je remercie bien entendu l'ensemble des personnes qui ont permis à notre association de se réaliser durant ces trois années. Je pense notamment aux personnels du CEA Gramat, du CEA Valduc, du CERN, de la CNPE du Tricastin, de l'usine FBFC de Romans, du CMHM, du CSA, du CIRES, de l'usine CENTRACO... Bien entendu, cela n'aurait pas été possible sans le soutien continu du personnel de la société Exirys ni celui des personnels du CEA Marcoule, avec une pensée particulière à la direction, à l'UCAP, et à l'ensemble des personnels d'installations.

Ensuite, je remercie l'ensemble du personnel du Visiatome, qui m'a donné l'opportunité de m'essayer à une tâche complexe mais passionnante : la transmission du savoir. Les Fêtes de la Science ont été pour

moi l'occasion de découvrir cette passion. Elles ont aussi représenté un défi personnel que j'ai eu à cœur de relever : la vulgarisation scientifique.

Merci enfin à tous mes amis que je n'ai pas encore cités, et qui m'ont accompagné tout au long de cette aventure de thèse. Je pense bien entendu à Bruno, Anthony, Abel, Marc, Faustine, Peter, Gaïane, Laura, et tous les autres.

Je pense que je ne serais jamais arrivé jusqu'ici non plus sans la présence continue de ma famille. Merci à mes parents qui depuis toujours m'ont donné les clefs pour me permettre de m'intégrer à ce système global, mystérieux et immense, qu'est la société des êtres humains. Ils m'ont simplement tout apporté.

Merci à Mamily, qui m'a entraîné dès le plus jeune âge à me casser la tête sur des problèmes passionnants, divers et variés, proposés notamment par des revues que je ne citerais pas ici mais dont je remercie les créateurs. Comment aurais-je trouvé le courage de m'attaquer à un tel sujet sans ça ?

Merci aussi à Papy, qui m'a appris que la technique n'était pas simplement fait de concepts abstraits, mais qu'au mot « boulons » était en fait associé une multitude d'éléments concrets indispensables au fonctionnement du système. Et que, parfois, mettre la main à la pâte pouvait être un formidable moyen de décompresser !

Merci à Armand, Noémie et Guilhem qui, en leur qualité d'ainés, m'ont aussi toujours accompagné jusqu'à ce jour, et qui m'ont toujours soutenu. Merci à leurs conjoints Fabien (tu m'as fait découvrir en avant-première l'univers de la thèse !) et Angélique, à la grande attention que m'a toujours portée ma marraine Patricia, à mon parrain Yves-Alain, et à tous mes cousins, cousines, tantes et oncles, qui m'ont aussi longuement accompagné au cours de ce périple qu'est la thèse !

Périple qui a été rejoint par quelqu'un qui occupe aujourd'hui tout mon cœur. Qui aurait cru qu'au milieu de mon monde rempli de sciences, une coupe du monde de football serait le contexte déclencheur de notre belle histoire ? Moufida, tu as constaté dès ce moment-là qu'il m'était possible de questionner et d'analyser pendant des heures des choses parfaitement inutiles et donc pour moi indispensables. Pourtant, tu as quand même supporté depuis, mes questionnements existentiels sur chaque portion angströmétrique de cet univers. Merci de m'avoir apporté une plus grande confiance en moi, et de me donner chaque jour de ton enthousiasme et de ton amour. Ton grand cœur et ton immense empathie n'ont pas d'égal, et je suis heureux et chanceux d'avoir pu croiser ta route et de la continuer avec toi.

Pour conclure ces remerciements, je souhaiterais dédier ce manuscrit à celle qui m'a tant donné depuis que je suis né, et qui a toujours été là pour donner de son énergie et de son amour à sa grande famille, et à tant d'autres. Mamie, tu m'as toujours encouragé et soutenu dans mes études. Tu avais à cœur d'être présente à chaque fois qu'un de tes petits-enfants atteignait un objectif ou obtenait un diplôme. Tu aimais immortaliser ces instants dans des cadres photos, et je sais que tu aurais avec plaisir et amour assisté à ma soutenance. C'est donc avec un grand vide dans le cœur que j'écris aujourd'hui ces lignes.

Merci.

Table des matières

Introduction générale.....	17
Chapitre I : Contexte général des travaux et problématique	20
1.1 Contexte des travaux et premiers constats.....	20
1.1.1 Historique	21
1.1.1.1 Dans le monde et en Europe.....	21
1.1.1.2 En France.....	22
1.1.1.3 Au CEA	23
1.1.2 Positionnement de l'A&D en France	24
1.1.2.1 Finalité.....	24
1.1.2.2 Mission.....	24
1.1.2.3 Objectifs.....	25
1.1.2.4 Conclusion : vers un besoin de structuration et de rationalisation de l'A&D en amont.....	25
1.2 Problématiques perçues, enjeux et défis	26
1.2.1 Problématique et enjeux.....	26
1.2.2 L'évolution du domaine de l'A&D	28
1.2.2.1 Organisation.....	28
1.2.2.2 Essor des technologies du numérique et de l'information	29
1.2.2.3 Évolutions technologiques et techniques (hors numériques).....	30
1.2.3 Des défis à relever	30
1.3 Conclusion : à chaque défi, des verrous correspondant à lever	32
Chapitre II : État de l'art, orientation des travaux et contributions proposées.....	34
2.1 L'A&D	34
2.1.1 L'installation nucléaire en retrait de service : analyse de l'A&D.....	36
2.1.1.1 Définitions.....	36
2.1.1.2 Déroulement.....	37
2.1.1.3 État final de chaque démantèlement.....	38
2.1.1.4 Évolution en cours de déconstruction.....	38
2.1.2 Verrous conceptuels.....	39

2.1.2.1	Vision partagée entre les parties prenantes des modalités de l'A&D (périmètre, finalité, missions, etc.)	39
2.1.2.2	Ontologie métier de l'A&D.....	40
2.1.2.3	Modèle générique, permettant de gérer l'effet de série de l'A&D, et spécifiant formellement les métadonnées importantes pour l'A&D.....	41
2.1.2.4	Conclusion sur les verrous conceptuels.....	42
2.1.3	Verrous méthodologiques.....	43
2.1.3.1	Consolidation des règles de conception de l'A&D	43
2.1.3.2	Référentiel unique et partagé d'exigences SMART	43
2.1.3.3	Accessibilité et adaptabilité des standards et règles.....	45
2.1.3.4	Capacité à prévoir à l'avance et adapter rapidement les scénarios d'A&D en suivant et traçant les évolutions.....	45
2.1.3.5	Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile.....	47
2.1.3.6	Conclusion sur les verrous méthodologiques	48
2.1.4	Verrous techniques	49
2.1.4.1	Outils interopérables et fichiers d'échanges conformes et compatibles.....	49
2.1.4.2	Garantie de la fiabilité des données d'entrée.....	49
2.1.4.3	Conclusion sur les verrous techniques.....	49
2.1.5	Verrous économiques et liés au FOH	50
2.1.5.1	Conciliation des intérêts industriels de la propriété intellectuelle des parties prenantes dans des démarches collaboratives	50
2.1.5.2	Accompagnement au changement pour catalyser les changements de pratiques et d'habitudes.....	51
2.1.5.3	Conclusion sur les verrous économiques et liés au FOH	51
2.2	Théoriser, structurer et rationaliser l'A&D : des activités qui orientent les travaux vers l'approche système	51
2.2.1	L'Ingénierie Système	53
2.2.2	La modélisation d'entreprise	54
2.2.3	Synthèse et constats dans l'A&D aujourd'hui.....	56
2.2.4	Méthode de travail.....	57
2.3	Positionnement et vue d'ensemble des travaux	58
2.3.1	Proposition d'une méthode pour lever certain des verrous identifiés.....	58

2.3.2	Les concepts	61
2.3.3	Les langages de modélisation.....	63
2.3.4	La démarche opératoire	64
2.3.5	Les outils.....	66
2.3.6	Complément : une méthode qui devra prendre en compte deux concepts essentiels pour répondre aux problématiques	68
2.4	Contributions proposées de ces travaux	69
Chapitre III : Contribution théorique.....		72
3.1	Introduction	72
3.2	Les éléments conceptuels de la méthode	73
3.2.1	Les systèmes en jeu.....	74
3.2.2	La cible : une installation nucléaire.....	74
3.2.2.1	Finalité, missions et objectifs d'une installation nucléaire	76
3.2.2.2	Le cycle de vie d'une installation nucléaire.....	76
3.2.2.3	Principaux systèmes contributeurs de l'installation nucléaire.....	79
3.2.2.4	Architectures d'une installation nucléaire.....	82
3.2.3	L'émergence d'un SA&D.....	83
3.2.3.1	Passer du système pour la déconstruction au(x) SA&D.....	83
3.2.3.2	Finalités, missions et objectifs	84
3.2.3.3	Un système fortement couplé à une installation nucléaire.....	86
3.2.3.4	Un couplage qui implique des interactions avec de nombreux autres systèmes	88
3.2.3.5	La fin de vie d'un SA&D.....	89
3.2.3.6	Un SA&D maintenu en conditions opérationnelles principalement par le système pour l'exploitation et la maintenance	89
3.2.3.7	Architectures du SA&D : un système organisationnel et technique.....	90
3.2.3.8	Décomposition d'un SA&D en lots.....	90
3.2.4	L'environnement des SA&D : le sur-système et les systèmes à l'interface	90
3.2.4.1	L'existence de systèmes relatifs aux programmes d'A&D, d'un système de gestion stratégique, et d'un sur-système global de l'A&D	91
3.2.4.2	Des interactions à hiérarchiser	92
3.2.4.3	Les contextes : des interactions permanentes et fortes	93
3.2.4.4	Des parties prenantes à identifier	93

3.2.5	Synthèse : construction d'un méta-modèle	94
3.2.6	Points de vue retenus pour la modélisation	96
3.2.6.1	Justification de ces points de vue.....	102
3.2.6.2	Vers les DSML	104
3.2.7	Les concepts et relations.....	107
3.2.7.1	Exemple de concept de structuration : la méta-classe <i>DAndDPlatform</i>	107
3.2.7.2	Exemples de concepts métiers : les différents systèmes mis en jeu	109
3.2.7.3	Détail d'un concept métier entièrement nouveau	110
3.2.7.4	Détail d'un concept métier issu de SPEM adapté à notre méta-modèle : la MethodConfiguration.....	111
3.2.7.5	Détail de deux concepts métiers issus de méthodes éprouvées de l'IS, et adaptés à notre contexte : Requirement et Risk.....	113
3.2.8	Qualités essentielles du méta-modèle.....	114
3.2.8.1	Possibilité de travailler par niveaux d'abstraction (problème/solution).....	114
3.2.8.2	Méta-modèle unique induisant l'interopérabilité des modèles.....	115
3.2.8.3	Méta-modèle transposable à d'autres cadres que le CEA, et pérenne.....	115
3.2.9	Conclusion de l'approche conceptuelle	116
3.3	Des patrons de modélisation au service du Référentiel Méthode	116
3.3.1	Qu'est-ce qu'un patron de modélisation ?	117
3.3.2	Formalisation du concept de Patron et de ses mécanismes de gestion.....	119
3.3.3	Conclusion	122
3.4	La démarche opératoire de la méthode.....	123
3.4.1	Une phase de conception : le « <i>Design Time</i> »	125
3.4.1.1	Une phase de conception guidée par la notion de système de systèmes.....	125
3.4.1.2	Peut-on préconiser des règles métiers qui régissent la démarche ?.....	125
3.4.2	Une phase d'exécution : le « <i>Run Time</i> »	127
3.4.2.1	Description de la phase.....	127
3.4.2.2	Une phase portée par un workflow adaptatif.....	127
3.4.3	La démarche opératoire : plusieurs « <i>Design Time</i> » et plusieurs « <i>Run Time</i> » ...	129
3.4.3.1	Constat dans la pratique.....	129
3.4.3.2	Mise en œuvre des multiples « <i>Design Time</i> » et « <i>Run Time</i> ».....	129
3.4.4	Compléments	131

3.4.4.1	Transversalité de la démarche	131
3.4.4.2	Un exemple : l'apport des patrons de modélisation sur la démarche	132
3.4.5	Conclusion : limites des contributions conceptuelles à la mise en œuvre de la démarche.....	132
3.5	Conclusion du chapitre	133
Chapitre IV	: Contribution technique et illustration	135
4.1	Introduction	135
4.2	Vue d'ensemble des exigences de l'outil.....	135
4.3	Chantier pilote	139
4.4	Un environnement de modélisation et d'analyse	141
4.5	Intégration des DSML	142
4.6	Développement de l'outil démonstrateur : exemple des patrons de modélisation.....	146
4.6.1.1	Modularité des patrons.....	147
4.6.1.2	Création et import de patrons.....	147
4.6.1.3	Vers une modélisation guidée.....	148
4.6.1.4	Vers une génération automatique de fonctionnalités logicielles	148
4.7	Conclusion du chapitre	150
Conclusion générale	151
Apports de la méthode.....		151
Limitations perçues		152
Perspectives.....		152
Annexes	154
Annexe I : Démarche bibliographique menée		154
Annexe II : Les différents points de vue du méta-modèle		160
Annexe III : Points à traiter et détail des activités retenues pour illustrer l'application de la méthode au chantier pilote.....		184
Annexe IV : Premières exigences non exhaustives perçues de l'outil, à respecter, et pouvant alimenter l'élaboration des règles de modélisation et de la sémantique opérationnelle		192
Bibliographie	197
Résumé & Abstract.....		206

Liste des figures

Figure 1 - Modélisation des processus réalisés dans le cadre de la thèse.....	19
Figure 2 - Contexte, problématiques et enjeux des projets d'A&D	28
Figure 3 – Démarche menée pour orienter la thèse vers une intention de contribution	34
Figure 4 - Modifications du périmètre de l'INB en cours de projet de démantèlement.....	39
Figure 5 - Évolution de l'activité résiduelle de l'installation nucléaire au cours d'un démantèlement	40
Figure 6 - Grille SAGACE pour représenter un système (3 vues ou visions, 3 perspectives, et 3 vues résultantes).....	53
Figure 7 - le GERA Modelling Framework - Figure issue de la page 18 de (IFIC, IFAC, 1999)	56
Figure 8 – Intégration de l'effort de recherche dans le contexte actuel de l'A&D	58
Figure 9 - Éléments d'une méthode.....	60
Figure 10 - Synthèse de ce que doit permettre la méthode élaborée	61
Figure 11 - Exemple de syntaxes abstraite et concrète, de règles de modélisation et sémantique opérationnelle pour un DSML Réseaux de Petri.....	64
Figure 12 - Finalité de la démarche opératoire : passer d'un méta-modèle de l'A&D à des modèles concrets et fédérés de tous les projets.....	66
Figure 13 - Perspective industrielle en matière d'outil.....	68
Figure 14 - Les contributions présentées en Chapitre III se concentreront sur les concepts et la démarche opératoire de la méthode.....	72
Figure 15 - Les 3 systèmes principaux ciblés par l'application de l'IS à l'A&D.....	74
Figure 16 - Proposition de phases d'une installation nucléaire versus phases types d'un système selon (Collectif AFIS, 2012)	77
Figure 17 – Phases de vie d'une INB (figure tirée du guide n°6 de l'ASN (ASN, 2016a)).....	77
Figure 18 – Proposition de cycle de vie générique d'une INB.....	79
Figure 19 - Systèmes contributeurs génériques d'une installation nucléaire qui participent directement aux missions de celui-ci.....	80
Figure 20 – Contribution des systèmes pour l'exploitation et la maintenance et pour la déconstruction d'une INB après son arrêt définitif	82
Figure 21 - Formalisation du système pour la déconstruction d'une INB	84
Figure 22 - Cycles de vie d'une INB et du premier SA&D associé	87
Figure 23 - Intégration des SA&D dans leur environnement.....	92
Figure 24 – Ensemble des éléments à modéliser pour décrire des SA&D, à formaliser dans le méta-modèle	95
Figure 25 - Les différents points de vue des systèmes et objets de modélisation	104
Figure 26 – Syntaxe abstraite du point de vue contextuel	106
Figure 27 - Le concept de DAndDPlatform	108

<i>Figure 28 - Le concept de DAndDSystem</i>	111
<i>Figure 29 - Le concept de MethodConfiguration</i>	112
<i>Figure 30 - Le concept de Requirement</i>	113
<i>Figure 31 - Le concept de Risk</i>	114
<i>Figure 32 - Exemple de démarche de modélisation guidée par les patrons</i>	119
<i>Figure 33 - Formalisation des patrons de modélisation dans le méta-modèle</i>	120
<i>Figure 34 - Exemples de patrons de modélisation et leurs modèles associés, avec quelques exemples de relations entre ces patrons (par souci de lisibilité, les phases et jalons ne sont pas représentés)</i>	122
<i>Figure 35 - Apport des patrons de modélisation sur le Référentiel Méthode</i>	123
<i>Figure 36 – Les différents « niveaux » de modélisation proposés par la méthode</i>	124
<i>Figure 37 - Processus de conception et d'exécution de la démarche opératoire</i>	124
<i>Figure 38 - Découpage de la démarche au cours d'un projet en lots et en plusieurs « Design Time » et « Run Time »</i>	130
<i>Figure 39 - Des patrons de modélisation au service de plusieurs systèmes de systèmes</i>	132
<i>Figure 40 - Des patrons de modélisation au service du workflow adaptatif</i>	132
<i>Figure 41 - Les contributions présentées en Chapitre IV se concentreront sur les outils et les DSML</i>	135
<i>Figure 42 - Contexte du cas test</i>	140
<i>Figure 43 - Exemple illustrant les niveaux de modélisation dans Eclipse et Obeo Designer</i>	142
<i>Figure 44 - Proposition de syntaxe concrète du DSML de cycle de vie, outillée via Obeo Designer</i>	143
<i>Figure 45 - Patron de modélisation d'un cycle de vie type d'INB importé dans le point de vue du cycle de vie de l'ATPu</i>	144
<i>Figure 46 - Exemple de deux fichiers de modèles différents (un PatternManager et un ProjectManager)</i>	147
<i>Figure 47. Exemple d'un switch avec une partie des nombreux choix possibles</i>	149

Liste des tableaux

<i>Tableau I - Quelques exemples d'éléments descriptifs de chaque projet à fournir en amont</i>	<i>26</i>
<i>Tableau II - Synthèse des défis à relever dans l'A&D.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau III - Synthèse des verrous à lever dans l'A&D</i>	<i>33</i>
<i>Tableau IV - Rencontres réalisées conjointement avec L. Malaval (tableau librement inspiré de (Malaval, 2017))</i>	<i>36</i>
<i>Tableau V - Quelques exemples de référentiels méthodologiques utilisés au CEA</i>	<i>44</i>
<i>Tableau VI - Contributions proposées des travaux de thèse</i>	<i>71</i>
<i>Tableau VII - Missions d'un SA&D</i>	<i>85</i>
<i>Tableau VIII - Quelques objectifs type d'un SA&D.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau IX - Liste des points de vue présents dans le méta-modèle</i>	<i>102</i>
<i>Tableau X - Synthèse des contributions présentées dans le Chapitre III</i>	<i>134</i>
<i>Tableau XI - Exigences de l'outil déduites des contributions de la thèse</i>	<i>139</i>
<i>Tableau XII - Objectifs de performance associés à la démonstration</i>	<i>140</i>
<i>Tableau XIII - Contributions présentées dans le Chapitre IV</i>	<i>150</i>

Table des abréviations

AFIS = Association Française d'Ingénierie Système
AIEA (en anglais : **IAEA**) = Agence Internationale de l'Énergie Atomique
ALARA (eng.) = As Low As Reasonably Achievable
ANDRA = Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs
ANM (en anglais : **WNA**) = Association Nucléaire Mondiale
APD = Avant-Projet Détaillé
APS = Avant-Projet Sommaire
AQL (eng.) = Acceleo Query Language
ASN = Autorité de Sûreté Nucléaire
ASND = Autorité de Sûreté Nucléaire Défense
ASTM (eng.) = formerly known as American Society for Testing Materials
ATPu = Atelier de Technologie du Plutonium
ANVSI = master Assainissement Nucléaire et Valorisation des Sites Industriels
A&D (en anglais : **D&D**) = Assainissement et Démantèlement
BIM (eng.) = Building Information Modeling
BKCASE (eng.) = Body of Knowledge and Curriculum to Advance Systems Engineering
BNAE = Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace
BPMN (eng.) = Business Process Model and Notation
Bq = Becquerel – unité pour l'activité radiologique, correspond à 1 désintégration par seconde
CDE = Cessation Définitive d'Exploitation
CEA = Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CERREX (eng.) = Cost Estimation for Research Reactor in Excel
CFCa = Complexe de Fabrication de Cadarache
CIGEO = Centre Industriel de stockage GÉologique
CIMOSA (eng.) = Computer Integrated Manufacturing Open Systems Architecture
CNPE = Centrale Nucléaire de Production d'Électricité
CSP = Code de la Santé Publique
DDCC = Direction du Démantèlement des Centres Civils
DEN = Direction de l'Énergie Nucléaire
DIC = Données, Informations et Connaissances
DREAL = Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSML (eng.) = Domain Specific Modeling Language
DSND = Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les activités et installations intéressant la Défense
EDF = Électricité de France
eFFBD (eng.) = enhanced Functional Flows Block Diagram

EMF (eng.) = Eclipse Modeling Framework

EVM (eng.) = Earned Value Management

FOH = Facteur Organisationnel et Humain

GED = Gestion Électronique des Documents

GEMOS = Guide d'Étude des Modes Opérationnels des Systèmes

GERAM (eng.) = Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology

GIFEN = Groupement des Industriels Français de l'Énergie Nucléaire

GRAFCET = GRAPhe Fonctionnel de Commande des Étapes et Transitions

ICPE = Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

IDM = Ingénierie Dirigée par les Modèles

IEC (eng.) = International Electrotechnical Commission

IEEE (eng.) = Institute of Electrical and Electronics Engineers

IFAC (eng.) = International Federation of Automatic Control

IFIP (eng.) = International Federation of Information Processing

IMT = Institut Mines-Télécom

INB = Installation Nucléaire de Base

INBS et II = Installation Nucléaire de Base Secrète, correspond à un périmètre contenant entre autre une ou plusieurs Installation(s) Individuelle(s)

INCOSE (eng.) = INternational COuncil on Systems Engineering

INSTN = Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

IRSN = Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

IS = Ingénierie Système

ISDC (eng.) = International Structure for Decommissioning Costing

ISO (eng.) = International Organization for Standardization

ISOE (eng.) = Interoperable System and Organisation Engineering

ITDD – ADIN = master Ingénierie Traçabilité et Développement Durable (appelé également master ingénierie nucléaire) – Assainissement Démantèlement des Installations Nucléaires

LG12P = Laboratoire de Génie Informatique et d'Ingénierie de Production

LPC = Laboratoire de Purification Chimique

MAD = Mise à l'Arrêt Définitif

MBSE (eng.) = Model-Based Systems Engineering

MOF (eng.) = Meta-Object Facility

MSNR = Mission de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection

NASA (eng.) = National Aeronautics and Space Administration

OCDE-AEN (anciennement **OCDE-AEEN** ; en anglais = **OECD-NEA**) = Organisation de Coopération et de Développement Économiques – Agence pour l'Énergie Nucléaire

OMG (eng.) = Object Management Group

ONU = Organisation des Nations Unies

OPDEM = Opérations Préparatoires au DÉMantèlement
PAN = Porte-Avions Nucléaire
PBD (eng.) = Physical Block Diagram
PCDR = Performance, Coûts, Délais et Risques
PIGD = Programme Industriel de Gestion des Déchets
PLM (eng.) = Product Lifecycle Management
PME/PMI = Petites et Moyennes Entreprises / Petites et Moyennes Industries
PMBoK (eng.) = Project Management Body of Knowledge
PMGP = Plan de Management Générique des Projets
PNGMDR = Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs
PoC (eng.) = Prove of Concept
PUI = Plan d'Urgence Interne
QSE = Qualité, Sécurité et Environnement
QSSE = Qualité, Sûreté, Sécurité et Environnement
REP = Réacteur à Eau Pressurisée
RELRG = Réacteur à Eau Lourde Refroidi au Gaz
REX = Retour d'Expérience
RGE = Règles Générales d'Exploitation
RNR = Réacteur à Neutrons Rapides
R2MP = Référentiel Méthodologique de Management de Projet de la DEN du CEA
SA&D = Système d'Assainissement et de Démantèlement
SEBoK (eng.) = Systems Engineering Body of Knowledge
SENEX = Surveillance, ENTretien, EXploitation
SFEN = Société Française d'Énergie Nucléaire
SLI = Soutien Logistique Intégré
SMART = Spécifique, Mesurable, Acceptable ou Ambitieux, Réaliste, et Temporellement défini
SNLE = Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins
SoI (eng.) = System of Interest
SPEM (eng.) = Software & Systems Process Engineering Metamodel
SysML (eng.) = Systems Modeling Language
TECV = loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte
TFA = Très Faible Activité
TSM = Terme Source Mobilisable
TSN = loi relative à la Transparence et à la Sûreté en matière Nucléaire
UEML (eng.) = Unified Enterprise Modelling Language
UNGG = réacteur à Uranium Naturel Graphite Gaz
V&V = Vérification et Validation
XML (eng.) = eXtensible Markup Language

Introduction générale

En fin de vie, les installations nucléaires font l'objet d'opérations dites d'assainissement et de démantèlement (A&D), réalisées dans un contexte réglementaire et économique contraint. En France, les Installations Nucléaires dites de Base (INB) et les Installations dites Individuelles (II), dont l'A&D est placé respectivement sous l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et l'Autorité de Sûreté Nucléaire de Défense (ASND), sont particulièrement concernées par de telles opérations. Leur A&D implique des opérations complexes nécessitant la collaboration d'un grand nombre d'acteurs de domaines d'activité variés. Il doit également faire face à de nombreuses exigences et contraintes réglementaires, de sûreté, de sécurité et de performance des opérations qui, dans le milieu Nucléaire, nécessitent démonstrations et justifications de leur prise en compte avant comme pendant la réalisation de l'opération elle-même.

Dans le but d'améliorer la reproductibilité à grande échelle de cet A&D et d'aller vers une vision opérationnelle plus industrielle, il faut d'abord appréhender, s'assurer et démontrer au plus tôt de l'efficacité des opérations et de la sûreté des personnes comme des installations. Il faut ensuite arriver à structurer, à organiser et à suivre les projets, les usages et les pratiques. Le CEA mène aujourd'hui des recherches pour mieux préparer puis piloter ces projets et, ainsi, réduire les coûts et les délais, tout en continuant d'assurer la sûreté et la sécurité à tout instant des opérations, des installations et des intervenants. Des méthodes, des procédures et des procédés partagés et reconnus par l'ensemble des parties prenantes sont actuellement proposés. Cependant, certaines problématiques persistent aujourd'hui pour parvenir à une vision globale du projet lorsqu'il est en préparation puis en exécution, en tenant compte à la fois des référentiels d'exigences et des contraintes fortes, et des échelles temporelles beaucoup plus distendues que dans la plupart des projets industriels.

Parmi ces problématiques, deux ont particulièrement retenu notre attention. Premièrement, la reproductibilité pour l'instant très limitée des éléments des projets d'A&D, malgré l'existence de nombreux référentiels, normes, et retours d'expériences valorisés. Cela est lié à l'absence de concepts et de langages de modélisation, de simulation et d'analyse multi dimensionnelle, adaptés aux besoins des managers de ce type de projets, et partagés par toutes les parties prenantes impliquées, concernées ou impactées par ces projets. Deuxièmement, l'interopérabilité est une problématique déjà largement étudiée mais majeure tant au niveau de l'organisation, de par le nombre et la diversité des parties prenantes engagées, qu'aux niveaux des processus (techniques, support, de gestion des déchets, etc.) et des données du terrain, informations et connaissances recueillies tout au long de la vie de l'installation. Ces données, informations et connaissances sont en effet la plupart du temps stockées sur des documents distincts ou dans des formats hétérogènes. C'est également le cas pour les modèles, qui en

outre ne sont pas toujours aptes à fournir, au regard des besoins de toutes les parties prenantes, une représentation suffisante, globale, et transversale, des projets. De fait, la fédération ou la composition de ces modèles avec les données, informations et connaissances recueillies reste problématique pour donner à chaque instant une vision d'ensemble cohérente, et comprendre et justifier les opérations d'A&D avec un niveau élevé de traçabilité.

Cette thèse se fixe pour objectif de concevoir une méthode outillée et opérationnelle, pour la description, l'analyse et l'aide au pilotage de projets d'A&D. Elle vise une finalité de développement de logiciel support de cette méthode. À cette fin, deux besoins essentiels et deux notions importantes ont guidé ces travaux. Durant sa conception, comme son exécution, un projet d'A&D est vu et doit donc être modélisé comme un système de systèmes, permettant ainsi de tenir compte des nombreux points de vue nécessaires et des différents facteurs de complexité (dimensionnel, temporel, hétérogénéité, sûreté, etc.) qui le caractérisent. Durant son exécution ensuite, les responsables doivent gérer le projet et les incertitudes et aléas qui en sont inhérents. La planification, mais aussi et surtout son organisation même, peuvent en être impactées, car l'ensemble évolue de manière non nécessairement prévue dans la conception initiale, quelquefois validée des années plus tôt. À cette fin, la notion de workflow adaptatif apparaît comme pertinente pour aider à ce pilotage qui, sans devenir intuitif, doit rester totalement maîtrisé, justifiable, traçable, et être lui-même source de REX pour en assurer la reproductibilité future.

Les travaux menés ont donc consisté à élaborer et tester *in situ* la méthode souhaitée, qui est basée et croise les principes de la systémique, de l'ingénierie système basée sur des modèles, de l'ingénierie de projets, et de la modélisation d'entreprise. Cette méthode offre tout d'abord une formalisation des concepts de l'A&D, ensuite une suite logique, ouverte et interopérable de langages de modélisation, et enfin une démarche opératoire à suivre pour disposer d'une vision globale et holistique des projets d'A&D. Afin de vérifier la pertinence, l'exhaustivité, l'efficacité, et le caractère transposable de la méthode élaborée, et outre le travail effectué d'analyse de l'état de l'art et de chantiers existants, un outil démonstrateur a été développé et expérimenté sur un chantier pilote du CEA pour compléter les travaux de thèse. Cet outil se base sur un modèle générique et structurant pour les projets d'A&D qui a également été proposé. De même, l'exigence de réutilisation des modèles liée au besoin de reproductibilité, a nécessité de développer et d'adapter le concept de patron de conception à la modélisation de l'A&D. Enfin, l'aspect workflow adaptatif a été pris en compte mais n'a pas été développé plus avant, faisant l'objet de travaux complémentaires à venir.

La **Figure 1** montre la démarche de travail, appliquée tout au long de cette thèse afin de mener à bien ces travaux. Il est tout d'abord question de définir et préciser le contexte des travaux et les problématiques, puis d'identifier les verrous à lever. Cela constitue l'objet du Chapitre I.

Afin de justifier l'intérêt de l'approche évoquée, une analyse de l'état de l'art est menée afin de vérifier la présence et la pertinence des verrous identifiés, ainsi que les éventuels travaux de recherche et développement actuellement menés dans l'objectif de les lever. Au regard de cet état de l'art, il s'agit ensuite de justifier l'intérêt de l'approche système pour lever ces verrous. Cela permet ainsi de définir l'intention de contribution retenue des travaux : en d'autres termes, quelles sont les contributions proposées pour lever certains des verrous. Ces deux points font l'objet du Chapitre II.

Le Chapitre III se concentre d'abord sur les premières contributions de ces travaux, de nature conceptuelle essentiellement, portant sur les concepts et la démarche opératoire de la méthode élaborée par ces travaux.

Le Chapitre IV présente ensuite les contributions de nature plus technique réalisées, notamment en lien avec la mise en œuvre des langages de modélisation et de l'outil démonstrateur. Ces contributions sont illustrées sur un cas applicatif.

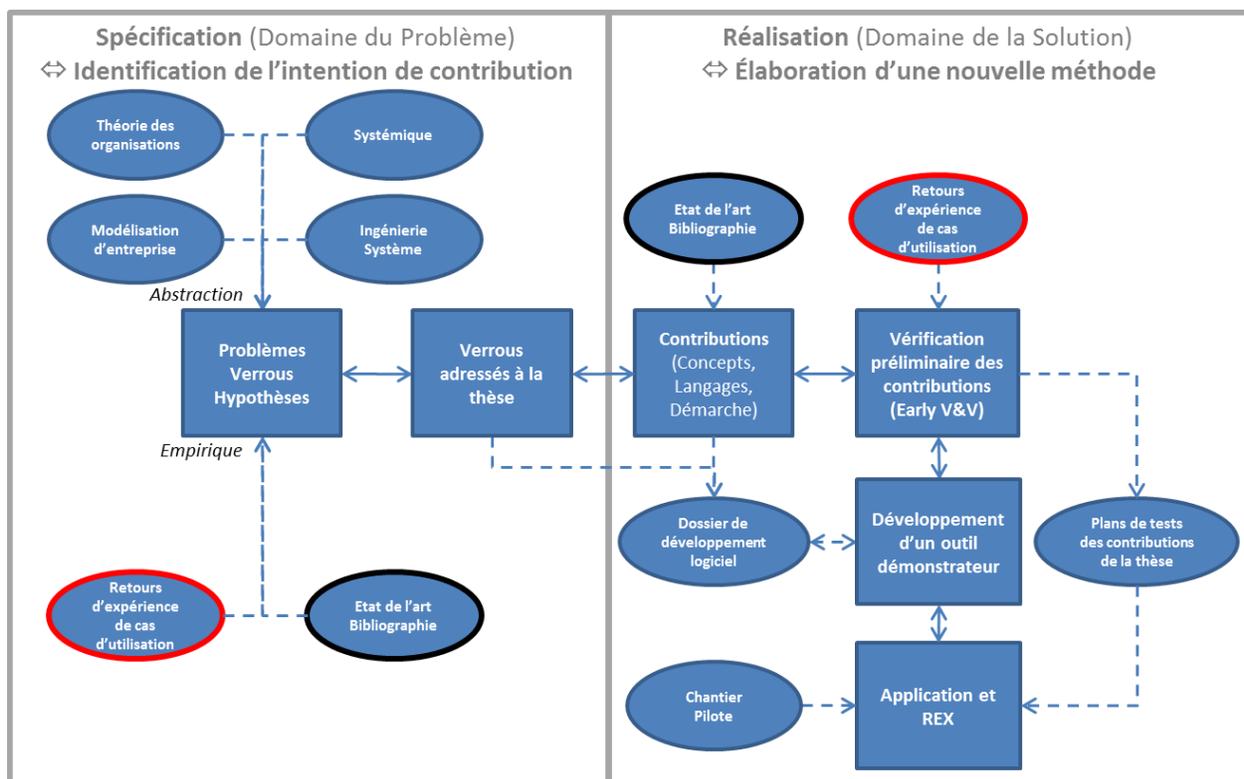


Figure 1 - Modélisation des processus réalisés dans le cadre de la thèse

Chapitre I : Contexte général des travaux et problématique

Ce premier chapitre fixe le cadre des travaux qui concernent le domaine de l'Assainissement et du Démantèlement nucléaire (A&D).

L'objectif est ici de préciser le contexte de l'A&D, d'établir un bilan des besoins et des défis à relever dans ce domaine, et d'introduire l'orientation générale des travaux de thèse.

1.1 Contexte des travaux et premiers constats

L'A&D des installations nucléaires et plus particulièrement des INB (Installations Nucléaires de Base) est un domaine en expansion qui est opéré dans un contexte très complexe.

D'une part, le nombre d'installations concernées, de types très divers, augmente, et de nombreux projets d'A&D sont déjà en cours de réalisation, ou prévus à court/moyen termes. Le cycle de vie d'une installation nucléaire s'étendant souvent sur une période significative, de plusieurs décennies simplement de la construction jusqu'à l'arrêt définitif, puis également de plusieurs décennies par la suite pendant la réalisation des opérations d'A&D, cela signifie que plusieurs générations de travailleurs sont concernées. Les facteurs organisationnels et humains (FOH) sont donc particulièrement importants à considérer, liés par exemple aux évolutions successives en matière de pilotage opérationnel ou de management des risques. De même, la configuration de l'installation évolue continuellement, que cela soit lié à des modifications dues aux avancées technologiques, ou à des incidents qui l'affectent en cours d'exploitation. Ces changements doivent être connus et pris en compte dans les scénarios d'A&D, afin de garantir la sûreté et la sécurité des installations, des personnes et de l'environnement, et ce à tout moment.

D'autre part, de nombreuses parties prenantes sont impliquées dans chaque projet, représentantes de domaines d'activité variés, avec des points de vue et des besoins propres, induisant des exigences spécifiques, notamment en Données, Informations et Connaissances (DIC) à manipuler. La gestion de ces DIC par nature hétérogènes (en termes de qualité, de format, de disponibilité, etc.), souvent noyées dans des corpus documentaires conséquents et concernant des périodes temporelles pouvant être importantes (enregistrements, plans papiers, rapports d'expertise, etc.), devient cruciale tout au long des projets d'A&D.

Dans ce contexte, le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) consacre depuis de nombreuses années des moyens à la collecte et à l'analyse du retour d'expérience des projets d'A&D passés. L'objectif est de faciliter la reproductibilité des opérations qui sont menées, en généralisant les meilleures pratiques et en promouvant des règles d'organisation efficaces comme des solutions techniques éprouvées. Le CEA mène également des recherches pour améliorer en continu la performance des opérations d'A&D, réduire leurs coûts et leurs délais, et maîtriser les risques.

1.1.1 Historique

Pour préciser l'importance de ces travaux au sein du CEA, et afin d'en comprendre et d'en identifier les éventuels manques et les verrous, il est important d'en rappeler tout d'abord l'historique de manière plus globale, puis d'analyser comment le CEA s'est approprié la problématique.

En effet, l'A&D est un domaine, né de la nécessité de trouver un mode de gestion à long terme des installations nucléaires, dont les règles et méthodologies ont été structurées relativement récemment.

Cet effort de structuration peut s'expliquer par de nombreux facteurs, notamment par :

- les difficultés à gérer les nombreuses installations à vocation militaire construites en suivant en priorité des contraintes de fonctionnement et non de démantèlement ;
- l'essor du nucléaire civil entraînant une augmentation considérable du nombre d'installations nucléaires (et donc la prise de conscience du besoin de les démanteler à moindre coûts et délais) ;

Nous dresserons ici une synthèse de l'historique de l'A&D.

1.1.1.1 Dans le monde et en Europe

Au niveau international, c'est principalement l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique, sous l'égide de l'ONU), créée en 1957, qui est en charge d'émettre les principales recommandations concernant les modalités de l'A&D. Celles-ci ont beaucoup évolué, et de nombreuses publications ont été émises au fil du temps, notamment portant sur les différentes stratégies de démantèlement (IAEA, 2005) (IAEA, 2007). Trois principales stratégies ont été étudiées de manière approfondie : le démantèlement immédiat¹ – « *Immediate dismantling* » ; le démantèlement différé – « *Deferred Dismantling* » (IAEA, 2018); et le confinement sûr – « *Safe Enclosure* » ou « *Entombment* » (Thierfeldt, 2012), ce dernier signifiant un effort d'A&D réduit. Les recommandations de l'AIEA n'ont pas de valeur juridique, mais constituent néanmoins une référence reconnue et souvent suivie au niveau international : on peut citer l'exemple des 3 niveaux de démantèlement, qui servaient de références en France avant les années 2000 (Bataille, 1997).

Un certain nombre d'autres organismes participe activement aux évolutions dans le domaine de l'A&D. C'est notamment le cas de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique) par le biais de son Agence pour l'Énergie Nucléaire AEN, fondée en 1958. Plus récemment, d'autres organismes ont également vu le jour et ont un impact plus réduit sur l'A&D, tels que l'Association Nucléaire Mondiale ANM fondée en 2001.

¹ <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Le-demantelement-des-installations-nucleaires/Les-etapes-du-demantelement/Le-demantelement-immediat> ; Dernière visite : 31/07/19

Au niveau européen, c'est le traité Euratom, signé en même temps que le traité de Rome en 1957, qui a institué la Communauté européenne de l'énergie atomique dès 1958 et a donc suivi de près les évolutions du domaine de l'A&D. Les directives européennes qui ont été émises depuis contraignent juridiquement le secteur nucléaire et également la réalisation des opérations d'A&D, notamment (European Council, 2011) (European Council, 2014).

À titre d'exemple, et pour se faire une idée de l'évolution croissante du nombre d'installations nucléaires qui seront en démantèlement à l'avenir dans le monde, pour la seule catégorie des réacteurs nucléaires et au 22 octobre 2018 d'après l'OCDE (Magwood, 2018) : 169 réacteurs nucléaires sont à l'arrêt définitif dont 107 en Europe ; 454 sont en fonctionnement dont plus de la moitié sont âgés de plus de 30 ans et 75 âgés de plus de 40 ans. Or, considérant une durée de fonctionnement prévue à la conception généralement inférieure à 60 ans (souvent 40 ou 50 ans), et une durée de démantèlement après arrêt définitif dépassant régulièrement plus de la moitié de la durée de fonctionnement, il semble évident que le nombre de réacteurs en démantèlement dans le monde aura une tendance croissante à court et moyen terme.

1.1.1.2 En France

En France, l'ensemble des 58 réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP) exploités pour la production industrielle d'électricité ont été construits et mis en fonctionnement entre 1977 et 2000. Aujourd'hui, aucun n'est encore à l'arrêt définitif, malgré une durée de fonctionnement à la conception prévue – mais non bornée juridiquement – de 40 ans, et un âge moyen de 33 ans en décembre 2018 (Bataille & Birraux, 2003). En comparaison, seuls 13 réacteurs électrogènes, de types variés (9 UNGG, 2 RNR, 1 REP et 1 RELRG), et tous mis en service avant 1975 (sauf Superphénix, en 1986), sont en phase de démantèlement aujourd'hui.

Mais la France compte aussi d'autres installations nucléaires, nombreuses, et de plusieurs types : installations liées au cycle du combustible nucléaire, installations d'entreposage de déchets radioactifs, etc. (ASN, 2015).

Au niveau national, le domaine de l'A&D a aujourd'hui un peu plus de cinquante ans². Néanmoins, relativement peu d'installations ont vu, dans les trois décennies suivant les prémices de l'A&D, leur phase de démantèlement lancée². En effet, les premières installations nucléaires françaises étaient destinées à la recherche dans le domaine militaire, puis à l'armement. Malgré des chantiers importants, c'est l'essor du nucléaire civil dans la décennie 1970 qui a considérablement augmenté le nombre d'installations nucléaires en France et les quantités de matières radioactives mises en œuvre, avec par exemple des installations de recherche, prototypes, ou encore des installations liées au cycle du combustible nucléaire.

² <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Le-demantelement-des-installations-nucleaires/Les-strategies-de-demantelement-en-France/Retour-sur-l-historique-des-strategies-de-demantelement-en-France> ; Dernière visite : 31/07/19

La prise de conscience de la nécessité de structurer l'A&D est la suite logique du recensement des installations qu'il conviendra à terme de démanteler. En premier lieu, celles intéressant la Défense, puis les installations de recherche et celles liées au cycle du combustible, et enfin les réacteurs de CNPE (Centrale Nucléaire de Production d'Électricité) évoqués précédemment.

Cependant, peu de réglementations et de standards ont vu le jour en matière d'A&D avant les années 2000. C'est en 2006 que l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) a été fondée par la loi dite TSN, relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (État Français, 2006). Depuis, plusieurs textes réglementaires de référence pour l'A&D ont vu le jour, telles que le décret du 2 novembre 2007 (État Français, 2007) et l'arrêté du 7 février 2012 (État Français, 2012).

Depuis sa création, l'ASN a fortement contribué à mettre en œuvre le cadre réglementaire de l'A&D en France, par une série de décisions (juridiquement contraignantes), de règles, de guides (notamment les guides n°6 et n°14 (ASN, 2016a) (ASN, 2016b)), de rapports, etc. À noter que l'ASN réalise également un certain nombre de dossiers pédagogiques, qui évoquent de nombreux sujets, dont l'historique du démantèlement en France² et les différentes stratégies retenues pour les principaux exploitants³. Elle met également à jour un lexique⁴ relatif à la filière nucléaire. L'ASN collabore fortement dans ses démarches avec l'IRSN, qui l'assiste sur le plan technique et scientifique via plusieurs missions (État Français, 2016).

En outre, il est important de noter que, bien que l'ASN soit le principal responsable de l'évolution du cadre réglementaire et normatif en France, elle n'exerce pas son contrôle sur l'ensemble des installations nucléaires, mais seulement sur les INB. En parallèle, l'ASND et le DSND sont en charge des installations nucléaires et activités intéressant la défense (Installation Individuelle d'INBS, SNLE, PAN, etc.). Par ailleurs, les installations mettant en œuvre des quantités réduites de matières radioactives sont classées ICPE et mises sous la tutelle des DREAL. Ce point sera approfondi par la suite.

D'un point de vue opérationnel, il existe en France en 2019 quatre exploitants principaux d'installations nucléaires : l'ANDRA, EDF, Orano, et le CEA, la première exploitant à ce jour seulement des installations de stockage, destinées à recueillir les déchets de manière définitive (notion de stockage à ne pas confondre avec l'entreposage, qui définit une immobilisation temporaire).

1.1.1.3 Au CEA

Le CEA est l'exploitant historique d'installations nucléaires. Fondé en 1945, de nombreuses installations nucléaires ont été construites à des fins de recherche sur l'énergie atomique : piles

³ <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Le-demantelement-des-installations-nucleaires/Les-strategies-de-demantelement-en-France> ; Dernière visite : 31/07/19

⁴ <https://www.asn.fr/Lexique> ; Dernière visite : 31/07/19

atomiques, réacteurs de recherche, prototypes industriels, etc. Par conséquent, le CEA est, parmi les exploitants d'installations nucléaires, un parfait exemple de la diversité et de la complexité de ces installations, et compte en France les installations en démantèlement les plus anciennes. Le CEA a donc pu réaliser de nombreux démantèlements de manière plus ou moins avancée, voire les a terminés, e.g. pour certaines installations du projet de dénucléarisation du site de Grenoble dénommé PASSAGE (ASN, 2014). Il a collecté de nombreux retours d'expérience, mais également fait le constat de la complexité de l'A&D et de la difficulté à valoriser systématiquement ces retours d'expérience.

1.1.2 Positionnement de l'A&D en France

Il convient donc de se poser la question de ce que couvre exactement le périmètre de l'A&D. Il faut pour cela comprendre pourquoi l'A&D des installations nucléaires doit être réalisé (ce qui nous donnera la finalité de l'A&D), en quoi il consiste concrètement (ce qui permettra d'établir quelles en sont les missions), et avec quels objectifs il doit être mené à bien, notamment en termes de reproductibilité, de sécurité, de sûreté, de performances, de traçabilité, etc.

1.1.2.1 Finalité

La finalité, ou encore la raison d'être de l'A&D, peut être définie en reprenant le rapport (Bataille, 1997), qui précise que « *le démantèlement n'a pas pour but de faire disparaître la radioactivité mais simplement de la déplacer pour mieux la contrôler, et de prévenir ainsi tout danger de contamination de l'environnement et des populations proches.* »

1.1.2.2 Mission

L'Assainissement et le Démantèlement (**A&D**) d'une installation nucléaire en France, en reprenant le terme démantèlement du lexique de l'ASN⁴ « [...] *couvre l'ensemble des activités, techniques et administratives, réalisées après l'arrêt définitif d'une installation nucléaire, afin d'atteindre un état final prédéfini où la totalité des substances dangereuses et radioactives a été évacuée [...]* ». Les exploitants d'installations nucléaires en fin de vie sont responsables de l'élimination de l'ensemble de la matière active en présence, et ce jusqu'à validation de sa prise en charge par une filière autorisée définitive⁵.

La stratégie aujourd'hui retenue en France implique donc que toute matière radioactive soit sortie de l'installation démantelée pour que la mission soit terminée et que le projet d'A&D puisse être clôturé.

⁵ <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/La-gestion-des-dechets-radioactifs/Les-acteurs-et-leurs-responsabilites> ; Dernière visite : 31/07/19

1.1.2.3 Objectifs

Les responsables de projets au CEA suivent aujourd'hui le « berlingot PCDR » (Performances, Coûts, Délais, Risques) pour décrire et suivre l'atteinte de leurs objectifs.

En premier lieu, après que l'ASN ait inclus le principe de démantèlement immédiat² dès 2009 dans sa doctrine (ASN, 2009), l'État français a confirmé son objectif de « *délais aussi courts que possible* » dans la réglementation applicable aux INB (État Français, 2012), ainsi que dans la loi dite TECV de 2015 (État Français, 2015).

Par ailleurs, une subvention annuelle relativement constante fixe les coûts admissibles pour l'A&D afin d'éviter de fragiliser la filière nucléaire. En effet, depuis 2016 (Tocqueville, 2016) (Giraud, 2018), le CEA dispose d'une subvention annuelle de l'État français de 740 M€ qui lui permet de provisionner ses activités d'A&D.

En matière de risques, le renforcement continu des standards et référentiels de sûreté et de sécurité pour l'A&D, la démarche ALARA (« *As Lower As Reasonably Achievable* »), ainsi que le statut indépendant de l'ASN, montrent aujourd'hui la volonté de faire de la maîtrise des risques un pilier indispensable de l'A&D. À titre d'exemple, il est important de citer le besoin de préciser et de faire valider, par le biais d'un décret pour chaque projet de démantèlement d'INB, un référentiel de sûreté de démantèlement, entre autres documents, pour pouvoir réaliser les opérations d'A&D.

Enfin, la présence croissante de procédures, guides, décisions, règlements, etc. impose un suivi conséquent de la configuration de l'installation, des opérations d'A&D, et des flux de matières et déchets tout au long de chaque projet. Ce suivi de la performance requise de l'A&D est précisé au cas par cas en fonction de l'installation à démanteler et déclasser.

1.1.2.4 Conclusion : vers un besoin de structuration et de rationalisation de l'A&D en amont

Les responsables de projets d'A&D doivent aujourd'hui spécifier très précisément l'état final attendu de l'installation nucléaire, et fournir la preuve prévisionnelle que l'A&D, dans son ensemble, se déroulera sous contrôle des coûts et des délais et dans le strict respect des règles de sûreté et de sécurité. En outre, cela est demandé très en amont des opérations d'A&D, aujourd'hui dès la conception même d'une installation nucléaire (IAEA, 2014) (ASN, 2016a). Les incertitudes techniques sont nombreuses, liées au fait que les chantiers d'A&D sont réalisés dans des installations, ayant intégré de nombreuses modifications au fil des années et utilisé des matières radioactives parfois de natures variées. De fait, ces installations peuvent contenir un niveau de radioactivité élevé. Les responsables de projet projets doivent donc pouvoir affiner, corriger ou adapter leur projet d'A&D dans les meilleurs délais, coûts et risques.

À cette fin, de nombreux documents et livrables, de différents types et sur différents supports, faisant appel aux compétences de plusieurs métiers et entreprises, sont nécessaires. Certains de ces éléments sont détaillés par exemple dans le **Tableau I**. Ces éléments permettent de décrire chaque projet d'A&D sous un ou plusieurs points de vue, en prenant en compte les aspects

techniques et organisationnels des projets. Dans cette mesure, ils représentent une modélisation des projets. En fonction des besoins ou du contexte de chaque projet, cette modélisation est plus ou moins détaillée, complète, et réaliste. Les modèles, souvent nombreux, ne sont pas nécessairement réalisés à l'aide de langages adaptés ni d'outils interopérables, ni même sur le même support au fil du temps : citons, par exemple, le cas des cartes ou plans, qui évoluent aujourd'hui vers des supports numériques. Ainsi, les contenus des modèles ne sont pas toujours facilement exploitables ou analysables de manière assistée et continue dans le temps.

	Fonctionnel (Processus, Activités, etc.)	Physique (Ressources, Compétences, etc.)	Gestion des risques
Aspects organisationnels et réglementaires	<ul style="list-style-type: none"> • Organigramme des tâches • Diagrammes GANTT 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressources humaines (GPEC) • Tableau d'estimation des coûts • Propriété Intellectuelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Portefeuille des risques projet • Plan de gestion des risques projet
Aspects techniques et technologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Scénario de démantèlement • Plan de gestion des déchets 	<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire déchets • Cartographie physique • Cartographie radiologique • Caractérisation chimique 	<ul style="list-style-type: none"> • Études de sûreté • Dossiers sûreté • Référentiels de sûreté



Tableau I - Quelques exemples d'éléments descriptifs de chaque projet à fournir en amont

1.2 Problématiques perçues, enjeux et défis

1.2.1 Problématique et enjeux

L'A&D ne peut donc pas être perçu simplement et dans sa globalité, sans croiser plusieurs regards, points de vue métier, objectifs (FOH, sûreté, performance, etc.). Cela nécessite d'adopter une approche à la fois holistique et basée sur des modèles.

En effet, définir par exemple systématiquement l'état final attendu d'un démantèlement est un enjeu important, nécessitant de considérer plusieurs dimensions. De même, le caractère préventif du démantèlement et le périmètre nécessairement riche et multi métier de l'A&D mettent en jeu des besoins de formalisation et d'analyse, basées sur des modèles pour anticiper, prévoir, et piloter un projet.

Deux problématiques essentielles sont donc retenues dans la suite (Figure 2).

Premièrement, chaque projet d'A&D ayant ses particularités, il n'existe pas aujourd'hui de modèle unique ou unifié pour le démantèlement nucléaire. Plusieurs modèles existent de fait, mais ils ne permettent pas de s'adapter ou s'aligner sur le réel de manière pérenne. Il est difficile de généraliser des éléments à tous les projets de démantèlement, malgré une capitalisation et une valorisation du retour d'expérience importantes, et malgré l'existence de référentiels (e.g. le référentiel méthodologique de management de projets, R2MP) et de documents de synthèse, fournissant des inventaires de modèles à générer dans le cadre d'un projet d'A&D (OECD-NEA, 2012) (IAEA, 2013).

Deuxièmement, les modèles existants restent isolés et ne sont pas interopérables (syntaxiquement, sémantiquement, ou pragmatiquement lorsqu'ils sont mis en usage). Ils ne sont donc pas aisément composables, ce qui permettrait pourtant d'obtenir un modèle plus fidèle puisque plus global. Même s'il existe de plus en plus d'outils permettant de les mettre en œuvre et les gérer (comme par exemple le *Product Lifecycle Management*, PLM, ou le *Building Information Modeling*, BIM, ce dernier pouvant même être intégré au PLM), il n'existe pas de méthodologie ou d'outil normalisé permettant de gérer de manière automatique les interfaces, les liens et les contraintes entre tous les modèles, élaborés pendant la préparation puis pendant l'exécution des projets. De plus, ces modèles sont aujourd'hui réalisés sur de nombreux supports (documents, outils informatiques peu interopérables, etc.). À titre d'exemple, si une modification a lieu en cours de projet sur un de ces modèles (ou si l'on veut simuler une modification quelconque, par exemple pour étudier plusieurs scénarios de démantèlement), il reste difficile, de manière simple et automatique, de connaître avec certitude l'impact sur l'ensemble des autres modèles. C'est pourtant nécessaire, pour aider aux choix d'alternatives et au suivi des projets. Pour conclure, il n'existe pas de méthodologie de modélisation unique gérant les interfaces de données et l'interopérabilité des supports, même si des référentiels méthodologiques existent et précisent ce qui doit être réalisé selon les cas d'utilisation. Ce point sera détaillé par la suite dans l'analyse de l'état de l'art.

Dans le même temps, des efforts de plus en plus importants sont déployés dans le cadre de l'A&D, pour maintenir et améliorer la compétitivité de ce domaine et plus globalement du secteur nucléaire. Les raisons économiques (notamment la subvention annuelle fixe de l'État), d'une part, et le nombre croissant d'installations nucléaires en fin de vie, d'autre part, poussent à adopter une démarche d'amélioration continue efficace, de manière à optimiser les coûts et à réduire les délais, tout en garantissant des hauts niveaux de sécurité et de sûreté.

Comment formaliser et organiser l'A&D dans le but de garantir son aboutissement dans des conditions sûres et optimales au regard de l'état final visé ?

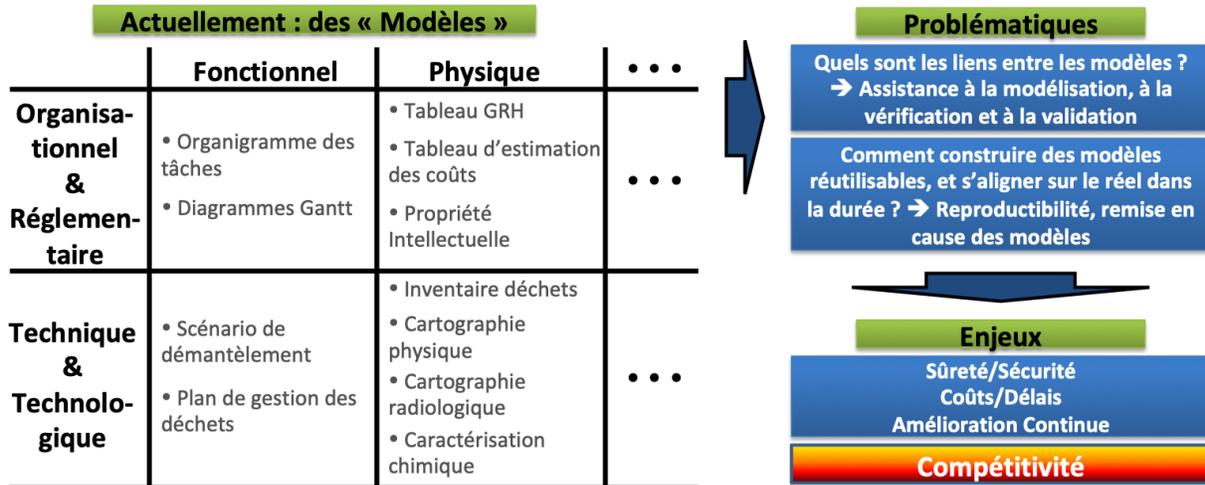


Figure 2 - Contexte, problématiques et enjeux des projets d'A&D

1.2.2 L'évolution du domaine de l'A&D

Afin de répondre à ces enjeux et problématiques, les différents acteurs de l'A&D, dont notamment le CEA, ont d'ores et déjà amorcé certaines transformations, de différents ordres : principalement numérique et organisationnelle, mais également technique.

Ces transformations induisent de nombreux changements, qui se traduisent sous de nombreuses formes dans le domaine de l'A&D.

1.2.2.1 Organisation

Des évolutions structurelles et de procédures ont eu lieu ces dernières années. En France, les principaux exploitants ont connu des réorganisations internes. À titre d'exemple, le CEA a réorganisé ses entités chargées des activités d'A&D au 1^{er} janvier 2017, suite à une demande conjointe de l'ASN et l'ASND (ASN, ASND, 2015).

Les procédures ont quant à elle beaucoup évolué, avec l'apparition de l'ASN sous la forme d'une autorité administrative indépendante en 2006, qui a été à l'origine de guides dédiés (notamment les n°6 (ASN, 2016a) et n°14 (ASN, 2016b)) et de décisions, qui ont eux-mêmes évolué. La réglementation est d'ailleurs en constante évolution. La dernière modification notable est l'intégration synthétique de huit décrets dans le code de l'environnement (Léger, 2019) (État Français, 2019), dont le décret dit « procédure » de 2007 (État Français, 2007), pour lequel les articles étaient structurants pour lancer toute procédure relative aux INB et notamment aux modifications de l'installation et de ses activités. Cette mise à jour réglementaire a pris effet le 1^{er} avril 2019.

Les divers changements liés à l'organisation ont concerné et continuent de concerner également les interfaces. À titre d'exemples, alors que ce n'était pas le cas il y a plusieurs décennies,

chaque exploitant doit tenir à jour, avec une certaine périodicité, un plan de démantèlement pour chacune de ses installations nucléaires dès la demande d'autorisation de création. De plus, désormais, c'est à la MSNR qu'il faut transmettre en premier lieu le dossier de démantèlement (à fournir avant l'arrêt définitif de l'installation, comportant entre autres pièces la version du plan de démantèlement qui sera validé par le décret de démantèlement), qui sera ensuite transmis directement à l'ASN après une première instruction.

Enfin, de plus en plus d'organisations, d'associations et de pôles de compétitivité favorisent en France le regroupement d'acteurs du nucléaire, globalement (la SFEN, le GIFEN, Nuclear Valley, etc.) ou plus particulièrement dans l'A&D *via* des accords de collaboration, pour travailler sur des problématiques communes visant par exemple à standardiser l'organisation et les processus de l'A&D. Des formations spécifiques au milieu de l'A&D (Master ANVSI, Master ITDD – ADIN, formations INSTN etc.) sont accessibles dès les études supérieures afin de consolider les connaissances et compétences dans le milieu de l'A&D.

Pour conclure, on constate également une évolution dans l'organisation des acteurs de l'A&D avec, par exemple, le rapprochement administratif au CEA des unités d'exploitation des installations nucléaires en démantèlement avec les projets de démantèlement.

1.2.2.2 Essor des technologies du numérique et de l'information

Les organisations et formations contribuent à faire évoluer le domaine du point de vue des technologies du numérique, c'est même régulièrement une de leurs ambition affirmées, comme par exemple pour le GIFEN créé en 2018 (Defay & Ben Aoun, 2018) (Crampon, 2019). On constate donc l'apparition, au niveau de l'industrie nucléaire dans son ensemble, de nombreuses démarches de conception et de suivi utilisant des outils numériques divers et variés, notamment utilisant des technologies de BIM et même de PLM (e.g. c'est le cas de nombreuses présentations de la conférence INDEX 2018, telles que (Dupré & Aabadi, 2019)).

L'engouement pour les technologies numériques dans la filière nucléaire est donc grandissant et apparaît aussi progressivement dans le domaine de l'A&D. La dernière conférence internationale sur le démantèlement organisée par la SFEN (DEM2018) avait ainsi pour nouveau sujet « *Digital Contribution to Dismantling Operations* ». La même année, la conférence internationale annuelle Waste Management Symposia, sur la gestion des déchets radioactifs, avait pour thématique principale « *Nuclear & Industrial robotics, remote systems & other emerging technologies* ».

On constate depuis environ deux décennies une évolution rapide de la façon de gérer les données, informations, et connaissances, tant sur la formalisation que sur les supports (documents papiers puis arborescences de fichiers informatisés puis bases de données et outils collaboratifs). La modélisation des installations en démantèlement, par exemple, historiquement réalisée *via* des plans au format papier ou des maquettes réelles à échelles variées, utilise de plus en plus les technologies de maquettage 3D (Chabal & Soulabaille, 2016),

couplé si besoin aux avantages que confèrent les outils du BIM, permettant d'associer aux cartographies physiques d'autres informations : caractérisation physico-chimique, cartographie radiologique, etc.

1.2.2.3 Évolutions technologiques et techniques (hors numériques)

Enfin, d'un point de vue technique, des évolutions diverses apparaissent, notamment en matière d'outils techniques de mesure et de cartographie (amélioration de la précision par exemple), souvent dans le but d'augmenter le niveau de fiabilité et de confiance des données nécessaires à la maîtrise des projets d'A&D. De plus, on constate une évolution des techniques d'assainissement et de démantèlement, et surtout une standardisation de ces dernières, avec l'apparition de techniques reconnues et reproductibles (exemple : découpe laser, mousses et gels décontaminants, techniques d'écroutage, génie civil de confinement, téléopération, etc.) et de standards associés (normes ISO e.g. (ISO, 2017), référentiels techniques issus de retours d'expérience, etc.). L'expertise dans de nombreux domaines est ainsi grandissante, et ce y compris dans des domaines tels que la gestion des risques, des coûts, des configurations, etc.

1.2.3 Des défis à relever

Ces changements sont donc nombreux, liés d'abord aux évolutions des techniques et des technologies que l'on rencontre aussi dans d'autres secteurs industriels. Ils proviennent également d'évolutions stratégiques liées aux demandes des autorités de tutelle. Pour illustrer cela, le critère de l'activité résiduelle globale pour quantifier la performance de l'A&D a été affiné avec le temps. À présent, le critère principal retenu, qui a permis d'effectuer la priorisation des projets du CEA, est celui du *Terme Source Mobilisable* (TSM). Le TSM consiste en l'évaluation des risques liés à l'installation en matière de radioactivité, de radiotoxicité et du niveau de robustesse du bâtiment. Les opérations d'A&D ont pour objectif prioritaire la réduction de ce risque radiologique.

Bien que ces évolutions montrent une volonté de répondre aux enjeux et aux problématiques, elles impactent lourdement les projets, induisant parfois des difficultés qui peuvent représenter de nombreux défis pour le domaine de l'A&D (**Tableau II**).

Ces défis sont d'abord **conceptuels**. Les différentes parties prenantes impliquées dans un projet doivent partager la même vision et parler le même langage lorsqu'elles travaillent ensemble. La nécessaire spécification d'exigences SMART (Spécifique, Mesurable, Acceptable ou Ambitieux, Réaliste, et Temporellement défini), laissant le moins possible libre court à l'interprétation, doit pouvoir faciliter les interfaces entre maîtrises d'ouvrage et maîtrises d'œuvre, ainsi que toutes les interfaces (e.g. marchés de sous-traitance) au sein de l'entreprise étendue (ensemble des parties prenantes associées pour la réalisation de projets communs). Pour ce faire, une ontologie métier doit structurer les termes et concepts de l'A&D. Les nombreuses parties prenantes engagées dans les projets d'A&D, provenant de nombreux métiers, utilisent en effet

des référentiels de connaissance et des langages techniques qui leur sont propres. Pourtant, bien que syntaxiquement différents, des liens sémantiques existent. En outre, il est important de spécifier formellement le référentiel de données d'un projet. Cela passe par l'identification, le plus en amont de tout projet, des métadonnées pertinentes, utiles et nécessaires à l'A&D.

Ensuite, les défis sont **méthodologiques**. Le référentiel de données doit être construit et partagé en suivant une méthodologie fiable. De plus, la mise en place de processus collaboratifs aidera les nombreuses parties prenantes actrices de l'A&D à travailler conjointement. Par ailleurs, des démarches agiles faciliteront et amélioreront la confiance entre parties prenantes aux interfaces (exploitant – autorités par exemple). De fait, les normes et les réglementations, tout en conservant les niveaux de sûreté, sécurité, performance, etc. exigés, doivent être pragmatiques, adaptables et abordables, et ce pour l'ensemble des parties prenantes, quelles que soient notamment les tailles des entreprises concernées.

Les défis **techniques** sont également importants, notamment au niveau de l'interopérabilité. Les formats de fichier, ou les outils numériques, par exemple, doivent être partageables et les parties prenantes doivent fonder leurs travaux sur des données fiables, ce qui nécessite une acquisition fiable puis une gestion maîtrisée, ainsi qu'une sécurité informatique efficiente (c'est-à-dire remplissant ses missions à moindres moyens).

Sur le plan **économique**, tout au long des projets, la propriété intellectuelle doit être protégée, afin que toutes les parties prenantes impliquées puissent rester confiantes dans les projets, et que leurs enjeux propres soient pris en compte.

Enfin, les **pratiques** et **habitudes** du passé devront pouvoir évoluer grâce à une approche d'accompagnement au changement appropriée.

Conceptuels	<ul style="list-style-type: none"> • Vision partagée des projets (périmètre, finalité, missions, etc.) • Langage de l'A&D commun (termes, concepts, etc.) • Référentiel de données (spécification formelle,...)
Méthodologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Référentiel de données (construction, conversion, partage, etc.) • Processus collaboratifs • Standards et règles pragmatiques, accessibles et adaptables
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Interopérabilité (formats de fichiers, outils, etc.) • Référentiel de données (fiabilité de l'acquisition, sécurisation, etc.)
Économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Intérêts industriels des parties prenantes • Gestion de la propriété intellectuelle
Facteur Organisationnel et Humain	<ul style="list-style-type: none"> • Changement de pratiques, habitudes • Accompagnement au changement

Tableau II - Synthèse des défis à relever dans l'A&D

1.3 Conclusion : à chaque défi, des verrous correspondant à lever

À chaque défi à relever correspond un ou plusieurs verrous, c'est-à-dire un manque ou défaut constaté entraînant des difficultés pour la mise en œuvre des transformations (organisationnelle, technique, numérique) visant à adopter une vision industrielle de l'A&D, c'est-à-dire des chantiers avec une meilleure reproductibilité. Or, ces transformations semblent aujourd'hui essentielles pour répondre aux problématiques et enjeux de l'A&D. Les travaux proposés dans ce manuscrit tentent donc de lever certains de ces verrous synthétisés **Tableau III**. Ceux-ci seront donc vérifiés, approfondis, et analysés par la suite.

Il semble important de préciser que les verrous **organisationnels** et **humains** sont classiquement mis en avant (ASN, ASND, 2015). En effet, l'A&D repose sur des métiers et des domaines scientifiques variés, impliquant des parties prenantes qualifiées, qui ont donc à leur disposition un panel important de solutions techniques, tandis qu'en parallèle, on constate une relative jeunesse industrielle du domaine et des évolutions organisationnelles caractéristiques. Ces travaux de thèse, menés dans un domaine technique, ne doivent donc pas occulter ces verrous qui relèvent de facteurs organisationnels et humains.

Enfin, il est évident que certains verrous sont reliés entre eux et donc interdépendants. Par exemple, proposer un processus collaboratif de travail peut, d'un côté, faciliter les échanges directs entre deux parties prenantes contributrices de l'entreprise étendue (impact positif sur les verrous méthodologiques) et réduire les risques liés à la terminologie technique éventuellement différente entre leurs deux lexiques techniques (impact positif sur les verrous conceptuels). En revanche, si ce processus s'ajoute à la réglementation en vigueur, il peut d'un autre côté l'alourdir. Et le manque d'adaptabilité de celle-ci à toutes les parties prenantes concernées peut nuire, en particulier, aux petites structures (impact négatif sur les verrous méthodologiques).

Cela montre que lever un verrou ne va pas nécessairement induire la prise en compte des autres, et que la façon de lever un verrou peut représenter un risque qui amplifierait voire rajouterait d'autres verrous. Il s'agira donc d'être vigilant et d'analyser pour chaque verrou l'impact des opportunités existantes sur les autres verrous.

Conceptuels	<ul style="list-style-type: none"> • Vision partagée entre les parties prenantes des modalités de l'A&D (périmètre, finalité, missions, etc.) • Ontologie métier de l'A&D • Modèle générique, permettant de gérer l'effet de série de l'A&D, et spécifiant formellement les métadonnées importantes pour l'A&D
Méthodologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidation des règles de conception de l'A&D • Référentiel unique et partagé d'exigences SMART • Accessibilité et adaptabilité des standards et règles • Capacité à prévoir à l'avance et adapter rapidement les scénarios d'A&D en suivant et traçant les évolutions • Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Outils interopérables et fichiers d'échanges conformes et compatibles • Garantie de la fiabilité des données d'entrée
Économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Conciliation des intérêts industriels et de la propriété intellectuelle des parties prenantes dans des démarches collaboratives
Facteur Organisationnel et Humain	<ul style="list-style-type: none"> • Accompagnement au changement pour catalyser les évolutions de pratiques et d'habitudes

Tableau III - Synthèse des verrous à lever dans l'A&D

Chapitre II : État de l'art, orientation des travaux et contributions proposées

L'état de l'art proposé dans cette partie a pour premier objectif de faire un tour d'horizon critique et constructif de travaux, de techniques, de pratiques et d'usages existant dans le cadre de l'A&D. Il se focalisera sur les verrous précédemment identifiés en gardant à l'esprit la question essentielle qui a guidé ces travaux (**Figure 3**), à savoir : **comment formaliser et structurer l'industrie de l'A&D, en vue d'opérer diverses transformations et de se placer dans une optique de reproductibilité des processus ?**

Le deuxième objectif est de valider les choix effectués en tout début de ce travail de recherche, et donc de définir les apports potentiels de l'approche système et de ses dérivés (IS, ME, etc.) au domaine de l'A&D.

Le troisième objectif est donc de justifier notre prise de position durant ces travaux sur certains de ces verrous et d'introduire alors les contributions de cette thèse.

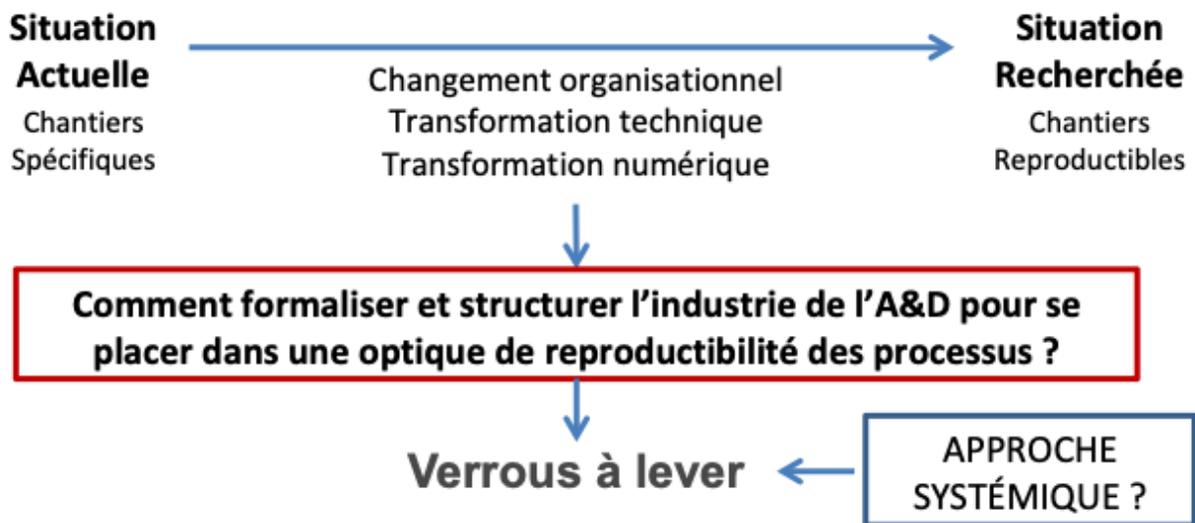


Figure 3 - Démarche menée pour orienter la thèse vers une intention de contribution

2.1 L'A&D

Cette partie vise à approfondir les verrous évoqués, leur impact sur les projets d'A&D, et les solutions existantes ou envisagées afin de les lever et donc, de pouvoir répondre aux deux problématiques essentielles identifiées : absence de fédération des modèles et manque de reproductibilité.

Pour obtenir des informations permettant de bien comprendre les tenants et aboutissants de l'A&D dans le contexte actuel, les enjeux et les défis que cela représente, certains ouvrages génériques sont à recommander, tels que *Sciences du démantèlement des installations*

nucléaires (Académie des sciences, 2015) ou encore *L'assainissement-démantèlement des installations nucléaires* (CEA, 2018).

Les deux conférences internationales auxquelles les travaux de thèse ont été présentés (DEM 2018, Avignon, France, et Waste Management Symposia 2018, Phoenix, AZ, USA), ou d'autres (e.g. ICOND 2018, Aachen, Germany), ont permis de préciser cet état de l'art ainsi que les travaux de recherche et développement (R&D) en cours dans le domaine de l'A&D à l'international.

Au niveau national, les différentes conventions et conférences organisées, notamment la conférence INDEX 2018 et la convention SFEN 2017, toutes deux portant sur l'importance de la transformation numérique dans le secteur nucléaire (et donc l'A&D), ont permis de prendre la mesure des efforts menés en ce sens.

Enfin, au niveau local, le site de Marcoule est le siège opérationnel des activités d'A&D du CEA civil. C'est également un pilier de l'A&D en France par ses installations historiques en démantèlement ainsi que par la proximité avec le site du Tricastin, également historique par ses activités d'enrichissement de l'uranium militaire. C'est pourquoi les travaux réalisés par les différentes organisations inter-entreprises précitées sont représentatifs de l'état de l'art en France. En outre, des entretiens ont été réalisés en interne sur le site de Marcoule. Chaque rencontre a été organisée sur le thème d'un ou plusieurs métiers du démantèlement, en partant de la simple conception du démantèlement jusqu'à l'atteinte de l'état final souhaité : chiffrage, modélisation numérique, gestion de projet, gestion des déchets, retour d'expérience (REX)... Celles-ci ont été réalisées conjointement avec L. Malaval dont les travaux d'alternance (Master ANVSI) portaient sur l'alignement stratégique des systèmes d'information des projets de démantèlement (Malaval, 2017). L'objectif de ces rencontres était d'identifier au CEA les problèmes constatés, et les axes de recherche et d'amélioration en cours et envisagés dans le futur, notamment dans le cadre de la transformation numérique, pour s'assurer de l'intégrité, la pérennité, la compétitivité et les performances des projets de démantèlement. Les modalités de ces rencontres sont précisées (**Tableau IV**). Elles ont été complétées par d'autres rencontres, entre autres lors de l'application des travaux de thèse à un chantier pilote, afin de mieux appréhender certains sujets moins bien analysés lors des premières rencontres (tels que la sécurité, la sûreté et l'environnement, ou encore la prise en compte des FOH). Enfin, l'analyse de retours d'expérience sur les problématiques rencontrées sur des installations (comme par exemple sur le réacteur Siloé à Grenoble) dont l'A&D est terminé ou en cours a également permis d'affiner les verrous.

À partir de l'ensemble de ces éléments, nous avons ainsi pu approfondir les verrous, mais également les axes de R&D existants en vue de les lever.

Acteurs	Fonction	Thèmes abordés
Pilotage de projet	Expert Senior Organisation et Ingénierie A&D, Responsable du pôle de compétence démantèlement	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi et structuration projet • Organisation • Gestion de projet • Relations prestataires/CEA • Interventions sur les installations • Scénarios et plan de démantèlement
Études	Ingénieur Responsable Études	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse de risques • Conception
REX & BIM	Ingénieur Études, Référent REX et Méthode BIM	<ul style="list-style-type: none"> • Capitalisation du REX • Méthode BIM
Suivi projet & Qualité	Ingénieur Qualité	<ul style="list-style-type: none"> • Phases des projets • Indicateurs, écarts et actions correctives • Gestion documentaire
Gestion financière	Ingénieur à la Mission Chiffrage	<ul style="list-style-type: none"> • Chiffrage des provisions • L'outil ETE-EVAL
Déchets & Transport	Chef de groupe et mission suivi des flux déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Étude, Zonage, Coûts • Relations ASN, ANDRA • Suivi de production et bilan déchets • Outil Influal
Scénarios & Modélisation	Ingénieur infographiste	<ul style="list-style-type: none"> • Outils de modélisation • Gestion des modèles

Tableau IV - Rencontres réalisées conjointement avec L. Malaval (tableau librement inspiré de (Malaval, 2017))

2.1.1 L'installation nucléaire en retrait de service : analyse de l'A&D

Il s'agissait d'abord de mieux définir ce qu'est l'A&D d'une installation nucléaire. Nous avons décidé de nous restreindre au cas des INB dans les prochaines lignes, choix qui ne réduira pas par la suite la portée de nos travaux, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

2.1.1.1 Définitions

La définition des termes « démantèlement », « déclassé » et « déconstruction », ainsi que le partage de ces notions, sont primordiaux à la compréhension mutuelle des acteurs. Pour cela, l'hypothèse consistant à se restreindre au lexique de l'ASN a été appliquée à notre analyse. Néanmoins, des ambiguïtés sont présentes au sein même de l'ASN sur les définitions. En effet on notera comme exemple le mot déclassé qui d'après son guide n°6 (ASN, 2016a) constitue « une opération administrative consistant à supprimer l'installation de la liste des « installations nucléaires de base » », tandis que d'après le lexique ASN, le déclassé est

« l'ensemble des opérations administratives et réglementaires destinées soit à classer une installation nucléaire dans une catégorie inférieure, soit à en supprimer le classement initial. ». La première définition se restreint donc à la suppression de l'INB, quel que soit le classement final de l'installation nucléaire. La deuxième, en revanche, s'intéresse à tout le cycle de déconstruction de l'installation nucléaire, considérant que toute baisse de niveau de classement est un déclassement, y compris une baisse de niveau de classement qui surviendrait à l'issue de la suppression de l'INB, et ce jusqu'à la suppression totale de classement pour l'installation. Nous avons conservé cette deuxième définition, compatible avec la notion de démantèlements successifs. En effet, on considère comme atteinte la réhabilitation complète de l'installation nucléaire (et donc la déconstruction terminée) lorsque l'ensemble des installations résiduelles qui restent soumises à un régime particulier après déclassement (ICPE, CSP, servitudes) sont intégralement affectées à d'autres missions (industrielles ou non industrielles), ou elles-mêmes déclassées complètement (par démantèlements successifs). Le démantèlement partiel, dont un exemple peut être le réacteur EL4 du site de Brennilis, ou encore G1 sur Marcoule, doit donc être considéré dans notre approche. En France, les classements possibles sont nombreux. Pour les ICPE, définies en fonction d'une nomenclature⁶, ils sont les suivants⁷ : NC (Non Classée), D (Déclaration), DC (Déclaration avec Contrôle), E (Enregistrement), A (Autorisation), SEVESO seuil bas (forcément A), SEVESO seuil haut (forcément A). Pour le classement des INB en catégorie, il faut se référer à la décision 523 de l'ASN (ASN, 2015).

À noter que le « démantèlement » couvrant l'ensemble des opérations techniques et administratives, entre un état initial et un état final de déclassement donné, nous avons dans la suite rapproché les termes « démantèlement » et A&D.

2.1.1.2 Déroulement

Cette étude de la phase de déconstruction nous a néanmoins mené à une première problématique intéressante. Il est en effet possible que le déclassement partiel d'une installation mène à un ou plusieurs classements différents par la suite. Par exemple, en France et pour une INB (ASN, 2016a) : ICPE, CSP, servitudes, ou sans classement. Il est donc important de se poser la question du périmètre de l'installation nucléaire, qui permettra de déduire ses composants. Pour obtenir le détail du périmètre des installations nucléaires, il est intéressant de considérer le guide n°9 de l'ASN (ASN, 2013). À noter que d'après son guide n°6, « l'ASN considère comme inacceptable la création d'ICPE ou d'installations relevant du code de la santé publique qui auraient pour unique objet de maintenir en place les bâtiments non assainis d'une ancienne installation nucléaire de base ».

⁶ http://www.ineris.fr/aida/liste_documents/1/18023/1 ; Dernière visite : 31/07/19

⁷ <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/Regime-de-classement.html> ; Dernière visite : 31/07/19

2.1.1.3 État final de chaque démantèlement

Il convient également de préciser au cas par cas pour chaque démantèlement son état final et donc le niveau de déclassement visé. En France, les modalités d'assainissement des structures avant déclassement sont précisées dans le guide n°14 (ASN, 2016b), qui préconise que celles-ci, menées par l'exploitant, doivent « *aller aussi loin que raisonnablement possible* ».

Cette démarche, se basant donc sur le principe de sûreté ALARA (« *As Lower As Reasonably Achievable* », traduit littéralement par « aussi bas que raisonnablement atteignable »), ne fixe pas *a priori* de seuil. Afin d'illustrer la démarche ALARA, ce sont les méthodes d'assainissement au cas par cas qui seront qualifiées pour pouvoir valider un déclassement, et non seulement des indicateurs (e.g. de doses) quantifiés et fixés.

2.1.1.4 Évolution en cours de déconstruction

Afin de mieux comprendre l'évolution de la configuration de l'installation nucléaire au cours de sa déconstruction, nous avons analysé ce qui se déroule au cours d'un démantèlement. Nous avons d'abord évoqué les notions d'état initial et d'état final de l'installation, structurantes et importantes pour partager la même vision d'un projet d'A&D, puis analysé les notions d'exutoires pour les déchets. À noter également qu'un projet d'A&D peut être découpé en lots (géographiques ou liés à des équipements) et que plusieurs projets d'A&D peuvent démanteler la même installation nucléaire (sur des périmètres différents).

Par ailleurs, nous constatons qu'au périmètre d'une installation nucléaire s'ajoute régulièrement, lors de la déconstruction, des équipements ou installations temporaires indispensables à la réalisation des opérations d'A&D (sas, installations supports, etc.) (**Figure 4**). Par mesure de simplification, la valeur de l'activité résiduelle (en Becquerel Bq) a été utilisée ici pour illustrer.

Enfin, comme dans tout projet industriel, des aléas peuvent survenir au cours de l'A&D, pouvant impacter l'installation nucléaire sur son périmètre, notamment suite à de nouvelles contraintes réglementaires ou suite à des événements imprévus (incident, investigation détectant des écarts avec des données anciennes, etc.) modifiant les caractéristiques physico-chimiques ou radiologiques.

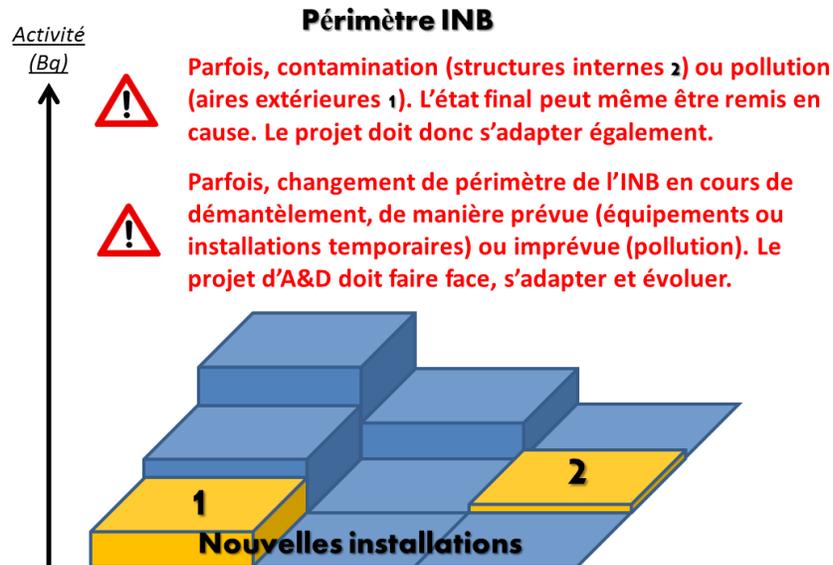


Figure 4 - Modifications du périmètre de l'INB en cours de projet de démantèlement

2.1.2 Verrous conceptuels

2.1.2.1 Vision partagée entre les parties prenantes des modalités de l'A&D (périmètre, finalité, missions, etc.)

On constate en premier lieu qu'il est parfois difficile de généraliser à l'ensemble des projets un certain nombre de modalités de l'A&D, ce qui implique de bien spécifier pour chaque projet celles-ci afin d'éviter toute ambiguïté dans les dialogues entre parties prenantes.

Concernant le démantèlement lui-même, on constate la difficulté à préciser les indicateurs de performance de l'A&D, qui permettront d'en évaluer la qualité. D'abord, définir une fonction d'objectif mathématique en identifiant les critères importants pour qualifier les performances des opérations de démantèlement est complexe. De la même façon, définir une fonction d'objectif mathématique pour qualifier la gestion du transfert de ces sources vers les différentes filières de gestion des déchets est complexe.

Il est dans un premier temps important de définir les exutoires du démantèlement, qui correspondent à l'ensemble des filières d'évacuation des matières et déchets (qu'on peut globalement classer en trois types : entreposage, stockage et revalorisation ; **Figure 5**). Il convient ensuite de cibler différents critères afin d'évaluer les impacts que la production de ces déchets peut avoir selon les types d'opérations menées et les filières déchets privilégiées (en fonction des opérations menées, les inventaires déchets par filières peuvent varier). Malheureusement, il est difficile de réaliser une telle évaluation pour différentes raisons, telles que :

- la différence d'impact de chaque terme source et donc de chaque Becquerel (en matière de sûreté notamment). On peut néanmoins citer ici le TSM, priorisant la sortie des

termes sources entraînant le plus de risques pour la sûreté et la sécurité, comme solution pour prendre en compte cette problématique ;

- l'évolution des recherches sur les exutoires (et tout ce qui est en lien : séparation, tri, conditionnement, etc.) et les solutions de décroissance artificielle complexifiant leur hiérarchisation ;
- l'évolution de la hiérarchisation des critères d'impact (environnementaux, coûts, délais, sûreté, etc.).

De fait, nos travaux se doivent de pouvoir intégrer cet aspect évolutif des indicateurs de performance d'un projet d'A&D, tout en facilitant leur spécification pour chaque projet à défaut de pouvoir systématiquement les généraliser.

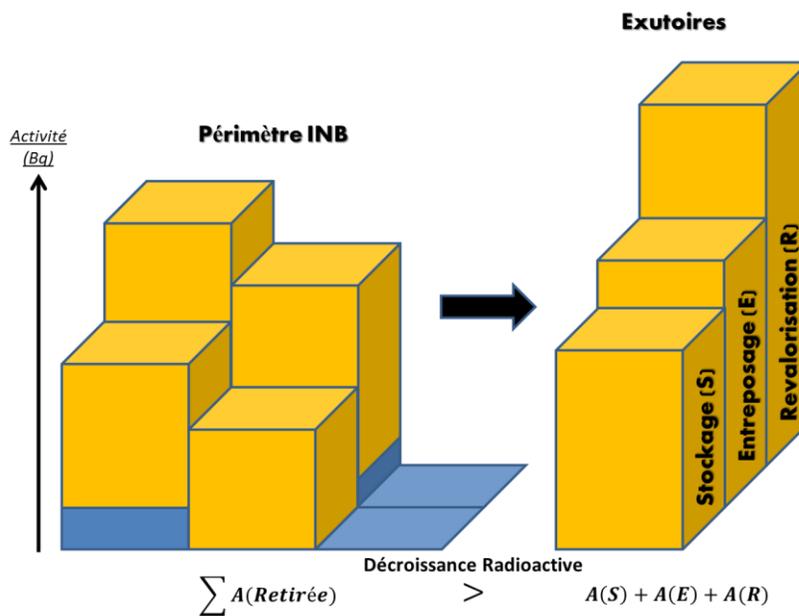


Figure 5 - Évolution de l'activité résiduelle de l'installation nucléaire au cours d'un démantèlement

2.1.2.2 Ontologie métier de l'A&D

L'A&D est, comme on l'a vu, un domaine en évolution et en expansion. Par conséquent, les méthodologies évoluent et en ce sens la terminologie et les concepts qui caractérisent l'A&D font de même. Les termes évoluent, parfois en se recoupant dans leur sémantique, et pourtant, il n'existe pas d'ontologie métier de l'A&D pour tous les regrouper : cela rend plus difficile la compréhension et la traçabilité des éléments des projets au fil du temps. À titre d'exemple, les termes cessation définitive d'exploitation (CDE) et mise à l'arrêt définitif (MAD) se rapprochent sémantiquement parlant, le premier n'étant plus usité. Ce problème s'étend bien au-delà de dialogues entre parties prenantes, car ces termes apparaissent dans des documents, et l'évolution des langages sur des projets longs, si elle n'est pas tracée, peut poser des problèmes d'interprétation. À titre d'exemple, dans les documents techniques, on parle parfois d'Article 31

ou d'Article 32 pour décrire les procédures menant à une modification du décret de démantèlement d'une installation. Désormais, les dispositions du décret de 2007 (État Français, 2007) ayant été codifié dans le code de l'environnement suite au décret 2019-190 du 14 mars 2019 (État Français, 2019), il s'agit des articles R. 593-47 et R. 593-48 de ce code. Pourtant, ces documents techniques ne peuvent pas être mis à jour automatiquement et, en étant modifié manuellement, ne comportent pas de trace de la modification.

En plus d'évoluer, la terminologie n'est pas forcément la même d'une partie prenante à l'autre. EDF va englober les activités d'A&D dans un seul terme, la déconstruction, tandis que le CEA va préférer le terme démantèlement. L'ASN définissant la déconstruction comme une succession d'occurrences de démantèlements, et préconisant aujourd'hui un démantèlement et un déclassement unique pour la réhabilitation, cela les rapproche fortement sémantiquement. Mais il pourrait y avoir confusion, notamment sur la portée d'un démantèlement (nous parlons aujourd'hui du démantèlement d'une installation et non des démantèlements). On constate donc ici l'importance de définir précisément l'état final attendu d'un démantèlement, pour que chacun puisse appréhender la limite de ce dernier sans risque d'interprétation.

Enfin, les traductions ne sont pas toujours aisées d'une langue à l'autre, encore moins lorsqu'il existe des différences réglementaires entre les différents pays du monde (prenons l'exemple des déchets, dont la classification diffère en France des autres pays, par exemple au niveau des TFA).

Malgré tous ces exemples, il n'existe pas aujourd'hui d'ontologie métier de l'A&D reconnue et partagée. Néanmoins, des travaux de thèse portant partiellement sur le sujet, menés de 2015 à 2019 au CEA, évoquent cette problématique et tentent d'y apporter des réponses, notamment dans le cadre de la valorisation des données, informations et connaissances pour faciliter leur gouvernance dans l'A&D (Samah, et al., 2016). Quant à la terminologie de base, le lexique de l'ASN⁴ est considéré comme une référence.

2.1.2.3 Modèle générique, permettant de gérer l'effet de série de l'A&D, et spécifiant formellement les métadonnées importantes pour l'A&D

En raison des finalités d'exploitation très différentes d'une installation nucléaire à une autre, et en raison du fait qu'une installation en démantèlement est une installation en fin de vie (ayant dans la quasi-totalité des cas plusieurs décennies d'existence), chaque installation en démantèlement comporte ses spécificités, et ce sur de nombreux aspects : matières mises en œuvre dans l'installation, typologie, taille, exploitants et autorités de tutelle, historiques de modifications et incidents, etc. Or, il n'existe pas à ce jour de modèle générique permettant de décrire concrètement l'A&D ni même de spécifier les métadonnées importantes à chaque projet d'A&D qu'il faut collecter.

Il est intéressant de citer les installations pour lesquelles il existe un effet de série, lié aux nombreux exemplaires existants : c'est le cas uniquement des réacteurs de puissance. On peut

faire l'hypothèse que pour démanteler ce type d'installations, il est possible d'appliquer un effet de série à l'A&D. De plus, le démantèlement d'un réacteur de puissance est *a priori* d'un degré de complexité inférieur à un réacteur de recherche ou toute autre installation de recherche, notamment du fait de la relative très bonne connaissance de l'état initial de l'installation permise grâce à sa configuration unique et la reproductibilité des procédés. Un réacteur de puissance suit en effet la même démarche opératoire pendant toute sa durée de fonctionnement, les écarts potentiels au fonctionnement normal sont souvent connus et leur traçabilité est plus facilement assurée. La capacité à gérer un effet de série dans l'A&D n'est néanmoins pas encore avérée aujourd'hui, ni en France, ni à l'international. En outre, des différences nombreuses induites par leur inscription dans le temps (différentes dates de mises en service et arrêts définitifs impliquent différentes technologies utilisées), par les potentiels incidents subis, ou par les éventuelles modifications ou mises à niveau (dépendant notamment des caractéristiques des sites sur lesquels elles se trouvent), ne permettent pas aujourd'hui de garantir qu'un modèle générique pour la phase d'A&D de ces installations est pertinent.

Néanmoins, il faut noter l'absence de modèle de données de l'A&D. Or, lever ce verrou, limitera le risque de se retrouver avec des problématiques de Big Data face aux référentiels conséquents relatifs à une installation à démanteler, car cela permettra de filtrer puis sélectionner les données, informations et connaissances pertinentes en fonction des besoins. À titre d'exemple, les modèles 3D (voire de BIM dans certains cas) sont aujourd'hui de plus en plus utilisés pour des études de faisabilité ou pour des études de scénarios d'A&D. Or, les objectifs des différents acteurs qui manipulent ces modèles (de la construction, de l'exploitation et du démantèlement) et leurs besoins en termes de niveaux de détails et de type d'information à afficher étant parfois différents, il est encore difficile de mutualiser ces modèles. Un constructeur aura par exemple besoin d'un niveau de détail très important sur les données géométriques quel que soit l'équipement, tandis qu'un responsable du démantèlement aura besoin d'une quantité importante d'informations contenues dans les métadonnées (historique des incidents, modifications, procédés mis en œuvre, etc.). Cela peut demander des puissances de calcul importantes et donc réduit la disponibilité de la maquette numérique. Il est donc important de pouvoir adapter la maquette numérique globale au besoin de chaque utilisateur. La spécification des métadonnées importantes pour l'A&D est donc fortement liée au verrou technique d'interopérabilité des outils et au verrou méthodologique de construction des référentiels de données, informations et connaissances.

2.1.2.4 Conclusion sur les verrous conceptuels

Au regard des nombreuses parties prenantes, des nombreuses installations concernées, et des nombreuses évolutions de l'A&D, on constate que les verrous conceptuels peuvent avoir un impact sur la traçabilité des projets, ce qui engendre également des impacts potentiels sur les

coûts et les délais pour structurer chaque projet en matière d'interfaces, de référentiels de données, etc. puis pour s'adapter en permanence à chaque évolution.

2.1.3 Verrous méthodologiques

2.1.3.1 Consolidation des règles de conception de l'A&D

L'absence de modèle générique entraîne des difficultés dans la capacité à structurer et construire un référentiel de données, informations, et connaissances partageable et lié à l'A&D. Cela implique qu'il n'existe pas de cadre prédéfini à l'établissement d'un référentiel de données, d'informations et de connaissances nécessaire à la réalisation du projet.

Pourtant, au niveau de la gestion de projet par exemple, rien ne distingue particulièrement les projets de démantèlement des autres projets, ni chaque projet d'un autre. Les règles générales et la méthodologie de management de projet s'appliquent donc. La différence se situe au niveau technique et surtout sur la maîtrise de l'état initial. De quoi partons-nous ? Et où voulons-nous arriver ?

Malheureusement, outre certains aspects administratifs, et les méthodes génériques de gestion de projet, il n'existe pas jusqu'à maintenant une réelle méthodologie commune pour le démantèlement car chaque chantier est toujours particulier. Ces particularités font qu'il n'existe pas en apparence suffisamment de points communs, pour envisager une reproductibilité globale des solutions mises en œuvre au cours des projets. Chaque installation a son propre référentiel, ses propres configurations et souvent son propre REX.

En effet, les REX techniques s'appliquent généralement à des opérations élémentaires comme par exemple la découpe d'une tôle sous l'eau, ou encore à des préconisations à la conception, par exemple en matière de matériaux à utiliser. Cela est notamment dû aux évolutions technologiques rajoutant de nouvelles inconnues (voir verrou portant sur la prévision et l'adaptation des scénarios d'A&D, présenté plus loin, mais relié). Cet aspect « élémentaire » des REX est également dû à la multitude de paramètres mis en jeu lors d'un projet d'A&D. Le contexte revêt d'une grande importance. Par exemple, un démantèlement ne peut pas être vu comme un traitement industrialisé en flux tendus, c'est-à-dire sans entreposage tampon (avant, après, ou entre le tri et le conditionnement des matières radioactives), celui-ci étant souvent nécessaire en cours de projet.

2.1.3.2 Référentiel unique et partagé d'exigences SMART

Il existe néanmoins aujourd'hui de nombreux référentiels de connaissances réglementaires et normatifs, souvent même très élaborés. Nous venons d'évoquer la gestion de projets. Au sein de la Direction de l'Énergie Nucléaire (DEN) du CEA, le R2MP est utilisé, basé sur la Recommandation Générale pour la spécification de management de programme RG AERO 0040 dont le (BNAE, 2012) fait partie. Il concerne aussi bien les projets d'A&D que les projets de

construction, de rénovation, et de R&D. Ce référentiel intègre les notions de Performance, de Coût, de Délai, et de Risque (PCDR). L'organigramme des tâches est l'outil de base, mais on retrouve également tout ce qui concerne la gestion des plannings, des configurations, de la performance, de la qualité, des écarts, etc. et on commence à y intégrer les différents problèmes liés notamment à la différence entre construction et démantèlement.

Pour aller plus loin et pour illustrer l'importance des référentiels, voici en **Tableau V** quelques exemples des référentiels utilisés au sein du CEA en fonction de métiers de l'A&D.

Métiers	Référentiels méthodologiques
Pilotage de projet	R2MP, PMGP, Spécifications A&D, Guides ASN, etc.
Études	R2MP, Guides et rapports ASN et IRSN, Liste docs. applicables, etc.
QSSE	R2MP, Référentiels QSE et sûreté, etc.
REX	Guides internes
Maîtrise des coûts	R2MP, ISDC, Référentiels EVM, etc.
Déchets - Transports	PNGMDR, Spécifications ANDRA, etc.

Tableau V - Quelques exemples de référentiels méthodologiques utilisés au CEA

La première norme internationale en lien direct avec le démantèlement, la norme ISO 16647 (ISO, 2018) a été publiée seulement en 2018. Celle-ci s'applique aux installations nucléaires et concerne leur mission de confinement à remplir en phase de démantèlement, et donc concerne également les activités de démantèlement susceptibles d'influer sur cette mission. D'autres normes ISO peuvent être mises en lien avec les activités d'A&D, telle que la norme ISO 18557 (ISO, 2017).

Enfin, de nombreuses autres normes de l'A&D existent. C'est le cas par exemple des normes publiées par ASTM International, dont de nombreuses sont actuellement valides dans le domaine de la déconstruction d'installations nucléaires⁸, mais qui ne constituent néanmoins aucunement des références normatives pour l'ensemble des projets du CEA. En outre, les nombreux organismes, associations, pôles de compétitivité, etc. évoqués précédemment proposent souvent des référentiels divers et variés.

Néanmoins, malgré la présence forte et grandissante de tous ces référentiels, ceux-ci ne sont pas systématiquement fédérés. On peut noter l'existence de documents dressant l'inventaire de référentiels applicables aux projets d'A&D, néanmoins, ces référentiels ne vont pas être automatiquement proposés lors de la conception de projets d'A&D en fonction des différents modèles à réaliser et fournir (tels que ceux présentés en Tableau I). Chaque projet doit en outre ajouter à ces référentiels des compléments spécifiques, afin d'avoir un référentiel applicable exhaustif.

⁸ <https://www.astm.org/Standards/nuclear-technology-standards.html#e10.03> ; voir plus précisément la section « Radiological Protection for Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities and Components » ; Dernière visite : 31/07/19

De plus, bien que ces référentiels induisent en retour généralement de nombreuses exigences sur les projets, celles-ci ne sont pas encore centralisées au sein d'un référentiel unique d'exigences applicables à chaque projet.

2.1.3.3 Accessibilité et adaptabilité des standards et règles

Parfois, il s'agit même de réaliser un travail important d'interprétation de ces référentiels pour les adapter à chaque projet et en définir les exigences applicables.

Afin d'illustrer cela, prenons l'exemple de la réglementation française. Lors de la conférence DEM 2018, une question a été posée lors d'une présentation sur le cadre réglementaire français pour assurer la sûreté des opérations d'A&D (Conte & Cloître, 2018). Elle portait sur l'évolution rapide des réglementations, difficile à anticiper, qui peut contraindre fortement et bloquer complètement les projets en cours de réalisation, qui sont quant à eux souvent répartis sur des délais très longs (10 à 40 ans pour beaucoup d'entre eux). Il n'est aujourd'hui pas prévu de réponse à cette problématique, les nouvelles exigences liées à la sûreté pouvant apparaître à tout instant continueront à être imposées en France aux projets en cours, qui nécessitent donc une forte adaptabilité.

En outre, le principe de sûreté ALARA s'applique pour la définition des exigences réglementaires. Cela rend ainsi difficile, pour des raisons intrinsèques, de garantir des exigences génériques SMART, c'est à dire levant toute ambiguïté pour les parties prenantes concernées. De fait, ces exigences réglementaires doivent forcément être raffinées au cas par cas en fonction des spécificités de chaque projet pour devenir SMART. Lever le verrou qui concerne la méthodologie intégrant l'entreprise étendue présenté plus loin, pourra forcément aider à réaliser ce raffinement et réduire les ambiguïtés.

Des alternatives d'évolutions existent d'ailleurs quant à certaines exigences émises par les organismes de réglementation, notamment sur les modalités de la gestion des matières radioactives⁹ : par exemple, sur la question largement et régulièrement débattue de la gestion des déchets TFA (IRSN, 2016) (Barboux, 2018) (Dauphin, 2019) (SFEN, 2019).

2.1.3.4 Capacité à prévoir à l'avance et adapter rapidement les scénarios d'A&D en suivant et traçant les évolutions

De par ses nombreux facteurs de complexité, tous les événements qui pourraient se produire au cours d'un projet d'A&D sont difficilement prévisibles.

Pour être en mesure d'anticiper, il y a le REX. L'objectif est de partager les connaissances pour tirer au mieux bénéfice des échecs et des réussites du passé. Le but étant toujours de mieux maîtriser les coûts, les délais et la technique, tout en minimisant les risques et en respectant les exigences de sûreté et de sécurité. Un exemple de source de REX intéressant est le projet

⁹ <https://www.debatpublic.fr/plan-national-gestion-matieres-dechets-radioactifs-pngmdr> ; Dernière visite : 31/07/19

PASSAGE, relatif à la dénucléarisation du centre CEA de Grenoble, qui a mené au déclassement de 6 INB, dont le réacteur de recherche Siloé cité précédemment et de 2 ICPE. Il représente plusieurs projets de démantèlement, aujourd'hui menés à terme jusqu'au déclassement des installations.

La bonne connaissance de l'état initial à l'arrêt définitif sera progressivement améliorée à l'avenir avec une gestion des connaissances prise en compte dès la conception des nouvelles installations (notamment grâce au suivi des configurations, par exemple via une gestion de versions des maquettes en trois dimensions de l'installation et par l'utilisation de technologies telles que le BIM). Or, il n'existe pas aujourd'hui d'outil éprouvé de suivi de l'installation intégrant les avancées et les modifications, et permettant à terme de disposer d'une donnée fiable, traçable, et à jour pour le démantèlement futur de l'installation. Des verrous limitent encore l'intégration à ce type de maquette de la précision et de la complexité nécessaires à un suivi futur détaillé permettant la prise en compte des besoins en données, informations et connaissances différents entre constructeurs, exploitants et démantelers, évoqués plus hauts. Néanmoins, des travaux récents et de plus en plus nombreux évoquent les efforts dans le PLM pour suivre les différentes étapes du cycle de vie d'une installation nucléaire (Dupré & Aabadi, 2019) (Cheutet, 2018). Ce PLM, couplé à du BIM (Szóke, 2018), pourrait permettre d'améliorer la traçabilité des éléments d'une installation nucléaire tout au long de son cycle de vie.

Aujourd'hui, il est demandé tout au long de la vie de l'installation de structurer et mettre à jour régulièrement dans un plan de démantèlement un certain nombre de données, informations et connaissances pour la réalisation future des opérations d'A&D. Une meilleure centralisation des données, informations et connaissances relatives à la vie d'une installation nucléaire et utiles pour l'A&D, faciliterait ainsi la rédaction et les mises à jour de ce plan de démantèlement.

Outre une bonne qualité recherchée des prévisions de l'A&D en amont, on constate que dès l'apparition d'un événement, il n'existe pas de méthodologie unique pour adapter la réponse. Le REX se trouve dans de telles situations très utile, bien évidemment, mais il est possible d'aller plus loin. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, le REX va avant tout permettre de choisir la solution qui semble la plus adaptée, pour des briques élémentaires du nouveau scénario d'A&D par exemple. Mais aucun outil aujourd'hui ne va guider le concepteur du scénario automatiquement, en fonction des nouvelles exigences applicables, vers différentes alternatives de solutions à envisager, puis vers un choix optimal. Cela reste encore de la conception « à façon ».

Des pistes de performance peuvent donc apparaître pour rendre la reprise d'un projet plus facile et rapide, face à chaque événement, en s'assurant à nouveau de la cohérence globale de la conception des scénarios de démantèlement proposés.

De plus, il n'existe pas vraiment d'outil particulier pour l'évaluation de ces scénarios. Le chef de projet réalise ou pilote une étude de scénarios argumentée de différents critères d'évaluation, dont l'évaluation des risques fait notamment partie. Un groupe d'experts peut alors être appelé

selon les spécificités du projet pour fournir leurs préconisations sur le choix d'un scénario. C'est enfin l'équipe projet qui décide du scénario de démantèlement le plus adapté. La hiérarchisation des projets et des activités à réaliser dans le cadre de l'A&D, notamment via le critère du TSM évoqué plus haut, est une approche existante qui peut être mise en avant pour tenter de lever le verrou (en proposant par exemple des critères pour améliorer en amont l'évaluation des alternatives de scénarios puis l'accélérer en exécution).

2.1.3.5 Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile

Un projet d'A&D est tout sauf isolé. D'abord, il peut faire intervenir de nombreuses parties prenantes. Or il n'existe pas à ce jour de plateforme unique permettant de gérer toutes les interfaces entre le projet et ces parties prenantes. Néanmoins, les outils et méthodologies utilisés ont beaucoup évolué ces 20 dernières années notamment au niveau de la Gestion Électronique des Documents (GED). Quel que soit le système de GED, le problème est avant tout de capter la donnée. Il est important d'utiliser des métadonnées pour garantir la traçabilité des documents (n° du marché, localisation, métier concerné, etc.), ainsi que pour s'assurer qu'ils possèdent un identifiant unique. Concernant les marchés, au CEA, une liste des documents génériques applicables, contenant par exemple ce qui est attendu des prestataires en matière de livrables, est transmise et mise à jour environ deux fois par an.

Mais parler des interfaces internes au projet ne suffit pas. Ce dernier interagit également avec de nombreuses parties prenantes externes, qui émettent souvent des exigences sur le projet ou en reçoivent. Or, il n'existe pas de modèle générique qui permet de décrire ni visualiser l'ensemble de ces interactions pour chaque phase et étape du cycle de vie d'un projet d'A&D. Ce manquement peut rendre difficile la prise en compte de l'ensemble des exigences : on constate un lien fort avec le verrou lié au référentiel d'exigences.

La maîtrise des coûts est également un sujet à la fois interne à chaque projet, et transverse. De fait, elle soulève de nombreux problèmes et liens avec les autres verrous identifiés. Au niveau international, l'International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) (OECD-NEA, 2012), émis par l'AIEA, propose de fixer un cadre de recommandations quant à cette maîtrise des coûts. CERREX (Cost Estimation for Research Reactor in EXcel) (IAEA, 2013), développé par l'AIEA, est un outil proposé aux pays qui le souhaitent pour l'estimation des coûts de démantèlement des réacteurs de recherche. Il s'agit d'un fichier Excel répertoriant entre autres les coûts, les tâches et les conditions d'opération. En France, ETE-EVAL est l'outil de chiffrage (pour Orano et CEA). La maîtrise des coûts nécessite une bonne connaissance du terrain, de l'installation et une maîtrise des données d'entrée. La connaissance des tâches et de l'installation est primordiale. On se rend alors compte de l'importance de la maîtrise des conditions d'intervention, puisque les différences de coûts sont significatives selon que

l'opération se déroule en tenue universelle ou en combinaison ventilée par exemple. La maîtrise des coûts montre qu'il s'avère primordial de modéliser les processus pour les maîtriser et surtout en avoir une meilleure vue macroscopique. Cette maîtrise passe également par la considération des contraintes transverses à tous les projets, liées notamment à l'attribution du budget global annuel alloué à l'ensemble des projets.

Aujourd'hui, malgré la prise en compte croissante des aspects transverses des projets d'A&D, les liens méthodologiques et techniques entre outils restent faibles. Afin de lever ce verrou, il est régulièrement mis en avant dans de nombreux domaines l'apport de nouveaux outils dans la mutualisation des données, informations et connaissances, ainsi que des différentes parties prenantes participant activement aux projets. Il est aujourd'hui nécessaire d'en définir les usages dans le cadre des chantiers de démantèlement. Ces outils pourraient notamment servir de base à l'établissement d'inventaires, et favoriseraient la traçabilité (et donc une plus grande fiabilité) ainsi qu'une meilleure gestion de tous les types de données relatives à l'installation nucléaire à démanteler, notamment grâce à la possibilité d'associer les aspects 3D aux autres données, informations et connaissances dites 1D et 2D (caractéristiques radiologiques, chimiques, physiques, notes, hyperliens vers des documents d'installation, etc.).

Néanmoins, pour utiliser de manière cohérente ces nouveaux outils ou modèles, il faut en définir la méthode d'usage. On a donc besoin de définir :

- Quand est-ce qu'on en a besoin ?
- Comment relie-t-on et fait-on vivre les données, informations et connaissances 1D, 2D et 3D ?
- Quel niveau d'information et de détail avons-nous besoin ?

Il faut ainsi trouver la bonne adéquation [détail – projet], et pour cela, la levée des verrous conceptuels et la théorisation de l'A&D semble indispensable.

2.1.3.6 Conclusion sur les verrous méthodologiques

Les verrous méthodologiques montrent qu'aujourd'hui, des REX et de nombreux référentiels permettent d'identifier des éléments reproductibles à de nombreux points de vue sur les projets (opérations, risques, exigences réglementaires, etc.). Néanmoins, ces REX s'appliquent souvent à un niveau élémentaire de la conception, et il n'existe pas aujourd'hui de structure unique ni de méthodologie pour relier ces éléments dans le but de guider les responsables de projets d'A&D dans la modélisation de leurs scénarios. On observe en revanche bien le lien avec les verrous conceptuels qui une fois levés faciliteraient la mise en place de démarches méthodologiques.

2.1.4 Verrous techniques

2.1.4.1 Outils interopérables et fichiers d'échanges conformes et compatibles

On a pu constater que de très nombreux outils existent pour traiter des données, informations, et connaissances. Néanmoins, ceux-ci sont rarement interopérables, c'est à dire que les modèles qu'ils exploitent nécessitent souvent d'être transformés et/ou interprétés pour pouvoir être transposés dans d'autres outils exploitant des modèles relatifs à d'autres points de vue d'un projet d'A&D. À titre d'exemple, les travaux de L. Malaval (Malaval, 2017) mettent en avant cette problématique au sein du CEA. Or, cette transposition, en plus de dupliquer les données, informations et connaissances, peut être source d'erreur et ne permet pas une prise en compte rapide de modification d'un élément du projet sur l'ensemble des modèles de ce dernier dans lequel cet élément apparaît. C'est pourquoi des réflexions existent pour mener vers des outils globalisants, avec une approche centrée sur les données plutôt que sur les documents. Or, on constate à ce sujet un lien étroit avec l'absence de modèle générique de l'A&D, verrou qui en étant levé, faciliterait la spécification de tels outils.

2.1.4.2 Garantie de la fiabilité des données d'entrée

On a pu illustrer la difficulté à garantir une traçabilité complète des éventuels événements et modifications qui surviennent tout au long du cycle de vie d'une installation jusqu'à son arrêt définitif, y compris pour les installations actuelles, bien que de nombreux travaux portant sur les nouveaux outils du numérique puissent améliorer cette traçabilité à l'avenir.

On a également pu constater que la transparence dans le transport des données, informations et connaissances pourrait être perfectible au travers de la simplification des interfaces entre outils. Cette difficulté est liée également aux verrous économiques et liés au FOH qui vont suivre.

Enfin, des défis techniques plus fondamentaux persistent, en matière d'acquisition des données, principalement dûs au manque d'accessibilité de certaines zones *in situ* en cas de caractérisations et de mesures (par exemple dans des cellules difficilement atteignables ou fortement contaminantes et/ou contaminées).

2.1.4.3 Conclusion sur les verrous techniques

De nombreux travaux actuels visent à répondre à ces verrous techniques, notamment concernant la valorisation du contenu des documents (textes, images, etc.) et leur migration vers des supports davantage centrés sur la donnée, comme par exemple (Cheutet, 2018) (Szóke, 2018). Plus particulièrement, on constate aujourd'hui de nombreux efforts (Georges, et al., 2016) dans la réalisation d'outils capables d'acquérir (Dory, 2018), de capitaliser des données informations et connaissances (Iguchi, et al., 2017) (Depauw, et al., 2018) (Plana, et al., 2018), puis de gérer ces DIC (Ytournal, et al., 2016) (Louka, et al., 2018), notamment pour concevoir les

projets et scénarios d'A&D (Pradoura, 2009) (Chabal & Soulabaille, 2016) (Chabal, et al., 2018). De plus en plus d'outils visent à former et à faire collaborer des parties prenantes, et à être un support pour l'évaluation des scénarios d'A&D et l'aide à la décision (Clere Andre, et al., 2018) (Henry, 2018).

Il est intéressant de noter que la forte collaboration internationale qui a fait suite à l'accident nucléaire de Fukushima a permis d'avancer sur un certain nombre de domaines techniques utiles à l'A&D, tels que ceux présentés par (Gauché, 2018). Enfin, la question de la modularité et de l'adaptabilité des outils d'intervention à distance est également source de nombreuses études (voir par exemple les travaux communiqués dans la section « *robotics, remote systems & other emerging technologies* » de *Waste Management Symposia 2018*¹⁰), de concours d'idées (Noda, 2018), et enfin d'évolutions technologiques (CEA, 2016).

L'ensemble des travaux référencés peut, d'une part, contribuer à lever le verrou technique de manque d'interopérabilité au niveau des outils, en proposant des solutions en matière de compatibilité, de transferts de fichiers, etc. D'autre part, ils peuvent contribuer à lever également les verrous économiques et ceux liés au facteur organisationnel et humain identifiés, en intégrant des solutions en matière d'ergonomie d'interfaces homme-machine, de sécurité informatique, de configurations des rôles et des accès, etc.

2.1.5 Verrous économiques et liés au FOH

2.1.5.1 Conciliation des intérêts industriels et de la propriété intellectuelle des parties prenantes dans des démarches collaboratives

Comme nous l'avons vu des démarches et outils se mettent déjà en place pour gérer la collaboration des parties prenantes, tels que le BIM. Néanmoins, un nouveau verrou est soulevé par de telles démarches et outils : la conservation des intérêts industriels et la gestion de la propriété intellectuelle des parties prenantes, et donc de fait, la gouvernance des données. En effet, mettre à disposition une quantité importante de données, informations, et connaissances, en prônant des démarches collaboratives et des outils basés sur la collaboration d'entreprises variées, peut mettre en péril les secrets industriels et la propriété intellectuelle de ces dernières. Il est par conséquent nécessaire de se prémunir de cela en ajoutant des protections. Pour ce faire, l'état de l'art de ces démarches et outils montre néanmoins l'existence de plusieurs moyens de lever ce nouveau verrou (contrats de collaboration, gestion des accès, etc.), moyens dépendant des solutions collaboratives choisies. Il s'agira donc principalement, en fonction de celles-ci, d'identifier les bonnes pratiques (si elles existent), pour que ce verrou n'en soit pas un.

¹⁰ <https://www.xcdsystem.com/wmsym/2018/FinalProgram.pdf> ; Dernière visite : 31/07/19

2.1.5.2 Accompagnement au changement pour catalyser les évolutions de pratiques et d'habitudes

La levée de l'ensemble des verrous identifiés ne peut pas se faire sans mesures d'accompagnement au changement en cohérence avec les évolutions induites par toutes les solutions issues de cette levée de verrous. Cela implique notamment des formations (dans le cadre des rapports de fin d'intervention, par exemple, des formations à l'importance de la traçabilité des REX fournis pour garantir leur fiabilité, tout en montrant comment la conservation de la propriété intellectuelle de l'entreprise peut être gérée) et un accompagnement continu des parties prenantes. De la même façon que pour le verrou précédent, il s'agira principalement à chaque mesure prise pour lever un verrou, d'identifier les bonnes pratiques pour que ce verrou n'en devienne pas un.

2.1.5.3 Conclusion sur les verrous économiques et liés au FOH

Les verrous économiques et liés au FOH sont des verrous transverses, qui vont concerner tous les autres, et nécessitent une vigilance particulière lors de toute nouvelle mesure prise pour lever les verrous d'un autre domaine.

2.2 Théoriser, structurer et rationaliser l'A&D : des activités qui orientent les travaux vers l'approche système

Ces verrous ont conduit le CEA à lancer ces travaux de recherche, afin d'étudier puis de proposer comment théoriser, structurer et rationaliser l'A&D, et de fait lever certains de ces verrous. Cette orientation sert en effet un enjeu majeur pour le CEA qui a pour missions, dans un contexte de ressources publiques contraintes, d'assurer la maîtrise industrielle du démantèlement des installations nucléaires en renforçant le pilotage et la performance de cette activité.

La théorisation souhaitée n'est pas évidente compte tenu justement des verrous identifiés. Ceux-ci reposent notamment sur des facteurs de complexité de l'A&D, qui sont multiples, d'origine multidisciplinaire, et évolutifs :

- les nombreux domaines d'activité et métiers concernés, nécessaires à la réalisation des opérations d'A&D ;
- les nombreuses parties prenantes impliquées, ainsi que leurs différents rôles et responsabilités ;
- les nombreuses et diverses interactions entre ces éléments ;
- la quantité importante de données, d'informations et de connaissances à manipuler, devant être structurées ;

- une culture du risque très importante, et des systèmes critiques à manipuler, les installations nucléaires, dont une rupture de confinement, par exemple, peut avoir des conséquences dramatiques ;
- les exigences fortes et strictes vis-à-vis des erreurs, écarts, disponibilité, etc. ;
- la durée significative des projets et son impact sur l'intégrité de ces derniers ;
- les évolutions des projets qui nécessitent des modèles flexibles et adaptables.

C'est en ce sens que l'approche système et la pensée système ont été mises en avant pour guider les réflexions. Les apports spécifiques et l'usage de concepts, de méthodes et d'outils ont été étudiés pour nous amener à mieux cerner les contributions attendues.

L'approche système (Le Moigne, 1977) (CEA, 1999) (Féliot, 2007) ou encore systémique offre une démarche permettant de définir, de décrire et de raisonner sur des phénomènes ou des organisations de choses hétérogènes, dont l'ensemble est qualifié de complexe et pouvant de fait être difficilement circonscrit à un point de vue unique. À l'opposé des approches cartésiennes qui se focalisent sur la décomposition de l'ensemble (des choses) à étudier en parties paraissant plus simples à maîtriser, l'approche systémique permet de voir l'ensemble comme un tout formé par des parties interreliées, et interagissant de concert pour remplir une mission globale. Le concept de système émerge donc, et est un concept de base ici. Un système se définit classiquement comme « une abstraction d'un phénomène ou d'une situation dans le but de le comprendre et de le maîtriser » (Le Moigne, 1977). La description de ce système (ce qu'il est, ce qu'il fait, etc.) passe par la construction de modèles de ce phénomène ou de cette situation. De fait, des principes de modélisation ont été proposés comme, par exemple :

- utiliser un niveau de détail suffisant pour rendre compte d'un comportement ou d'une situation, en filtrant la réalité et en se focalisant sur les objectifs de l'acteur qui modélise. Un modèle est en effet une image non nécessairement complète ou définitivement fidèle dans le temps. Il répond à un objectif de résolution de la part de l'acteur qui a mené à bien cette modélisation ;
- construire progressivement les modèles en utilisant le concept de vue de modélisation, classiquement fonctionnelle, organique et opérationnelle, et différents points de vue, comme le préconise par exemple la Méthode SAGACE, synthétisés dans sa grille (CEA, 1999) (**Figure 6**).

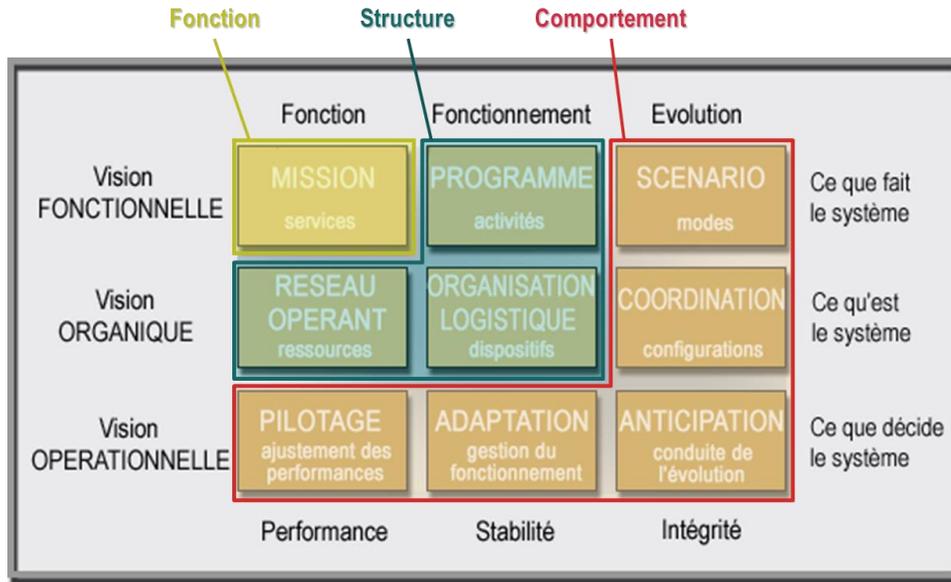


Figure 6 - Grille SAGACE pour représenter un système (3 vues ou visions, 3 perspectives, et 3 vues résultantes)

Adoptant le cadre systémique, nous préférons alors reprendre la définition que propose cette méthode SAGACE : « Un système est une représentation construite par un observateur qu'il juge pertinente face à une situation perçue complexe. Cette construction a pour but de mieux comprendre, anticiper, ou maîtriser la situation, en facilitant la communication avec les autres acteurs concernés ».

De fait, et dans un premier temps, il nous semble pertinent de considérer qu'un projet de démantèlement peut être vu comme un système complexe.

Dans un deuxième temps, des méthodes s'inspirent de l'approche système et la mettent en œuvre d'une certaine manière, telle SAGACE. Ces méthodes illustrent l'intérêt et l'apport de ces principes systémiques pour structurer les idées et guider la représentation, la réflexion et le raisonnement autour de cette vision globalisante et multi vues holistique des systèmes complexes. Cette vision holistique se caractérise par le fait qu'un système peut être représenté par un ensemble de points de vue fédérés et non par une simple décomposition en sous-systèmes. Autrement dit, cela signifie que le tout représente davantage que la somme de ses parties.

Enfin, dans un troisième temps, nous considérons des méthodes comme l'Ingénierie Système et la Modélisation d'Entreprise, qui empruntent leurs principes et concepts à cette approche système, ou théorie des systèmes, mais en visant des champs applicatifs plus pragmatiques.

2.2.1 L'Ingénierie Système

L'Ingénierie Système (IS) est « une approche interdisciplinaire [...] pour permettre la réalisation de systèmes performants » (Collectif AFIS, 2012), et appliquée à divers domaines tels que l'aéronautique (NASA, 2016) (BNAE, 2012), les transports (Department of Transportation, 2007),

les soins de santé (Kopach-Konrad, et al., 2007), et les systèmes de fabrication et de défense. L'IS, dont l'intérêt est éprouvé (Honour, 2013), promeut à la fois :

- des principes systémiques plus concrets (e.g. système, sous-système, sur-système, exigence, mode, etc.) (BKCASE Editorial Board, 2019) (INCOSE, 2015);
- des processus structurés mettant en avant une organisation des tâches et structurant donc le travail de conception, allant de l'analyse de mission jusqu'à la gestion des configurations, la vérification ou encore l'évaluation système. Ces processus qui sont aujourd'hui éprouvés en industrie, font l'objet de normalisation (ISO, IEC, IEEE, 2015) dans divers domaines et sont actuellement adaptés aux dimensions PME/PMI (ISO, IEC, 2016) (Laporte & Palza Vargas, 2012) ;
- l'usage et l'intérêt des modèles. L'IS est aujourd'hui positionnée comme méthode d'ingénierie basée et structurée sur des modèles et non plus sur des documents. Nous nous intéressons ici tout naturellement à ce qui aujourd'hui est baptisé Ingénierie Système Basée sur des Modèles (ou Model Based System Engineering - MBSE) (Estefan, 2008) (Hart, 2015) (Micouin, 2014). Celle-ci emprunte beaucoup à l'approche dite d'Ingénierie Dirigée par des Modèles (IDM) dans le domaine informatique. Le MBSE est défini comme « *l'application formalisée de la modélisation pour prendre en charge les activités requises pour la configuration système, la conception, l'analyse, la vérification et la validation, et ce, dès la phase de conception jusqu'à la phase de développement et les phases de cycle de vie ultérieures* ». Pour ce faire, le MBSE vise la création, l'analyse et l'utilisation de divers modèles qui naissent puis irriguent les activités des processus. Des activités orientées vers la modélisation et la manipulation de modèles sont jugées aujourd'hui cruciales pour les ingénieurs tout au long du processus de conception d'un système ;
- l'usage et l'intérêt d'une chaîne numérique d'outils supports implémentant des langages de modélisation. Nous pouvons citer par exemple SysML (OMG, 2019), MODELICA (Modelica, 2017), mais également des langages métier comme préconisés dans la méthode ARCADIA supportée par l'outil CAPELLA de Thalès (Roques, 2016), ou encore d'autres outils comme CORE et GENESYS (Vitech Corp., 2017), parfois plus dédiés (Lemazurier, et al., 2017).

2.2.2 La modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise peut quant à elle être définie comme « *l'art d'externaliser les connaissances qui peuvent apporter une valeur ajoutée à l'entreprise, ou qui doivent être partagées* » (Vernadat, 1999). Pour représenter et manipuler ces connaissances, les modèles jouent ici aussi un rôle crucial pour décider et agir en entreprise, c'est-à-dire élaborer puis piloter divers types de projets. Sur ce point, nombre de travaux s'avèrent pertinents pour élaborer les projets d'A&D comme des projets d'entreprises qui souhaitent collaborer et mettre

en commun leurs ressources et expertises. En ne citant que les travaux de références utilisés au cours de cette thèse, la Modélisation d'Entreprise a donné lieu à plusieurs langages de modélisation dédiés, par exemple à la modélisation de processus comme BPMN (OMG, 2014), ou encore, à un niveau plus conceptuel, Unified Enterprise Modelling Language UEML (Vernadat, 2002). Elle a également donné lieu à des frameworks d'architecture tels que celui de Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology GERAM (IFIC, IFAC, 1999) (Bernus, et al., 2015) (**Figure 7**) qui, avec le cube CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open Systems Architecture) (Fadel, 1994) (Gransier, 1995), a mené à proposer l'ISO 19439 (ISO, 2006) et qui permettent de conceptualiser puis de formaliser cette notion de projet. Notons enfin le lien étroit entre ces apports et le PMBoK (Project Management Institute, 2017). De fait, la Modélisation d'Entreprise est une discipline toute aussi structurante dans le cadre de ces travaux pour guider les responsables d'entreprises, de départements, mais aussi de projets à :

- comprendre, analyser et maîtriser la structure et le fonctionnement d'un système socio-technique et complexe par excellence, l'entreprise, en suivant des modèles maintenant reconnus, par exemple (Al Hadidi & Baghdadi, 2019) qui propose une formalisation ontologique du principe d'entreprise étendue ;
- identifier, modéliser puis évaluer des comportements, des performances et plus globalement divers indicateurs de pilotage de projets ;
- modéliser et évaluer diverses solutions organisationnelles impliquant des composants de natures technique et humaine, par exemple pour favoriser l'implantation et le déploiement de nouveau processus ;
- identifier et évaluer les risques liés à ces déploiements ;
- au final, permettre de construire une vision commune du fonctionnement, de l'organisation et de la valeur ajoutée de tout ou partie de l'entreprise, la communiquer facilement aux collaborateurs et aux partenaires, et aligner les systèmes d'information avec les besoins des acteurs de ces processus (Amokrane, 2016).

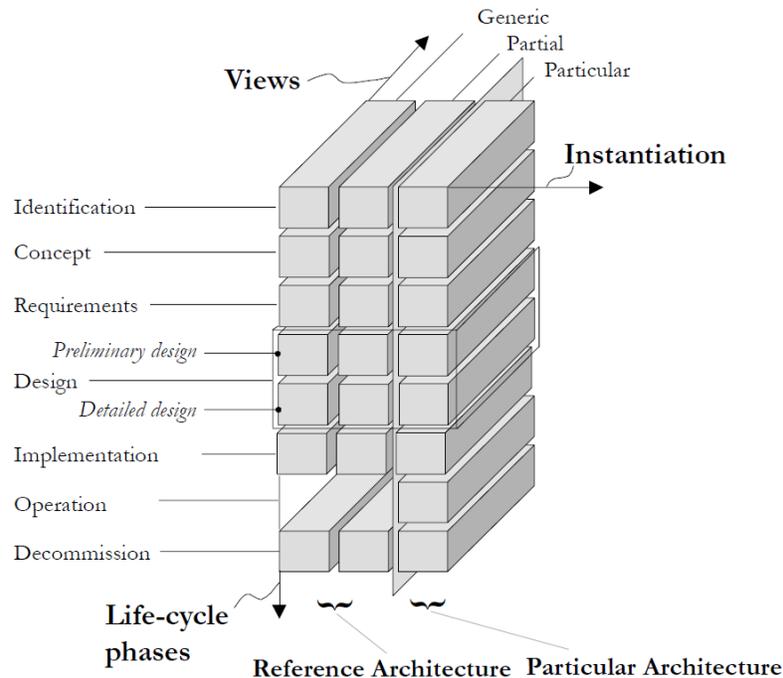


Figure 7 - le GERA Modelling Framework - Figure issue de la page 18 de (IFIC, IFAC, 1999)

2.2.3 Synthèse et constats dans l’A&D aujourd’hui

L’Ingénierie Système comme la Modélisation d’Entreprise sont aujourd’hui des disciplines éprouvées, avec des méthodes outillées et qui ont fait leurs preuves dans nombre de domaines. Notre étude bibliographique, présentée en **Annexe I**, nous a permis de constater qu’elles n’ont cependant pas été réellement appliquées, de manière croisée ou concomitante, au domaine de l’A&D. L’IS, notamment, est privilégiée en général comme une méthode d’ingénierie pour la réalisation de travaux neufs et l’exploitation (voir par exemple les travaux présentés à INDEX 2018 (Dupré & Aabadi, 2019) ou la thèse de (Lemazurier, 2018)). Nous démontrerons ainsi dans les chapitres suivant comment des emprunts marqués à l’IS et à la modélisation d’entreprise nous ont guidés pour lever les verrous vus plus haut.

Plus particulièrement, nous avons pu identifier quelques travaux dans l’A&D mettant en évidence des liens intéressants avec l’approche système. Nous pouvons particulièrement souligner, parmi ceux-là :

- des travaux réalisés à Sellafield (Ytournal, et al., 2016) (Macpherson & Dunlop, 2016), qui évoquent l’adoption d’une approche systémique, visant une dimension holistique. Ces travaux proposent ainsi un découpage en points de vue fédérés, mais se concentrent uniquement sur la phase transition entre l’exploitation et la déconstruction, qu’ils nomment « Post Operation Clean Out ». De plus, ce découpage n’est pas guidé par les vues classiques de la systémique (fonctionnelle, organique et opérationnelle) évoquées plus haut ;

- les divers travaux sur le PLM identifiés, qui ajoutent à cette dimension holistique la dimension temporelle complexe des cycle de vie des installations nucléaires et des projets d'A&D. Les travaux présentés à DEM2018, de (Cheutet, 2018) menés à l'INSA Lyon, et de (Szőke, 2018) menés à l'Institute for Energy Technology de Norvège, évoquent particulièrement cette dimension, tout en mettant en avant également la nécessité d'associer la démarche et les outils de PLM à d'autres outils tels que des outils de BIM, qui peuvent participer au découpage selon une dimension holistique.

On constate par ailleurs l'absence de prise en compte de la dimension d'instantiation ou généricité. Cette dimension est pourtant proposée par des standards et travaux de modélisation d'entreprise tels que GERAM (dont le framework propose une modélisation orientée selon un découpage en trois dimensions : points de vue, phases du cycle de vie, et instantiation). En effet, les modèles réalisés et proposés dans l'état de l'art ne s'appuient pas sur un modèle générique propre à l'A&D, ni ne proposent d'abstraction systémique du domaine.

Enfin, la notion de niveau de méta-modélisation proposée dans le standard Meta-Object Facility (MOF) de l'Object Management Group (OMG) (ISO, IEC, 2014) (OMG, 2016) n'est pas utilisée.

2.2.4 Méthode de travail

Adopter une approche système vise donc à être structurante. Elle doit permettre d'approcher et de comprendre, mais aussi de convaincre les acteurs de l'A&D, que cet A&D est un système particulier (approche théorique). Elle doit, de fait, aboutir à la formalisation des éléments méthodologiques nécessaires à la spécification et à l'organisation des projets d'A&D (approche pragmatique et opérationnelle).

Parmi ces éléments, les outils mis à disposition des responsables de projets doivent leur permettre de passer d'une gestion des données, informations et connaissances « centrée documents » vers une gestion « centrée données et modèles » (**Figure 8**), de plus en plus en amont et intégrant les multiples points de vue système.

De plus, les transformations qui touchent l'A&D aujourd'hui entraînent en effet, et de plus en plus, les responsables de projets à créer, manipuler, puis échanger des modèles numériques (maquettes 3D physiques, chimiques et radiologiques, modèles de flux, etc.), dont le nombre et le niveau de détail dépendent de chaque projet. Leur création, leur mise en œuvre et leur mise à jour constituent un enjeu majeur pour les responsables. Il est par conséquent venu assez naturellement l'idée de se tourner plus particulièrement vers une approche de MBSE.

Enfin, ces apports théoriques et pragmatiques doivent être structurants pour l'ensemble du cycle de vie d'un projet de démantèlement, de sa conception jusqu'à sa clôture, en passant par sa réalisation.

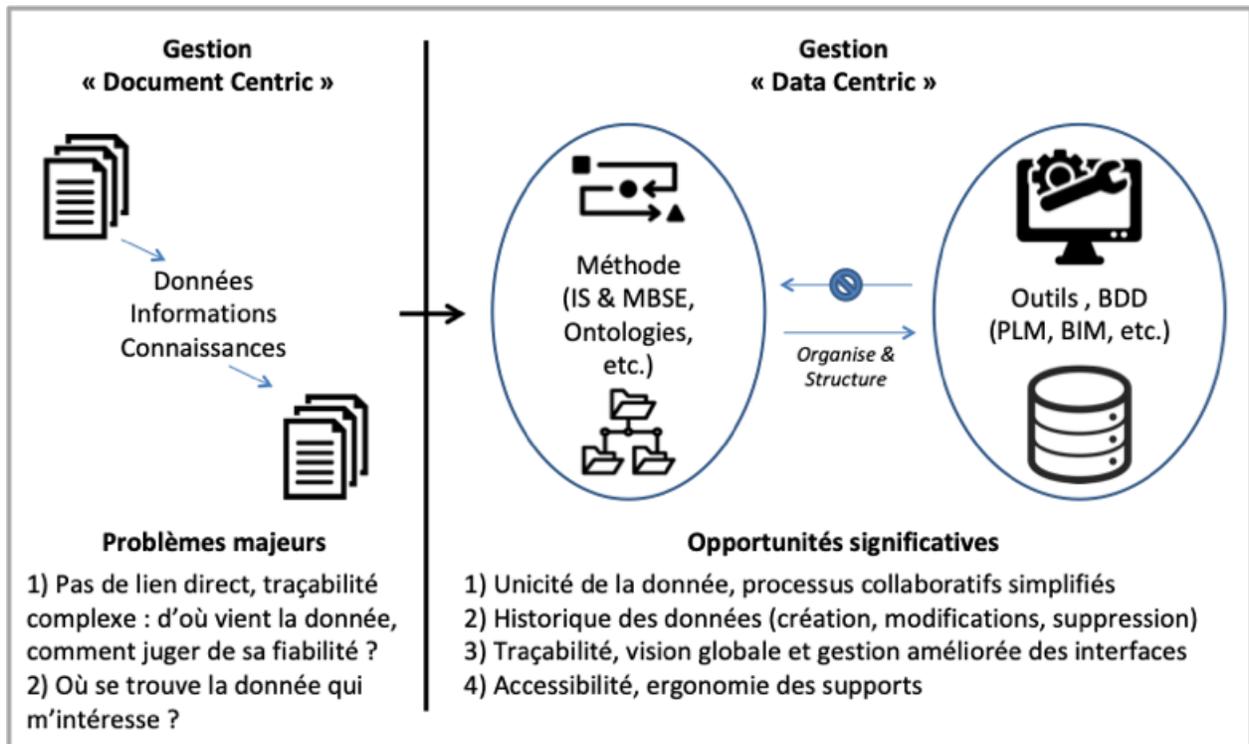


Figure 8 – Intégration de l'effort de recherche dans le contexte actuel de l'A&D

2.3 Positionnement et vue d'ensemble des travaux

2.3.1 Proposition d'une méthode pour lever certains des verrous identifiés

Nous proposons d'étudier et de développer une méthode permettant d'aider et d'assister les chefs de projet à spécifier leurs projets, dans un premier temps, puis à les piloter en les adaptant au contexte mouvant de l'A&D ensuite. Cette méthode vise en particulier à :

- améliorer l'efficacité et la pertinence de la stratégie de démantèlement ;
- faciliter la reproductibilité des chantiers ;
- aider à la modélisation et à la vérification du respect des exigences de sûreté ;
- automatiser la traçabilité des opérations et le déploiement de proche en proche puis l'adaptation des projets sur le terrain, souvent plusieurs années après leur spécification.

Compte tenu des facteurs de complexité de l'A&D et des arguments présentés plus haut, nous bâtissons cette méthode :

- en suivant des principes systémiques forts, structurants et globalisant (e.g. la notion même de système et de système de systèmes est une base pour percevoir les frontières de ce qu'est un projet d'A&D) ;
- en s'inspirant des concepts, des processus et de certains langages de modélisation utilisés en Ingénierie Système ;

- en reconsidérant les vues, les concepts et les langages de modélisation, promus eux aussi par la Modélisation d'Entreprise lorsque l'on considère un projet ou une organisation comme un système socio-technique ;
- en prenant en compte des pratiques et usages de la Gestion de Projet telle que pratiquée au sein du CEA.

Une méthode peut être définie et vue classiquement comme le montre la **Figure 9** : nous nous inspirons ici notamment de la structure de la Méthode SAGACE (CEA, 1999).

La méthode à concevoir est une somme de contributions cohérentes et structurées, qui se basent donc sur :

- un ensemble de concepts nécessaires aux acteurs pour décrire l'A&D, concepts que nous capitaliserons dans un modèle générique de l'A&D, fédérés entre eux par des relations ; un glossaire métier réunissant et unifiant leurs définitions, lorsque cela s'avère nécessaire et possible, sera proposé dans ces travaux de thèse.
- un ensemble de langages de modélisation, de simulation, d'analyse et de traitement de données, d'information et de connaissance ;
- une démarche opératoire de mise en œuvre de la méthode ;
- des outils pour supporter la méthode ; cette composante outil représentera de fait le livrable démonstratif de ces travaux, appliqué à un chantier pilote ;
- un Référentiel Méthode qui sera établi puis enrichi tout au long du projet de thèse puis lorsque la méthode sera mise en œuvre ; ce référentiel contient un ensemble d'éléments de connaissances métier considérés comme pertinents et utiles, et réutilisables et provenant de sources diverses (sources de données externes, projets passés, etc.) :
 - des données brutes mais à réutiliser comme par exemple les données de paramétrage d'un appareil ;
 - des informations, i.e. des données contextualisées pour faciliter ensuite leur interprétation, e.g. données de paramétrage pour un type d'environnement ;
 - des connaissances, i.e. des informations consolidées et pouvant faire l'objet de règles, e.g. règles de paramétrage d'un appareil dans un environnement fixé et compétences requises ;

Il s'agit donc de bases de données, de REX, de modèles de référence (e.g. modèles de processus, modèle d'INB générique, etc.) ; ils sont structurés et organisés de façon à être accessibles et mis à disposition des responsables projet tout au long de la démarche opératoire ; cette structuration est liée au vocabulaire des concepts établi plus haut, et fera à terme l'objet d'ontologies métier qui n'ont pas été traitées dans ces travaux.

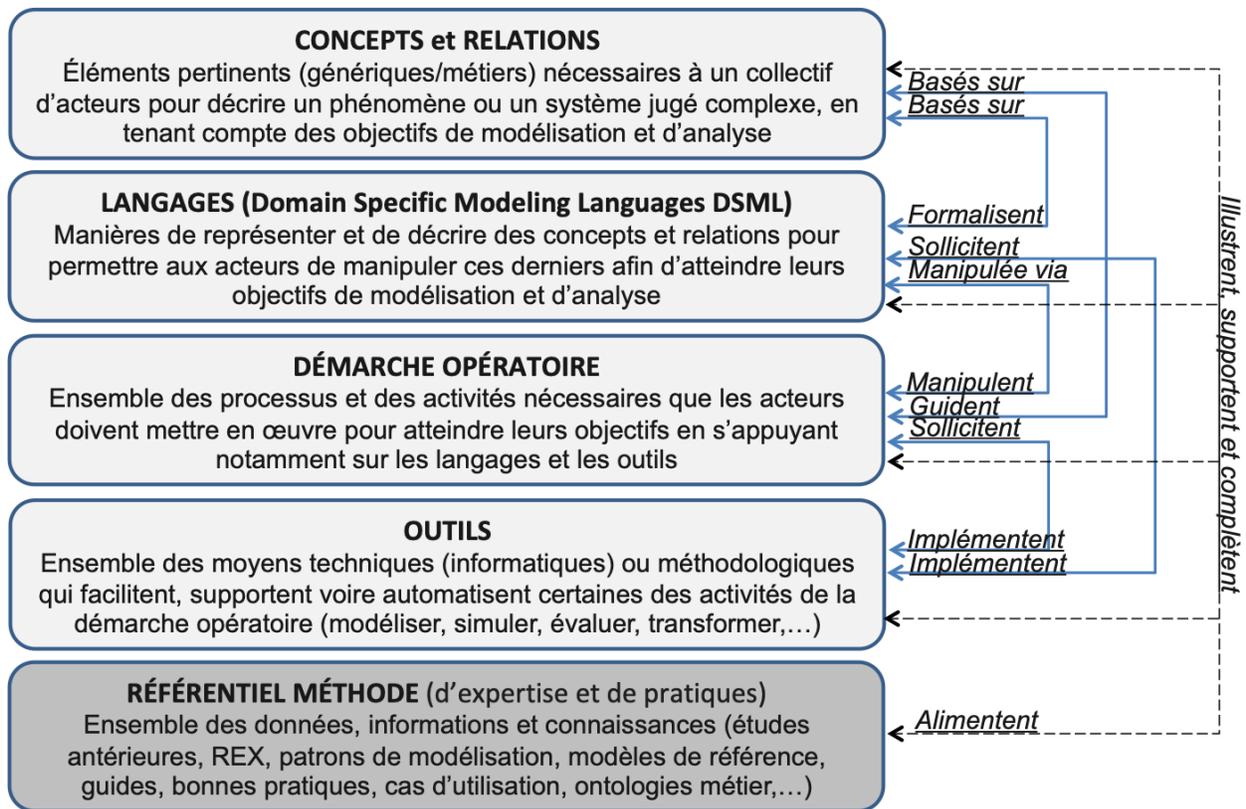


Figure 9 - Éléments d'une méthode

En synthèse, la méthode consiste d'abord à formaliser puis à modéliser la cible du démantèlement et l'environnement dans lequel il est réalisé, sous la forme de systèmes particuliers décrits dans le chapitre suivant, à spécifier l'ensemble des exigences à prendre en compte (e.g. : aspects techniques, opérationnels, logistiques, réglementaires, financiers, organisationnels, de sécurité et de sûreté, humains, éthiques, environnementaux), et à définir la stratégie et les moyens de gestion des déchets (e.g. stockage ou entreposage). Sur la base de ces modélisations, de ces choix et de ces exigences, et en s'inspirant des éléments de connaissance (théoriques comme expérimentaux) présents dans le référentiel, l'équipe projet devra être en mesure de structurer, de vérifier, puis de démontrer ensuite la cohérence et la faisabilité du projet du point de vue technologique et organisationnel. Les différentes alternatives des projets seront alors évaluées en fonction du niveau d'engagement à respecter les exigences, mais aussi et surtout des stratégies et des moyens choisis pour la gestion des produits du démantèlement. De fait, la méthode s'applique aussi bien à la conception de nouveaux projets, qu'à leur remise en cause et à leur pilotage par des moyens de modélisation et de réévaluation constante de la stratégie d'A&D, en prenant en compte l'évolution possible des besoins des parties prenantes (**Figure 10**).

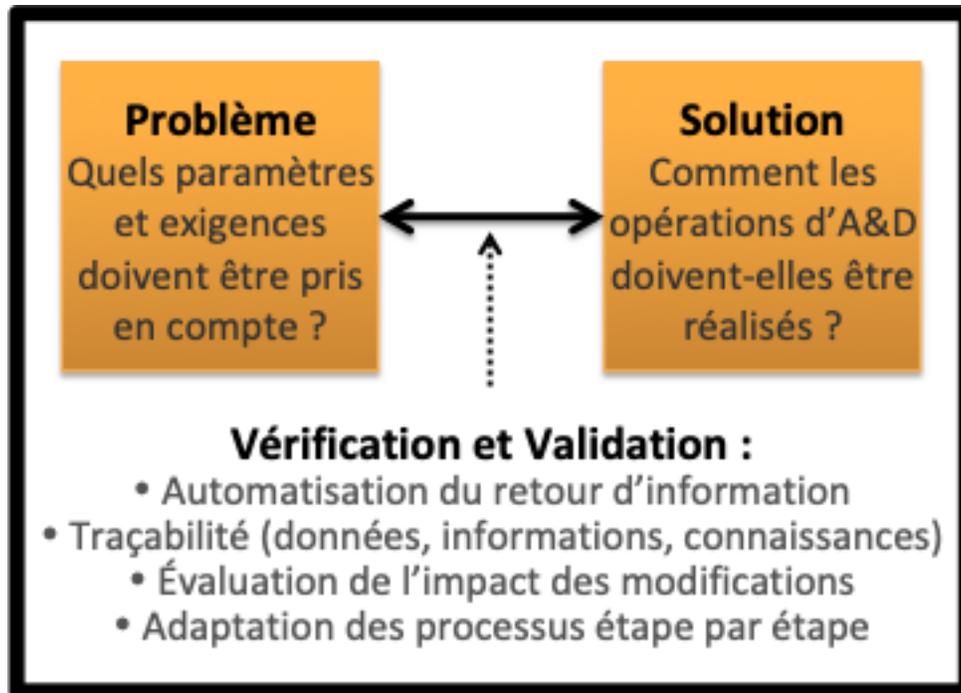


Figure 10 - Synthèse de ce que doit permettre la méthode élaborée

2.3.2 Les concepts

Rappelons qu'aujourd'hui, chaque projet d'A&D est considéré comme un cas spécifique, bien qu'il existe de nombreux points communs entre eux, et un partage possible de retours d'expérience et de standards. La méthode doit donc chercher dans un premier temps à capitaliser ces points communs, en proposant un ensemble de concepts applicables à l'A&D et en bâtissant le Référentiel Méthode.

Pour cela, des travaux de formalisation et de théorisation sont nécessaires pour structurer une méthode cohérente, exhaustive et reproductible dans une vision industrielle. Ces premiers travaux, conceptuels, ont fait émerger les concepts, la démarche opératoire et un panel potentiels de langages et d'outils de l'Ingénierie Système, plus particulièrement dans les domaines du Model Based Systems Engineering (MBSE), de la vérification et la validation (V&V) de modèles, et de la Modélisation d'Entreprise. En effet, nous partons de l'hypothèse que l'A&D sera vu comme un système socio-technique complexe, voire un système de systèmes (notion que nous détaillerons dans le Chapitre III).

En outre, certains des verrous sont déjà l'objet de travaux menés à bien au sein de l'équipe ISOE (Interoperable System and Organisation Engineering) du centre de recherche LGI2P de l'IMT Mines Alès, tels que l'interopérabilité et la fédération de modèles (Lô, 2013) (Cornu, 2013) (Billaud, 2015) (Nastov, 2016) (Lemazurier, 2018).

L'approche conceptuelle a donc été menée en tenant compte de diverses données d'entrées, et des besoins (attentes, contraintes, etc.) exprimés par les parties prenantes rencontrées durant

ces travaux car impliquées dans un projet de démantèlement et susceptibles d'être impactées de manière active ou passive par une décision. Elle a également pris en compte les données spécifiques à l'installation à démanteler et à son environnement, avec les différentes relations de dépendances et donc d'impact jugées utiles et pertinentes.

La méthode doit permettre de créer et de manipuler un ensemble de modèles liés à l'A&D, e.g. des modèles de processus synchronisant les opérations à effectuer, des référentiels d'exigences, des schémas décrivant l'installation à démanteler, sa durée de vie, son passé, ses configurations, etc.

À ce titre, la modélisation systémique en usage en Ingénierie Système et, de fait, plus particulièrement dans le MBSE, ont permis de construire une représentation formalisée d'un système d'A&D baptisé dans la suite SA&D, relatif à un projet de démantèlement. Un tel SA&D est défini comme « *un ensemble d'éléments de nature diverse et hétérogène qui interagissent pour déclasser une installation nucléaire* ».

Nous avons ensuite formalisé un modèle générique de ce SA&D, qui implémente un ensemble de concepts à travers des points de vue (ou vues) consistants et cohérents, qui doivent être considérés à la fois sur les aspects administratifs et techniques, dont par exemple :

- une vue fonctionnelle, pour modéliser entre autres les activités, tâches et leur organisation dans le projet ;
- une vue des ressources, pour modéliser les moyens techniques, outils et techniques, et leurs interactions au cours des opérations d'A&D, ainsi que les compétences et les savoir-faire particuliers à mettre en pratique ;
- une vue de la gestion des risques, pour modéliser les différents événements qui pourraient se produire et évaluer leur impact sur le projet, sur les ressources impliquées, etc. ;
- une vue de gestion des exigences, pour modéliser (décrire, allouer, justifier, etc.) et pouvoir ensuite vérifier l'ensemble des exigences du système d'A&D.

Tout d'abord, tous les concepts et relations nécessaires pour atteindre et détailler chacune de ces vues ont été rassemblés, puis décrits syntaxiquement et sémantiquement dans un méta-modèle (OMG, 2016) détaillé au Chapitre III. Ce méta-modèle reste ouvert et peut s'enrichir conceptuellement de nouveaux concepts par héritage. Il est donc adaptable en prenant en compte, par exemple, le type d'installation nucléaire. De plus, il permet de spécifier un ensemble de ressources ontologiques et doit assurer la gestion des connaissances croisées pour tous les acteurs de l'A&D. En d'autres termes, le vocabulaire unifié évoqué plus haut émerge de ce méta-modèle. Enfin, l'approche conceptuelle ne s'arrête pas au SA&D, elle s'intéresse également à tous les autres systèmes concernés ou à l'interface de ceux concernés par l'A&D.

Il est intéressant de noter que dans le méta-modèle proposé, des mécanismes de sémantique opérationnelle permettront ensuite d'exécuter tout ou partie des modèles élaborés, autorisant

de fait la simulation et la preuve à des fins de vérification, d'évaluation mais aussi de validation partielle des projets.

2.3.3 Les langages de modélisation

Les langages de modélisation métier utilisés, désignés par Domain Specific Modeling Languages (DSML) dans la suite, sont ensuite définis pour répondre aux besoins de manipulation des concepts de chaque point de vue afin de créer ou modifier des modèles, les exécuter si nécessaire et procéder à différents types d'analyse en vue de la vérification et de la validation des modèles obtenus.

Ces modèles sont aussi utilisés pour « imager » la compréhension ou un point particulier d'un système à des fins de communication avec d'autres acteurs. Ces DSML doivent donc être adaptés et compréhensibles par des experts provenant de divers domaines d'activité et qui ne sont pas nécessairement familiers avec le domaine de la modélisation.

Dans un premier temps, les concepts et les relations entre les concepts qui sont pertinents dans chaque point de vue, sont organisés afin de représenter la syntaxe abstraite de chaque DSML. Dans un deuxième temps, la syntaxe concrète de ces DSML doit être définie, c'est à dire une ou plusieurs façons alternatives de représenter concrètement les concepts et les relations présents dans la syntaxe abstraite. Cette syntaxe concrète n'est donc pas nécessairement unique pour une même syntaxe abstraite, elle permettra de s'adapter aux habitudes des modélisateurs. Elle peut ensuite être graphique ou textuelle et s'exprimer donc sous forme de tableau, diagramme, image, texte, etc.

Ensuite, la syntaxe abstraite et la syntaxe concrète nous amènent à définir des règles de modélisation, c'est-à-dire des règles de construction de modèles, de manière à s'assurer de leur conformité sémantique et non plus seulement syntaxique avec le méta-modèle.

Enfin, la sémantique opérationnelle de certains DSML doit être précisée. Cette sémantique opérationnelle exprime comment évolue le modèle dans le temps sous l'effet d'intrants et pour fournir des extrants vers d'autres modèles. Par exemple, une sémantique opérationnelle peut se formaliser sous forme de règles d'activation ou de désactivation d'étapes pour un DSML de type GRAFCET, ou sous forme de règles de marquage / démarquage de place et de franchissement de transition quand il s'agit d'un DSML de type Réseaux de Petri, comme l'illustre la **Figure 11**.

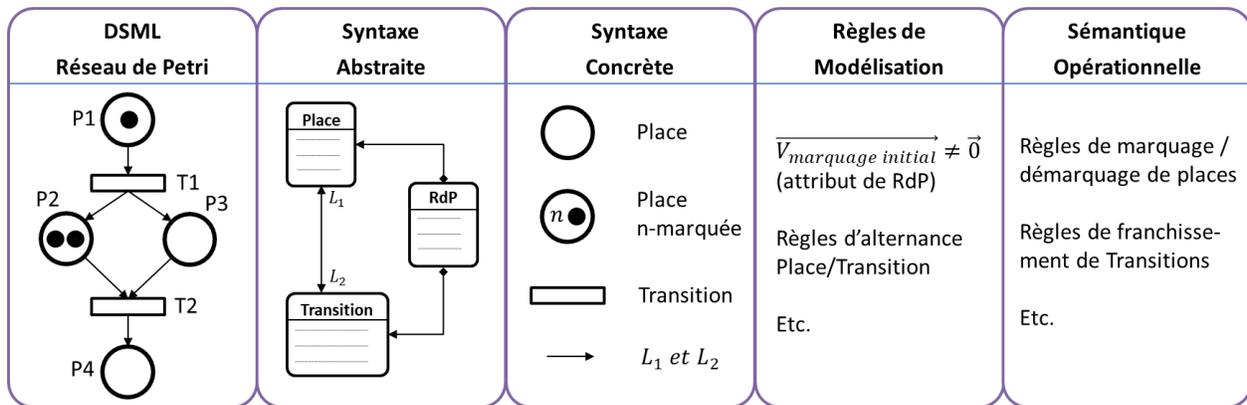


Figure 11 - Exemple de syntaxes abstraite et concrète, de règles de modélisation et sémantique opérationnelle pour un DSML Réseaux de Petri

Il est donc important de définir une sémantique opérationnelle pour les DSML participant essentiellement à la vue comportementale et à la vue fonctionnelle du système. L'exécution du modèle à des fins de simulation et la preuve de propriétés de modélisation deviennent alors possibles (Nastov, 2016), offrant la possibilité aux modélisateurs de vérifier et de valider leurs modèles séparément les uns des autres, puis de fédérer et d'exécuter ces modèles simultanément afin de simuler des comportements plus complexes, en gagnant de fait en réalisme.

Nous nous sommes inspirés de DSML existants pour proposer une palette de DSML plutôt dédiés aux objectifs de la méthode. SysML (OMG, 2019) propose par exemple plusieurs langages, chacun adapté à un type de vue et d'objectif de modélisation. Les DSML proposés par Vitech (Vitech Corp., 2017) ont également été étudiés tels que eFFBD (enhanced Functional Flows Block Diagram) ou encore PBD (Physical Block Diagram) respectivement pour la description des vues fonctionnelle et organique. Enfin, un certain nombre d'outils et de méthodes ont pu être utiles pour spécifier des DSML, tels que le BPMN (OMG, 2014) évoqué plus haut, le Guide d'Étude des Modes Opérationnels des Systèmes (GEMOS) (Chapurlat, et al., 2013) qui concerne les modes opérationnels, ou encore les BoilerPlates ((Lemazurier, 2018), voir notamment pages 35 à 37) pour l'ingénierie des exigences.

Le choix des langages dépendra donc fortement des objectifs de modélisation, des usages prévus et des règles métier imposées par les besoins de chaque métier concerné.

2.3.4 La démarche opératoire

La démarche opératoire doit guider les acteurs et faciliter les diverses étapes de modélisation, de simulations, d'analyse, d'évaluation, de vérification et de validation potentiellement complexes, que requiert la spécification puis le pilotage de projets d'A&D. Nous parlerons respectivement de « *Design Time* » lors de la spécification, puis de « *Run Time* » lors du pilotage : ces deux notions seront précisées au Chapitre III. La démarche opératoire doit

également permettre d'établir et de garantir la traçabilité et l'interopérabilité des nombreux éléments qu'ils contiennent.

La démarche opératoire est ainsi dépendante :

- de l'adoption d'une vision systémique et holistique de chaque projet, et l'adoption d'une démarche de modélisation basée sur les multiples points de vue. Cela améliore la prise en compte globale des paramètres intervenant dans un projet d'A&D, d'un côté en facilitant la compréhension de l'état initial et la traçabilité des données d'entrée, et de l'autre en précisant en amont une spécification de l'état final visé, de la description de tous les paramètres, des besoins des parties prenantes, ainsi que de tous les processus et interfaces impliqués dans le projet au cours des différentes étapes de son cycle de vie ;
- des besoins nécessaires pour dé-risquer ensuite les prises de décision, en donnant une vision plus large de la gestion stratégique des projets, en particulier de l'ensemble des exigences applicables aux projets d'A&D ;
- de guides de modélisation ou encore des bonnes pratiques, baptisés dans la suite patrons de modélisation (ou Design patterns), pour assister et faciliter le travail de modélisation mais aussi de vérification des modèles de chaque acteur, à la fois en cours de conception de futurs projets en phase de Design-Time, et de pilotage en phase d'exploitation de projets ou Run-Time. Les patrons sont des éléments cruciaux du référentiel méthode qui sera partagé entre les acteurs de l'A&D utilisant la méthode. Cela passe par le partage et par la mise à disposition aux parties prenantes (selon des critères d'accessibilité pour la sécurisation) de toutes les données, informations et connaissances, en utilisant par exemple des technologies telles que le BIM. Cette nécessité de réutilisation cohérente et de collaboration inter-métier nous pousse de fait à proposer un référentiel méthode unifié pour simplifier l'ajout, la modification et l'usage à bon escient des données, des informations et des connaissances qui sont contenues.
- de la dimension évolutive d'un projet de démantèlement, en tenant compte des situations fortuites, qui sont inévitables, et accidentelles. Les modèles doivent donc pouvoir être mis à jour régulièrement pendant un projet, afin qu'ils restent aussi fiables et conformes à la réalité que possible. Il est donc important que la démarche contienne certains processus permettant de guider chaque acteur impliqué dans un projet pour modéliser des parties d'un système d'A&D spécifique (et par conséquent son installation associée, entre autres, comme détaillé dans le chapitre suivant), puis de vérifier et valider des scénarios, par exemple par des simulations. Les chefs de projet pourront alors modéliser les systèmes d'A&D et partager leurs modèles tout au long du projet.

Afin de formaliser cette démarche opératoire, nous nous sommes inspirés principalement du standard MOF, mais également dans une moindre mesure de frameworks de modélisation d'entreprise, présentés plus haut.

Pour conclure, la démarche de modélisation des projets sera donc basée sur des mécanismes d'instanciation du méta-modèle, puis d'enrichissement spécifique pour chaque projet concerné (Figure 12).

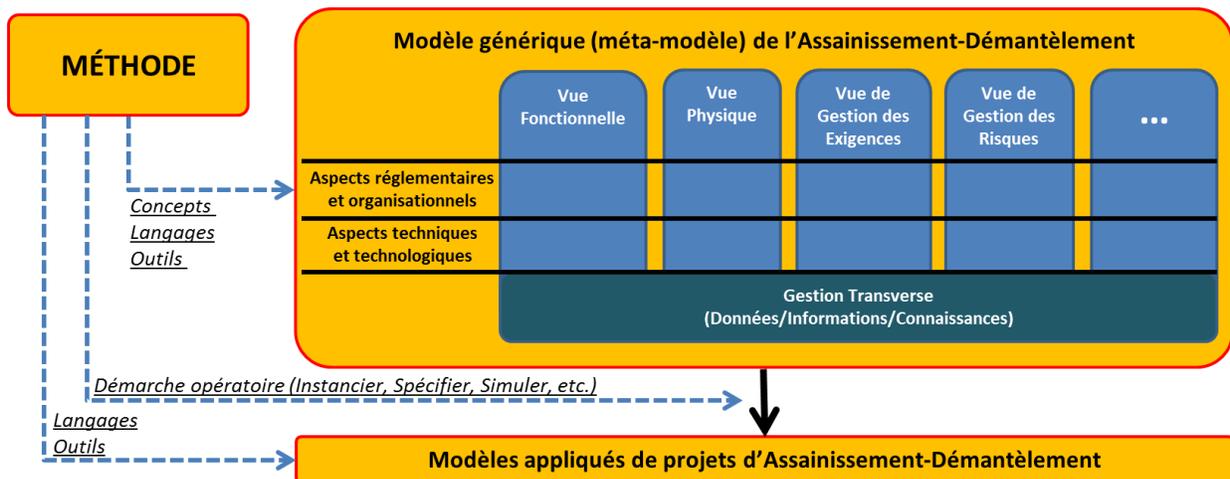


Figure 12 - Finalité de la démarche opératoire : passer d'un méta-modèle de l'A&D à des modèles concrets et fédérés de tous les projets

2.3.5 Les outils

Les outils sont importants pour mettre en pratique une méthode. Comme vu plus haut, les verrous techniques sont multiples (interopérabilité, accessibilité, sécurisation, etc.).

Aujourd'hui, les parties prenantes de l'A&D se basent sur des outils informatiques pour réaliser leurs modèles, selon des points de vue propres aux métiers qu'elles exercent (déchets, configuration, coûts, etc.). Les nombreuses approches évoquées et dont la méthode s'inspire pour modéliser le SA&D disposent quelque fois d'un outillage support. À titre d'exemple, la méthode SAGACE (CEA, 1999), développée au CEA dans les années 90, insistait sur la nécessité de pouvoir proposer une démarche itérative. Malheureusement cette méthode, qui pourtant offre une matrice d'abstraction systémique intéressante, manque aujourd'hui d'outils support. Nous visons donc ici le développement d'un outil logiciel de type progiciel qui doit respecter l'une des contraintes suivantes pour être utilisé et partagé :

- soit être interopérable avec les outils existants (en réalisant des mécanismes de transformations de modèles (Nastov, 2016) par exemple pour passer des points de vue métier aux points de vue du progiciel et réciproquement) ;
- soit se substituant aux outils existants, mais nécessitant de fait une adaptation de l'ensemble des parties prenantes à son utilisation.

En raison de la complexité des systèmes mis en jeu dans l'A&D, notamment en lien avec la taille de son entreprise étendue (nombreuses parties prenantes), et de l'évolution du contexte du projet (changement des ressources, apparition de nouvelles technologies, de nouveaux partenaires potentiels, ...), nous avons choisi de nous concentrer sur un progiciel répondant à l'hypothèse d'interopérabilité avec l'existant. Ce progiciel manipule donc ce que nous considérons être la Maquette Numérique du SA&D. Une Maquette Numérique permet en effet de représenter un système d'intérêt lorsqu'il est plongé dans son environnement opérationnel et mis en interaction avec d'autres systèmes tapissant son environnement (Chapurlat, et al., 2018). Cette définition revisite la définition classique de Maquette Numérique qui se limite encore souvent dans l'esprit et les usages des ingénieurs à un modèle 3D géométrique, par exemple le BIM. Néanmoins, le BIM, régulièrement mis en avant ces dernières années dans le secteur nucléaire et spécifiquement de plus en plus dans l'A&D, et vu aujourd'hui comme un moyen pour la conception du futur, ne couvre pas les besoins des parties prenantes en ne permettant pas nécessairement de croiser les vues systèmes que nous proposons.

Une Maquette Numérique a pour objectifs de :

- représenter le plus fidèlement possible un système d'intérêt, sous plusieurs points de vue et selon plusieurs paradigmes de modélisation dans le cadre d'une approche MBSE ; une représentation géométrique 3D associée à des informations diverses (chimiques, radiologiques, etc.) de type BIM alimente donc cette Maquette Numérique ;
- vérifier et valider les résultats des étapes de modélisation i.e. de convaincre et d'obtenir en retour les avis et reformulations des besoins de toutes les parties prenantes au fur et à mesure de l'avancée de la conception ;
- détecter au plus tôt des erreurs, omissions ou risques mal maîtrisés ;
- évaluer le système sous différents points de vue afin de justifier les décisions prises en ingénierie avant de les appliquer dans la réalité ;
- réduire l'ensemble des tests et essais à mener à bien sur le système d'intérêt lorsqu'il sera mis en production puis en exploitation ;
- faire une passerelle vers le Jumeau Numérique (Chapurlat, et al., 2018) qui consiste en une copie dynamique de cette maquette lorsque le système (e.g. SA&D) passe en exploitation, à des fins de pilotage et d'exploitation opérationnelle du système d'intérêt (e.g. installation nucléaire).

Une Maquette Numérique regroupe donc toutes les données, informations et connaissances (dont des modèles) qui sont nécessaires pour améliorer la compréhension, faciliter la modélisation, l'évaluation, la vérification, la validation et la prise de décision des ingénieurs et des parties prenantes chargées de la conception du système d'intérêt.

Cette maquette Numérique :

- repose sur des opérations d'acquisition, de composition et de fédération de DIC (dont, rappelons-le, des modèles) hétérogènes et provenant de sources distantes, non nécessairement interopérables (sémantiquement comme techniquement) ; ces DIC concernent : le système d'intérêt lui-même, son environnement, les différents usages et valeurs des parties prenantes et de chacun des systèmes à l'interface avec le système d'intérêt, des données issues de capteurs ou de systèmes d'observation en place (ex : données météo, ...), etc. ;
- intègre nécessairement des mécanismes et des ressources pour pouvoir faciliter les étapes d'acquisition de DIC externes, les activités de modélisation, et les activités d'évaluation, simulation, vérification et validation.

Les travaux présentés dans ce manuscrit cherchent donc à identifier, développer, et fournir un logiciel démonstrateur préfigurant le progiciel support et à valider *in situ* – par un cas d'application sur un chantier pilote – la méthode pour décrire, analyser et aider au pilotage des projets d'A&D. Afin de progresser efficacement vers l'application de cette méthode, cet outil démonstrateur doit inclure le développement de fonctionnalités de modélisation et d'analyse qui pourront ensuite être intégrées autour d'une base de données unique et interopérable préfigurant à son tour le référentiel méthode, fonctionnant avec les systèmes d'information des entreprises parties prenantes impliquées dans chacun des projets.

Ainsi, reprenant les objectifs visés pour la méthode présentée en **Figure 13**, le progiciel visé par cette thèse est décrit ci-dessous.

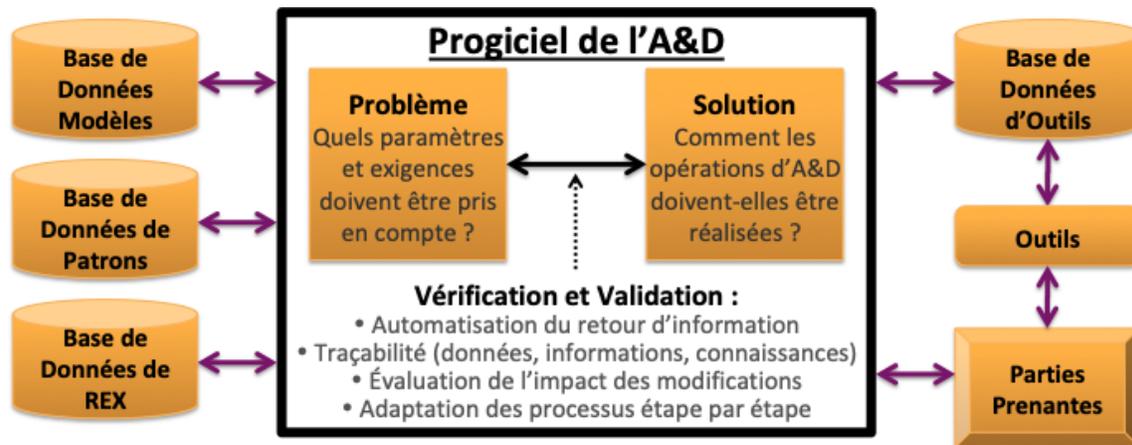


Figure 13 - Perspective industrielle en matière d'outil

2.3.6 Complément : une méthode qui devra prendre en compte deux concepts essentiels pour répondre aux problématiques

Nous verrons que cette thèse s'est enfin particulièrement concentrée sur deux concepts : la notion de « workflow adaptatif » (Barthe-Delanoë, et al., 2018) pour la gestion des opérations

en phase d'exploitation des projets (planification avancée puis contrôle dynamique) et la notion de « système de systèmes » (Maier, 1998) (Billaud, 2015) pour formaliser le système d'A&D. Nous verrons en quoi la méthode proposée se concentrera sur ces deux concepts pour répondre aux verrous et aux deux problématiques générales identifiées en début de Chapitre I.

2.4 Contributions proposées de ces travaux

En guise de conclusion, le **Tableau VI** dresse une synthèse des contributions proposées grâce à l'élaboration du livrable de thèse : la méthode outillée. Elles représentent les frontières idéales souhaitées de la thèse. Nous verrons dans la suite leur mise en œuvre, ainsi que les difficultés rencontrées et l'évolution de ces frontières lors de leur mise en œuvre.

Verrou	Contribution proposée de la thèse
Conceptuel : Vision partagée entre les parties prenantes des modalités de l'A&D (périmètre, finalité, missions, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des points sensibles pouvant soulever des risques d'interprétation, rencontres et analyse de l'existant et des retours d'expériences passés • Proposition de définition du périmètre, de la finalité, des missions, etc. de l'A&D
Conceptuel : Ontologie métier de l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Formalisation des termes communs de l'A&D • Proposition de concepts, attributs, et relations pour traduire cette formalisation
Conceptuel : Modèle générique, permettant de gérer l'effet de série de l'A&D, et spécifiant formellement les métadonnées importantes pour l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Étude de la généricité des éléments des projets d'A&D : éléments structurants génériques, éléments reproductibles, éléments spécifiques • Proposition d'un méta-modèle unique • Proposition des principes des patrons de modélisation
Méthodologique : Consolidation des règles de conception de l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche opératoire (modélisation, V&V, évaluation, analyse) pour assister la décision des responsables projets, réduire les erreurs, ou omissions, et mieux maîtriser des écarts en cours de projet • Réalisation de tests sur un chantier pilote, visant à montrer l'efficacité de la démarche de modélisation au regard de ces objectifs • Proposition de règles de modélisation basées sur des patrons

Verrou	Contribution proposée de la thèse
<p>Méthodologique : Référentiel unique et partagé d'exigences SMART</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Centralisation des exigences à chaque niveau (projet, programme, etc.) • Prise en compte dans le méta-modèle de la traçabilité des exigences, mais aussi des données, des informations et des connaissances qui y sont relatives
<p>Méthodologique : Consolidation des règles de conception de l'A&D</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche itérative favorisant le raffinement des besoins et des contraintes en exigences SMART
<p>Méthodologique : Capacité à prévoir à l'avance et adapter rapidement les scénarios d'A&D en suivant et traçant les évolutions</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte dans le méta-modèle des besoins en termes de conception, d'évaluation et de traçabilité des alternatives de projets-solutions • Proposition d'une démarche d'adaptation des processus, activités, tâches et opérations du projet en suivant les principes des workflows adaptatifs
<p>Méthodologique : Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte dans le méta-modèle du besoin global de traçabilité • Proposition d'une démarche de modélisation intégrant les aspects transversaux aux projets et réciproquement guidant les décideurs de l'A&D dans leurs choix stratégiques et tactiques pour la gestion des programmes d'A&D et la gestion des déchets • Proposition d'un outil global unique favorisant son insertion et son interopérabilité avec les outils et les systèmes d'information existant chez les partenaires, avec des mécanismes de notification, d'alerte, et de traçabilité des modifications • Proposition d'une démarche agile favorisant la validation commune des exigences en fin de conception de chaque élément • Réalisation de tests considérant plusieurs rôles de modélisation (architecte système à différents niveaux, experts de différents métiers, etc.)
<p>Technique : Outils interopérables et fichiers d'échanges conformes et compatibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un méta-modèle de concepts et de points de vue fédérés, qui permet plus facilement d'y associer ensuite les différents outils des systèmes d'information de l'entreprise étendue

Verrou	Contribution proposée de la thèse
<p>Technique : Garantie de la fiabilité des données d'entrée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un méta-modèle de concepts et de points de vue fédérés, permettant plus aisément d'identifier les métadonnées importantes à collecter puis d'y indexer des données brutes • Proposition d'une traçabilité entre les éléments permettant ici aussi de faciliter la détection d'éventuelles contradictions dans les données
<p>Économique : Conciliation des intérêts industriels et de la propriété intellectuelle des parties prenantes dans des démarches collaboratives</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche facilitant la prise en compte des exigences de toutes les parties prenantes
<p>FOH : Accompagnement au changement pour catalyser les évolutions de pratiques et d'habitudes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'aller vers une plateforme de services pour l'A&D (modélisation, V&V, évaluation, gestion de workflows adaptatifs, etc.) et non vers des outils distincts • Souplesse du méta-modèle, intégrant des éléments favorisant sa pérennité, sa modularité • Proposition de langages de modélisation ergonomiques, et la non-substitution de l'utilisateur par des outils au niveau décisionnel • Réalisation de démonstrations appliquées à un cas test

Tableau VI - Contributions proposées des travaux de thèse

Chapitre III : Contribution théorique

3.1 Introduction

La première contribution de la thèse vise à fournir les bases conceptuelles de la méthode proposée. Il s'agit donc ici de présenter les concepts et les relations que ces derniers entretiennent pour formaliser les projets d'A&D. L'objectif est d'aller vers une méthode basée sur des modèles pour concevoir puis piloter ces projets.

Ce chapitre présentera donc dans un premier temps les travaux réalisés pour aller vers cette conceptualisation de l'A&D, puis le passage de cette conceptualisation à une formalisation opérationnelle de la modélisation au service des projets d'A&D (**Figure 14**). Une synthèse des premiers verrous levés conclura ce chapitre.

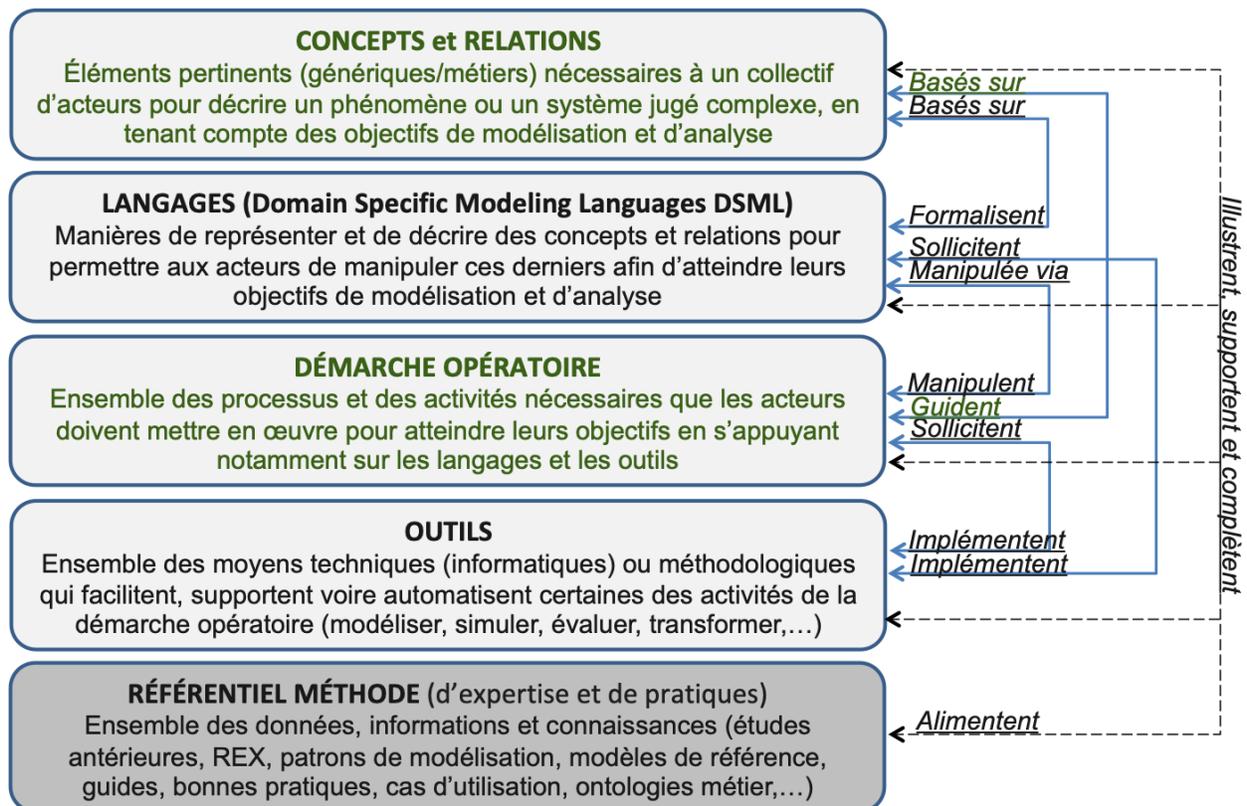


Figure 14 - Les contributions présentées en Chapitre III se concentreront sur les concepts et la démarche opératoire de la méthode

3.2 Les éléments conceptuels de la méthode

Avant de préciser les concepts et relations intéressant l'A&D, il est important d'identifier les systèmes mis en jeu dans les projets d'A&D, puis de se poser pour chacun d'entre eux un ensemble de questions qui vont être globales et structurantes :

- de quoi s'agit-il ? → description préliminaire des systèmes ;
- pourquoi étudier ces systèmes ? → finalité (ce pourquoi ils existent), missions (ce qu'ils réalisent), et objectifs (performances attendues, sûreté, sécurité, etc.) ;
- avec quoi interagissent-ils, dans quels contextes, et quels sont leur intrants / extrants ? → systèmes contributeurs, frontières, environnement, etc. ;
- qui est concerné, impacté ou impliqué par ou dans leur fonctionnement ? → parties prenantes dont acteurs métiers ;
- qu'est ce qui caractérise temporellement ces systèmes ? → cycle de vie : phases, jalons, etc. ;
- dans quels cas ou scénarios d'utilisation ces systèmes doivent-ils opérer ? → périmètre et types d'installations, etc. ;
- à quels besoins répondent-ils dans ce cas ? → état initial, état final visé, etc. ;
- quels sont alors leur comportement et leur évolution ? → configurations, modes, états intermédiaires possibles, etc. ;
- quels produits particuliers ces systèmes génèrent-ils en extrants ? → installations après déclassement, déchets, REX ;
- quels sont les indicateurs clés qui doivent de fait être suivis et optimisés ? → indicateurs de performance pertinents et variables, de sûreté et de sécurité : activité, dose, TSM, etc. ;
- quelles sont les contraintes essentielles auxquelles ils doivent répondre dans les situations prévues ? → règles applicables, certifications, etc. ;
- de quoi sont-ils constitués et comment opèrent-ils ? → architectures fonctionnelle, puis physique ;
- comment assurer leur maintien en conditions opérationnelles ? → éléments du soutien logistique intégré (SLI), par exemple le SENEX (Surveillance, ENTretien, EXploitation) ;
- comment assurer leur propre fin de vie et retrait de service ?
- etc.

Comme annoncé en préambule de ces travaux, nous employons une démarche d'abstraction dans un premier temps, puis de formalisation ensuite, pour formuler les réponses à ces questions. Nous progressons en suivant les principes systémiques et ceux, plus pragmatiques sans doute, tirés du vocabulaire et des processus de l'Ingénierie Système, de la Modélisation d'Entreprise et de la Gestion de projets. Nous procédons de cette manière pour arriver aussi à séparer ce qui relève du domaine générique (permettant d'identifier formellement des concepts

communs et structurant) de ce qui relève d'un niveau de détail ou de précision nécessaire pour un projet donné (permettant de mettre en pratique ces concepts, leurs caractéristiques propres et leurs interrelations).

Nous avons cependant choisi de limiter fortement ces études au cadre organisationnel et réglementaire français. Cette restriction reste cependant mineure selon nous : nous verrons que les concepts et les relations qui seront fédérés dans le méta-modèle par la suite restent ouverts et peuvent s'appliquer à des cadres organisationnels et réglementaires différents.

3.2.1 Les systèmes en jeu

L'**installation nucléaire** est la cible d'un projet d'A&D (**Figure 15**). Elle sera donc vue dans la suite comme le système d'intérêt (Sol, de l'anglais *System of Interest*) d'un projet d'A&D, c'est-à-dire le « *system whose life cycle is under consideration [...]* » (ISO, IEC, IEEE, 2015).

Le **Système d'Assainissement et de Démantèlement (SA&D)**, qui représente chaque projet, est quant à lui le Sol de la méthode que propose cette thèse.

Enfin, nous définissons l'**Environnement** comme un système regroupant le SA&D et l'INB, mais aussi et surtout d'autres systèmes interagissant avec l'un ou l'autre, quelquefois avec le rôle de système contributeur e.g. un système de SLI.

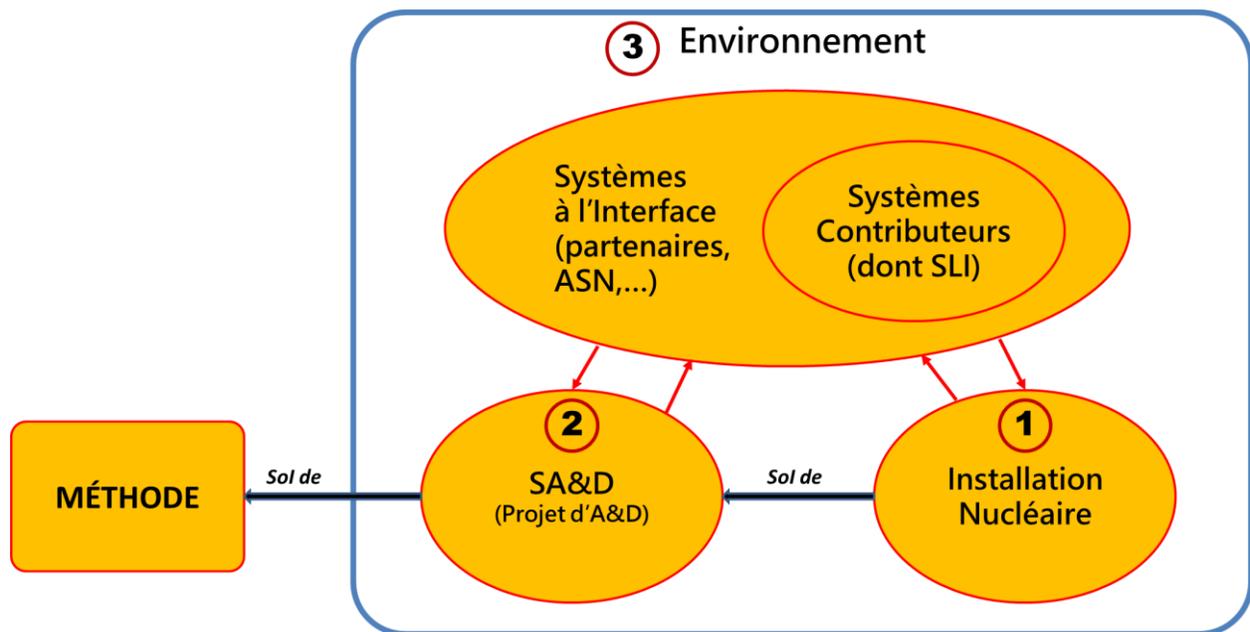


Figure 15 - Les 3 systèmes principaux ciblés par l'application de l'IS à l'A&D

3.2.2 La cible : une installation nucléaire

Un projet d'A&D se focalise généralement sur une ou plusieurs installations nucléaires, au sens de la définition initialement donnée en Europe en 1960 par l'OCDE-AEEN (aujourd'hui OCDE-

AEN) à la Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire¹¹ (amendée en 1964 puis 1982).

En France, les projets d'A&D se concentrent généralement sur des INB, qui représentent la majorité des installations nucléaires françaises. La différence entre une Installation Individuelle d'INBS et une INB tient essentiellement au fait que l'installation a eu des activités confidentielles ou non. Cela implique quelques variations au niveau pratique sur les aspects de réglementation (les premiers ayant pour autorité l'ASND, les seconds l'ASN, et donc des procédures différentes) et les aspects de gestion (organisations au sein des entreprises, notamment en matière de confidentialité des données, informations, et connaissances), mais pas au niveau conceptuel. Nous avons donc fait l'hypothèse que la méthode conçue par ces travaux de thèse, appliquée aux INB, pourra donc également être appliquée aux INBS avec peu de modifications.

De la même façon, considérer une ICPE nucléaire signifie seulement que le niveau des risques de sûreté nucléaire liés aux types et aux quantités de matières radioactives manipulées est réduit par rapport aux INB, de sorte que le projet de démantèlement sera soumis à moins de contraintes, émises également par d'autres autorités, les DREAL. Il est de fait intéressant de noter que, bien que cela n'ait pas été mené au cours des travaux de thèse, une analyse des différences entre INB et ICPE pourrait ensuite être proposée afin de déterminer dans quelle mesure il pourrait être intéressant de simplifier les éléments de la méthode pour l'appliquer de manière optimisée à une ICPE.

Il existe ensuite d'autres systèmes cibles pouvant représenter plusieurs enjeux pour un projet d'A&D, que la définition donnée par l'OCDE-AEN ne met pourtant pas en exergue :

- Il s'agit d'abord de l'ensemble des éléments mobiles intégrant des sources radioactives artificielles, comme par exemple les Porte-Avions Nucléaires (PAN) ou les Sous-marins Nucléaires Lanceurs d'Engins (SNLE). De tels éléments ne seront pas spécifiquement considérés. Ils peuvent en effet être apparentés à des équipements qui pourraient se situer dans les INB, mais évoluant dans des modes opérationnels (ou de fonctionnement) et selon des scénarios opérationnels plus variés et plus contraints.
- Il s'agit ensuite des sites historiques, quelques fois très anciens (souvent première moitié du XXe siècle). La présentation de Fabien Hubert (ANDRA) à DEM 2018 (Hubert, 2018) décrit bien ces sites, souvent liés à la contamination par les produits du radium en raison de son utilisation disparate (y compris dans les produits du quotidien), à une époque où les risques liés aux matières radioactives étaient mal appréciés. Le manque de traçabilité et de documentation relatives à ces sites historiques rend leur décontamination et/ou démantèlement très complexe(s), comme le précise l'auteur. Parfois, il s'agit de sites isolés pouvant être proches de nombreux sites non nucléaires (exemple appartement contaminé en centre-ville), et les provisions disponibles pour ces sites sont faibles, de

¹¹ https://www.oecd-nea.org/law/nlparis_conv.html ; Dernière visite : 31/07/19

l'ordre de 2,5 M€ par an en France. De plus, leur réhabilitation est un des pires exemples en matière d'écarts d'estimations de budget. Néanmoins, leurs caractéristiques propres ne suffisent pas à conceptuellement les différencier des INB, qui peuvent, elles-mêmes, être situées dans des environnements fortement contraints (par exemple en plein cœur d'une ville comme Grenoble). Dans tous les cas, des écarts entre ce qui est conçu et prévu, et ce qui est réalisé, sont donc généralement de mise. De fait, nous ne nous sommes pas concentrés sur ces sites historiques, dont des travaux en perspective pourraient, tout comme pour les ICPE, être menés afin d'adapter la méthode proposée.

3.2.2.1 Finalité, missions et objectifs d'une installation nucléaire

Chaque INB a sa propre classification basée sur son type (par exemple, réacteur nucléaire ou installation de stockage de déchets radioactifs) et sur sa catégorie, indiquant le niveau de risques qu'elle présente. Ces deux caractéristiques sont définies par l'ASN dans sa décision (ASN, 2015). De fait, étudier de manière générale la finalité d'une installation nucléaire n'est pas possible, car celle-ci peut différer très fortement d'une installation à l'autre. Dans cette finalité, chaque installation nucléaire remplit ensuite, *a minima*, deux missions : une mission propre e.g. produire de l'électricité à vocation commerciale ou encore enrichir de l'uranium, et une mission de confinement des matières radioactives. Cette dernière se décompose en fonctions de confinement statique et dynamique.

Enfin, en-dehors de plusieurs objectifs de sûreté, de sécurité et de nature environnementale, généralisable à l'ensemble des INB françaises par le biais des diverses réglementations imposées par l'ASN notamment, tous les autres objectifs, notamment de performance, vont varier d'une installation à l'autre, en fonction de sa finalité et de ses missions.

3.2.2.2 Le cycle de vie d'une installation nucléaire

Comme tout système industriel, une installation nucléaire possède un cycle de vie. (Collectif AFIS, 2012) propose par exemple un cycle de vie abstrait, composé de phases types séparées par des jalons génériques (**Figure 16**). Un cycle de vie propre à l'INB, et valable pour chaque installation nucléaire, doit cependant prendre en compte le caractère unique de chaque INB. Par exemple, des réacteurs, bien que produits en série ou conçus en même temps, peuvent comporter des spécificités les différenciant finalement au niveau des interfaces. Enfin, notre étude se concentrant sur l'A&D, les premières phases dites de conception et de construction sont agrégées et le terme « Déconstruction » a été retenu en accord avec le lexique de l'ASN.

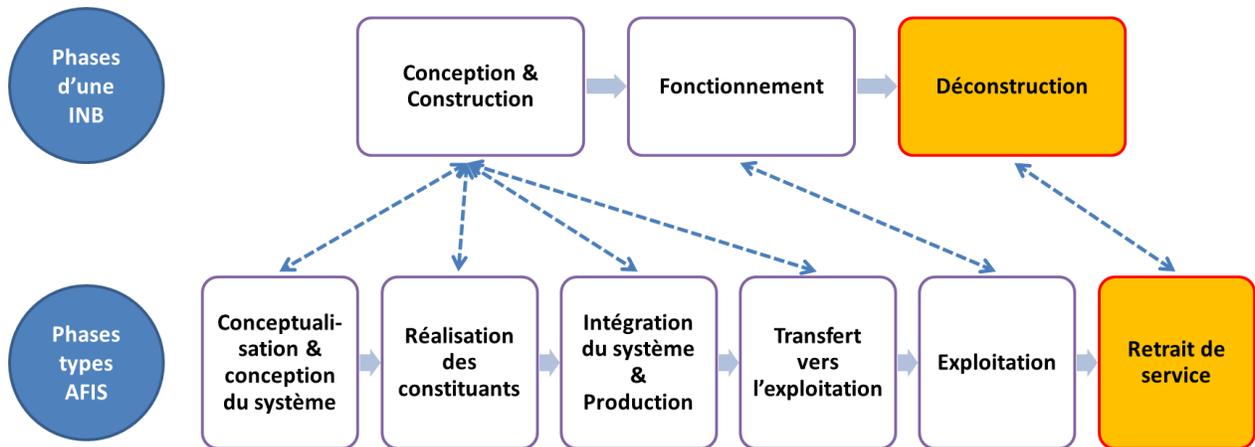
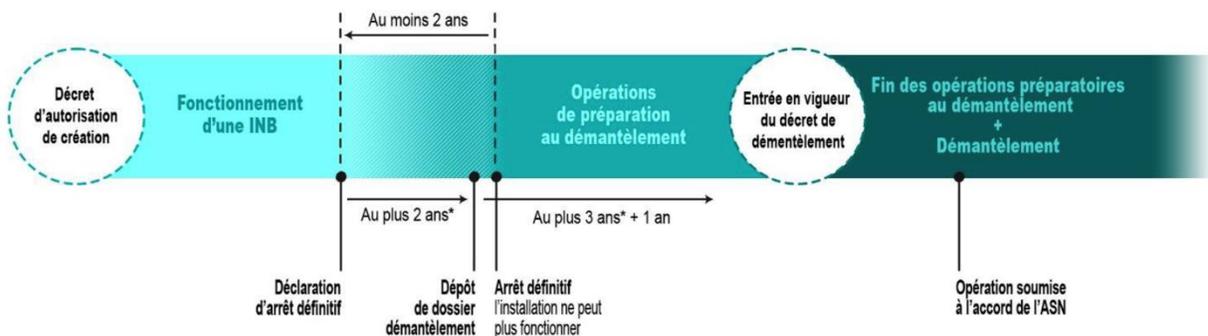


Figure 16 - Proposition de phases d'une installation nucléaire versus phases types d'un système selon (Collectif AFIS, 2012)

Entre chaque phase apparaissent des jalons, i.e. des décisions argumentées mais irrévocables dans le sens où, une fois le jalon franchi, la phase amont est terminée pour laisser place à la phase aval sans possibilité de retour en arrière. La définition des jalons est souvent problématique, car ce cycle de vie simpliste en trois phases n'est pas si aisé à généraliser. En effet, si un jalon générique peut être placé en début de ce cycle de vie et un jalon de mise en service peut être placé avant le fonctionnement de cette installation, la genericité du jalon entre le fonctionnement et la déconstruction de l'INB reste difficile à assurer. En France, le cadre réglementaire imposé par l'ASN implique plusieurs jalons pour une INB, importants dans le cadre de son A&D : la déclaration d'arrêt définitif, le dépôt du dossier de démantèlement, l'arrêt définitif, l'entrée en vigueur du décret de démantèlement, puis des éventuelles autorisations ponctuelles pour des opérations (Figure 17).

Phase de la vie d'une INB



* sauf cas particuliers

Figure 17 - Phases de vie d'une INB (figure tirée du guide n°6 de l'ASN (ASN, 2016a))

La déclaration d'arrêt définitif, ainsi que le dépôt du dossier de démantèlement qui décrit les modalités de l'A&D, seront considérés comme des événements importants de la phase de fonctionnement de l'INB, impactant essentiellement sa configuration et ses modes de fonctionnement et rendant éventuellement nécessaire la prise en compte de scénarios de préparation à l'arrêt définitif. Quant aux différentes autorisations qui suivront l'entrée en vigueur du décret de démantèlement, elles seront considérées comme des événements importants de la phase de déconstruction de l'INB. Elles impactent essentiellement les référentiels de l'INB, peuvent modifier la conception initiale de la configuration attendue pour valider le jalon de fin de vie, et induisent des changements plus profonds sur les projets d'A&D : évolution des types d'opérations mises en œuvre, modification des étapes clés de l'A&D, etc.

En revanche, l'arrêt définitif et l'entrée en vigueur du décret de démantèlement vont tous deux impacter fortement à la fois l'installation nucléaire et les projets d'A&D.

En effet, l'arrêt définitif va d'un côté correspondre au jalon à partir duquel il n'est plus possible de continuer les opérations dans le cadre de la réalisation de la mission principale de l'INB. Par exemple, si sa mission principale est de produire de l'électricité à des fins commerciales, alors cette mission principale n'est plus remplie : la réaction en chaîne du réacteur est arrêtée. De fait, du point de vue de ses missions, l'installation n'est plus en fonctionnement à proprement parler. En revanche, toujours dans le cadre d'une INB, son référentiel de sûreté d'exploitation (Règles Générales d'Exploitation RGE, Rapport de sûreté, Plan d'Urgence Interne PUI, Prescriptions techniques) s'applique jusqu'à la date d'entrée en vigueur du décret de démantèlement, et non à l'arrêt définitif. Notamment, les Règles Générales d'Exploitation, « *qui définissent le domaine autorisé de fonctionnement de l'installation et les prescriptions de conduite associées* » (définition de l'ASN⁴), restent les mêmes jusqu'à l'entrée en vigueur du décret. Ainsi toute opération préparatoire au démantèlement doit respecter les mêmes contraintes d'exploitation de l'INB jusqu'à la date d'entrée en vigueur du décret de démantèlement. Entre ces deux jalons, il est donc impossible pour l'INB de réaliser ou subir des opérations non prévues dans le référentiel d'exploitation. On note ici la forte ambiguïté sémantique des notions « en fonctionnement » et « en exploitation » dans le secteur nucléaire. Le premier couvre une période s'arrêtant à l'arrêt définitif. Tandis que le deuxième couvre une période s'arrêtant en fin de vie de l'INB.

On parlera en fait d'opérations préparatoires au démantèlement entre les deux jalons, qui impose forcément donc une nouvelle phase (que nous appellerons phase d'OPDEM dans la suite, mais qui est parfois aussi qualifiée de phase de transition ou encore de phase de *Post Operation Clean Out* dans (Macpherson & Dunlop, 2016)).

Enfin, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, la déconstruction peut se décomposer en plusieurs démantèlements et donc en plusieurs déclassements successifs jusqu'à la réhabilitation complète du site. Ces déclassements sont donc considérés dans la **Figure 18** également comme des événements importants de la phase de déconstruction de l'INB, bien que

l'impact de chaque niveau de déclasserment puisse impacter fortement l'installation, d'où des questions essentielles à se poser comme par exemple : quelles sont les caractéristiques physiques, chimiques, radiologiques et administratives de la configuration de l'installation en fin de vie une fois déclassée ?

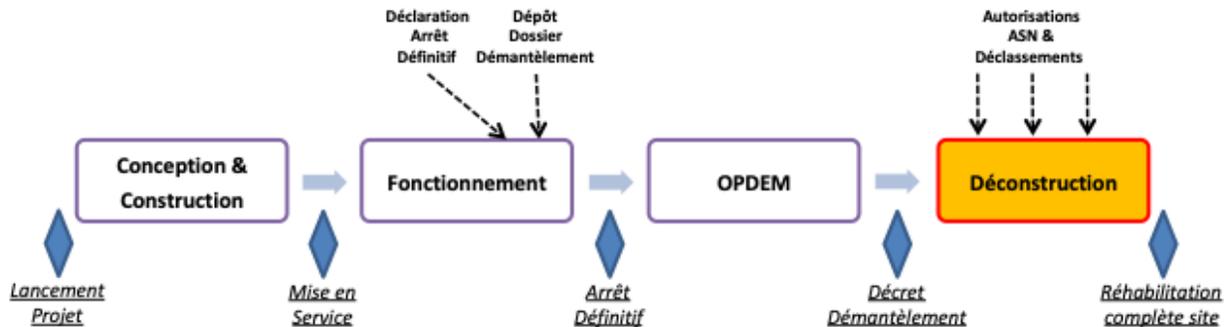


Figure 18 - Proposition de cycle de vie générique d'une INB

Pour conclure, l'idée de proposer un cycle de vie générique pour toutes les installations nucléaires reste partiellement acceptable du fait de la difficulté à définir cette vision commune et partagée de l'état initial et de l'état final de chaque projet de démantèlement.

3.2.2.3 Principaux systèmes contributeurs de l'installation nucléaire

Une installation nucléaire nécessite classiquement l'existence et l'interaction avec un certain nombre de systèmes dits contributeurs ou *enabling systems* (d'après (ISO, IEC, IEEE, 2015) : « *system that supports a system-of-interest during its life cycle stages but does not necessarily contribute directly to its function during operation* »).

Ils fournissent à un Sol les services dont le Sol a besoin pour la réalisation de ses missions au cours des différentes phases de son cycle de vie, dont des services de maintien en conditions opérationnelles. L'importance des systèmes contributeurs est aujourd'hui un enjeu de taille dans nombre d'industries. En effet, s'ils venaient à disparaître ou dysfonctionner, la ou les missions du système d'intérêt ne pourraient plus être remplies ou se dégraderaient régulièrement jusqu'à l'arrêt de service ou l'endommagement du système d'intérêt à plus ou moins longue échéance. Ainsi, chaque installation nucléaire dispose *a minima* de ses propres systèmes pour la conception et la construction, pour l'exploitation et la maintenance en conditions opérationnelles, et pour la déconstruction (**Figure 19**). Cet ensemble de systèmes, peut être assimilé à une partie de l'environnement de l'installation nucléaire sans lequel la création puis la survie de cette installation est compromise.

L'originalité de cette étude consiste à identifier et caractériser séparément ces systèmes qui constituent de véritables projets complexes et donc systèmes complexes, d'abord du fait de l'énorme quantité de métiers qui sont concernés ou impliqués.

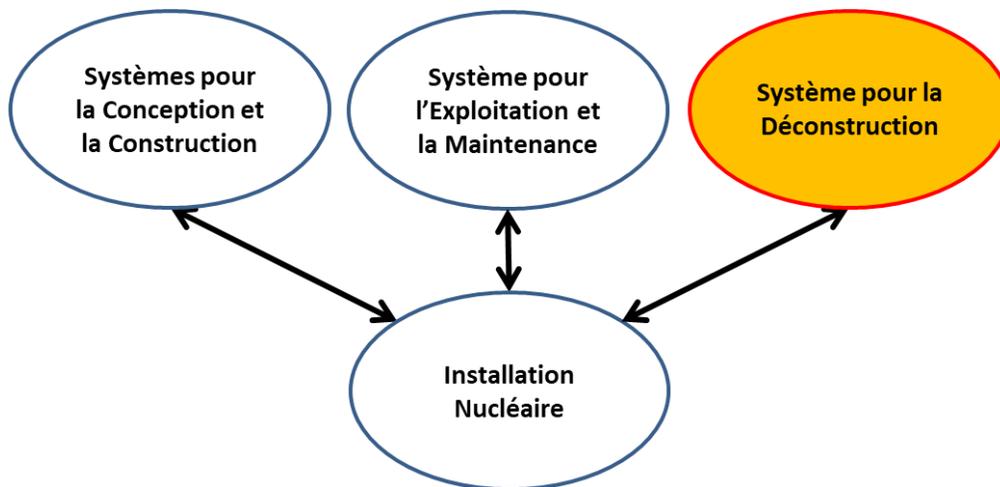


Figure 19 - Systèmes contributeurs génériques d'une installation nucléaire qui participent directement aux missions de celui-ci

Nous avons vu que chaque installation est un système spécifique et ne peut pas être considéré comme une copie conforme à un modèle générique de système qui engloberait toutes les installations nucléaires. De nombreuses fonctionnalités différencient chaque installation nucléaire : finalité, missions opérationnelles, performances, configurations, etc. De plus, les phases de fonctionnement, d'OPDEM et de déconstruction couvrent une longue période (plusieurs décennies) durant laquelle une installation nucléaire subit des modifications plus ou moins importantes. Cela nécessite une compréhension approfondie de ses nombreuses configurations et la traçabilité des données, informations et connaissances qui les caractérisent, ce qui est parfois difficile à garantir en raison de divers paramètres, par exemple le turnover des personnels, ou l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Enfin, comme dans tout projet, il peut y avoir des événements imprévus au cours de la phase de déconstruction, principalement dus à l'évolution des données, informations et connaissances (causes internes, telles que des nouvelles données d'investigation indiquant des niveaux de radioactivité plus élevés que prévu, ou causes externes, telles que des changements réglementaires).

C'est pourquoi la formalisation même du système pour la déconstruction doit prendre en compte certaines caractéristiques particulières, telles que :

- l'autonomie de ses différents sous-systèmes (par exemple les nombreuses entreprises impliquées dans les opérations d'A&D), qui possèdent des attributs spécifiques. Cette autonomie est aussi bien organisationnelle et administrative qu'opérationnelle et technique (par exemple, plusieurs entreprises différentes qui exécutent différentes tâches pour le projet et ont leurs propres stratégies de gestion et leurs propres intérêts industriels) ;

- la répartition géographique sur un territoire éventuellement vaste de ses sous-systèmes ;
- le développement indépendant de ses sous-systèmes (qui ont par exemple des cycles de vie potentiellement très différents) ;
- la diversité et l'hétérogénéité de ses sous-systèmes (essentiellement en raison du grand nombre d'entreprises, de compétences, de rôles et de responsabilités) ;
- les nombreuses interconnexions et contraintes à l'interface, qui doivent être spécifiées et anticipées autant que possible afin d'être jugées acceptables par les parties prenantes ;
- la complexité du réseau d'interactions que permettent ces interconnexions induit enfin des comportements et des propriétés émergentes difficilement prévisibles.

Ces différentes caractéristiques à prendre en compte dans la modélisation sont celles d'un système de systèmes (Maier, 1998) (Billaud, 2015), dont le modèle sera plus adaptable à l'évolution d'un projet d'A&D.

Ces caractéristiques se retrouvent en fait dans tous les systèmes contributeurs génériques évoqués dans la **Figure 19**. Par exemple, leurs composants et sous-systèmes respectifs peuvent à tout moment se reconfigurer dynamiquement pour proposer leurs services à d'autres systèmes et assurer soit des missions identiques mais avec d'autres objectifs, soit de nouvelles missions. Considérer ces systèmes comme des systèmes de systèmes nous permet de faire un lien avec la première problématique de la thèse liée à la complexité et l'hétérogénéité des projets, qui rendaient initialement difficile la valorisation des données, informations, et connaissances, et donc la reproductibilité des projets.

Pour limiter la description de ces systèmes contributeurs aux besoins de la méthode, leur étude s'est concentrée sur leurs interactions avec l'INB après son arrêt définitif. Le système pour l'exploitation et la maintenance reste contributeur pendant la phase d'OPDEM puis la phase de déconstruction d'une l'INB. En effet, bien que l'installation nucléaire soit arrêtée, celle-ci continue de devoir remplir certaines de ses missions opérationnelles, notamment de confinement, et ce par le biais des services rendus principalement par le système pour l'exploitation et la maintenance (surveillance, maintenance de la ventilation nucléaire, etc.). Le système pour la déconstruction d'une INB va prendre ici son réel rôle de contributeur pour cette INB au cours de sa phase de déconstruction. Il peut de plus réaliser des opérations pendant la phase d'OPDEM sur l'INB, sans être contributeur au cours de cette dernière phase (il ne fournit pas à ce moment-là de services à l'INB permettant le maintien du confinement ou la réalisation d'autres missions). La **Figure 20** résume les services rendus par ces systèmes après l'arrêt définitif de l'INB (flèche en gras lorsque contributeur).

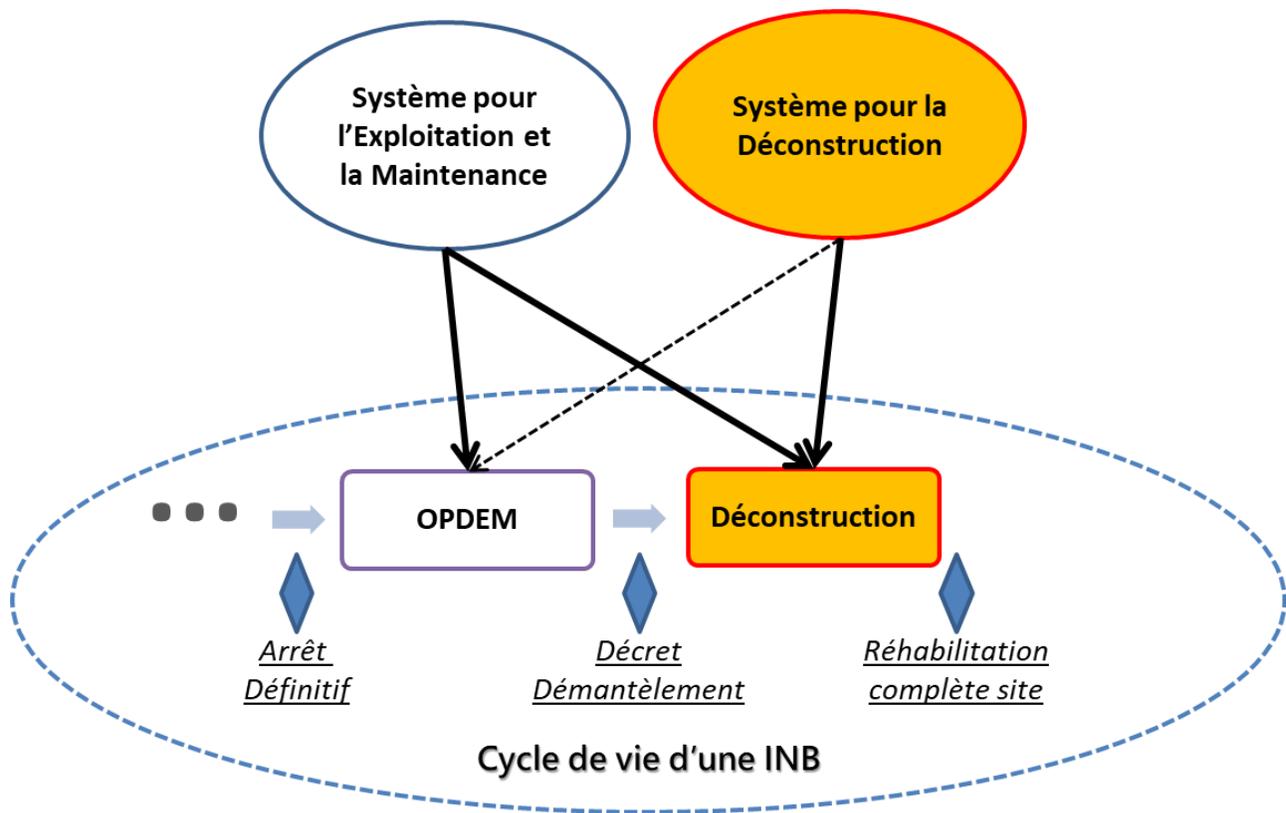


Figure 20 – Contribution des systèmes pour l'exploitation et la maintenance et pour la déconstruction d'une INB après son arrêt définitif

Pour conclure, ces réflexions nous montrent l'importance de considérer le concept de service et d'interaction, en les spécifiant pour chacune des phases du cycle de vie, afin de limiter le risque d'oublier certaines interactions, qui pourtant contraignent fortement les systèmes mis en jeu.

3.2.2.4 Architectures d'une installation nucléaire

Les différentes architectures (fonctionnelle et physique) d'une installation nucléaire vont grandement varier d'une installation nucléaire à l'autre. Nous proposons cependant de généraliser certains éléments architecturaux communs à toutes les installations nucléaires :

- l'architecture fonctionnelle est décrite par l'ensemble des fonctions ou activités raffinées depuis les différentes missions remplies par l'installation nucléaire ;
- l'architecture organique d'une installation nucléaire est décrite comme un ensemble d'éléments physiques reliés, par exemple les différents équipements, réseaux, etc. Nous engloberons ces éléments et ces liens sous le concept de composant. Ces composants ont un emplacement géographique (local, cellule, etc.) formalisé par le concept de zone. Ils sont associés à des référentiels de données, informations et connaissances les caractérisant (physiquement, chimiquement, radiologiquement, etc.). L'ensemble des configurations de ces composants permettent de définir la configuration de l'installation nucléaire.

Enfin, il est proposé de décrire le comportement d'une installation nucléaire à un niveau d'abstraction suffisant basé, d'une part, sur la description de ses modes opérationnels ou modes de fonctionnement et les transitions entre ces modes. D'autre part, la description des activités permet la description des comportements propres de l'INB lorsqu'elle se trouve dans un mode particulier et dans une configuration particulière, comme par exemple, un scénario de ventilation de secours en mode dégradé. Pour cela, il est possible de s'inspirer des méthodes de modélisation génériques telles que GEMOS (Chapurlat, et al., 2013).

3.2.3 L'émergence d'un SA&D

3.2.3.1 Passer du système pour la déconstruction au(x) SA&D

Pour rappel, nous avons proposé de définir un SA&D comme « un ensemble d'éléments de natures diverses et hétérogènes qui interagissent pour concevoir et réaliser un projet d'A&D d'installation nucléaire ». Ce SA&D est bien le système d'intérêt de la méthode élaborée par ces travaux. Ainsi, pour chaque installation nucléaire, le système pour la déconstruction peut être représenté *a minima* par un ou plusieurs SA&D (**Figure 21**), correspondant aux projets de démantèlement réalisés successivement à différents niveaux de déclassement – prédéfinis en amont de chaque projet – jusqu'au déclassement final conduisant à la réhabilitation complète de l'installation. Il peut également, pour un même démantèlement y avoir plusieurs SA&D impliqués, et un même SA&D peut s'appliquer à plusieurs installations nucléaires, comme nous le verrons dans le cas du chantier pilote retenu.

Nous avons vu que pour réaliser un démantèlement d'INB, il arrive parfois qu'une installation soit construite pour un usage temporaire. Ces installations doivent d'ailleurs se conformer à tout ou partie des exigences réglementaires applicables à cette INB et deviennent d'ailleurs partie intégrante du périmètre de l'INB (ASN, 2013).

De même, toute autre installation « *susceptible de modifier les risques ou inconvénients de l'installation nucléaire* » est automatiquement rajoutée au périmètre d'une INB (ASN, 2013). Nous avons en revanche fait le choix de les modéliser sous la forme de systèmes à part entière, interfacés avec la ou les INB à démanteler, car elles possèdent leur propre finalité, leurs propres missions, leur propre cycle de vie, etc. Ces installations temporaires deviennent ainsi contributrices à la fois de l'INB et du projet d'A&D (par exemple en garantissant la mission de confinement au cours des opérations d'A&D).

Enfin, d'autres systèmes prévus pour la déconstruction peuvent être contributeurs de l'INB, comme par exemple les systèmes garantissant la reprise et le conditionnement des déchets.

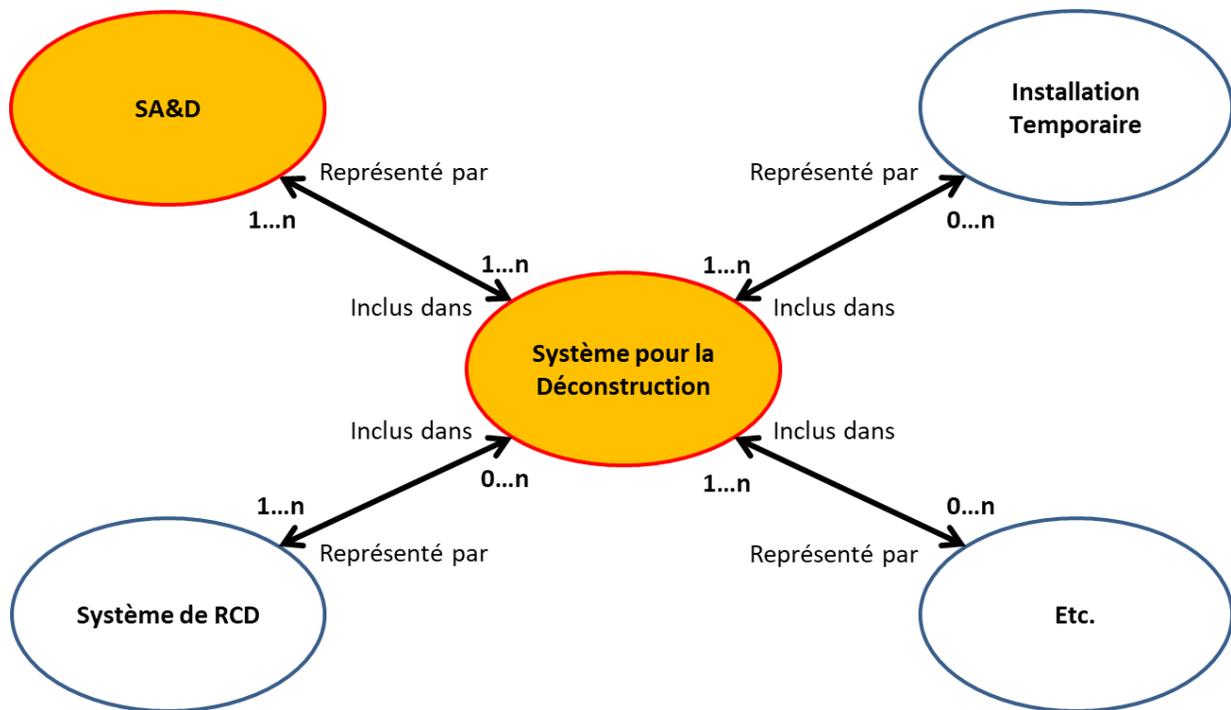


Figure 21 - Formalisation du système pour la déconstruction d'une INB

3.2.3.2 Finalités, missions et objectifs

La finalité d'un SA&D, suite aux nombreuses réflexions et échanges avec les acteurs locaux concernant la formalisation du périmètre d'un SA&D est d'atteindre un état final prédéfini pour une ou plusieurs installation(s) nucléaire(s), compatible avec les futures utilisations prévues, tout en garantissant la compatibilité de toutes les matières évacuées avec des exutoires existants.

Les missions génériques, issues d'une analyse de REX, puis affinées suite aux réunions d'échanges avec les acteurs de l'A&D, peuvent se décliner selon trois axes : décisionnel, informationnel, et opérationnel (**Tableau VII**).

Type de Mission	Énoncé de la Mission
Décisionnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Élaborer des scénarios : caractériser, simuler, décider et planifier • Lancer et piloter les opérations préparatoires au démantèlement • Lancer et piloter des opérations de démantèlement d'une ou plusieurs installation(s) nucléaire(s) • Organiser la gestion des matières et des déchets radioactifs issus de ces opérations • Adapter ses missions face aux aléas et aux changements stratégiques
Informationnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer la collecte le traitement (e.g. les modélisations et les simulations), le partage, et la sécurisation des données, informations, et connaissances relatives à une ou plusieurs installation(s) nucléaire(s) et son(leur) démantèlement en cours • Construire et diffuser le retour d'expérience (REX) du projet de démantèlement afin de guider et inspirer les responsables de projets futurs ou en cours • Planifier et piloter les formations requises pour les parties prenantes impliquées
Opérationnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Réaliser des opérations d'acquisition de données et des études • Réaliser des opérations préparatoires au démantèlement • Réaliser des opérations de démantèlement • Préparer le plan de démantèlement et les différents livrables à fournir aux autorités compétentes • Caractériser, trier, conditionner (mise au gabarit dimensionnelle et radiologique) et organiser le transfert en entreposage, stockage, et revalorisation de l'ensemble des matières et déchets (radioactifs, conventionnels) • Réaliser une ou des demande(s) de déclassement d'une ou plusieurs installation(s) nucléaire(s)

Tableau VII - Missions d'un SA&D

Enfin, un SA&D doit atteindre un certain nombre d'objectifs, qui précisent les performances quantifiées ou qualifiées attendues qui sont de différents types (économique, temporel, qualité, sûreté, etc.). Ces objectifs, qui sont la plupart du temps spécifiques à un SA&D donné, devront le plus possible être quantifiés, de proche en proche et en gagnant en précision à chaque itération, afin de réduire les risques d'ambiguïtés. Le **Tableau VIII** présente quelques exemples typiques d'objectifs génériques.

Type d'Objectif	Énoncé de l'Objectif
Qualité et Sûreté du Démantèlement	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir un niveau de connaissance de l'état radiologique de la ou les installation(s) nucléaire(s) fiable et au plus proche de la réalité, tout au long de son(leur) cycle de vie • Atteindre un seuil le plus bas possible raisonnablement de l'activité résiduelle (ou du TSM) de la ou les installation(s) nucléaire(s) • Apporter une justification raisonnable (au regard des autorités compétentes) du classement final des installations résiduelles • Respecter dans son intégralité le référentiel de sûreté imposé par l'ASN • Atteindre un niveau bas prédéfini d'écart de doses, d'incidents et d'accidents au cours des opérations • Garantir un niveau élevé prédéfini d'adaptabilité face aux aléas et son évolution tactique
Gestion des Matières et Déchets	<ul style="list-style-type: none"> • Atteindre un niveau bas prédéfini en volume et en toxicité des déchets produits • Atteindre un taux bas prédéfini de matières en entreposage en sortie • Atteindre un taux élevé prédéfini de matières en revalorisation en sortie
REX – Amélioration des Connaissances	<ul style="list-style-type: none"> • Fournir un certain nombre de connaissances pour appuyer des processus de standardisation
Réglementation & Certification	<ul style="list-style-type: none"> • Respecter dans leur intégralité les exigences de réglementation applicables (directives européennes, constitution, lois, décisions ASN, etc.) • Respecter dans leur intégralité un ensemble prédéfini de standards (recommandations AIEA, guides ASN, normes ISO, etc.) • Atteindre un niveau bas prédéfini de temps d'exploitation de la ou les installation(s) nucléaire(s) jusqu'au déclassé • Atteindre un niveau bas prédéfini des coûts de démantèlement de la ou les installation(s) nucléaire(s)

Tableau VIII - Quelques objectifs type d'un SA&D

3.2.3.3 Un système fortement couplé à une installation nucléaire

Un SA&D et une installation nucléaire associée sont interdépendants et leurs cycles de vie respectifs reflètent cette liaison forte (**Figure 22**).

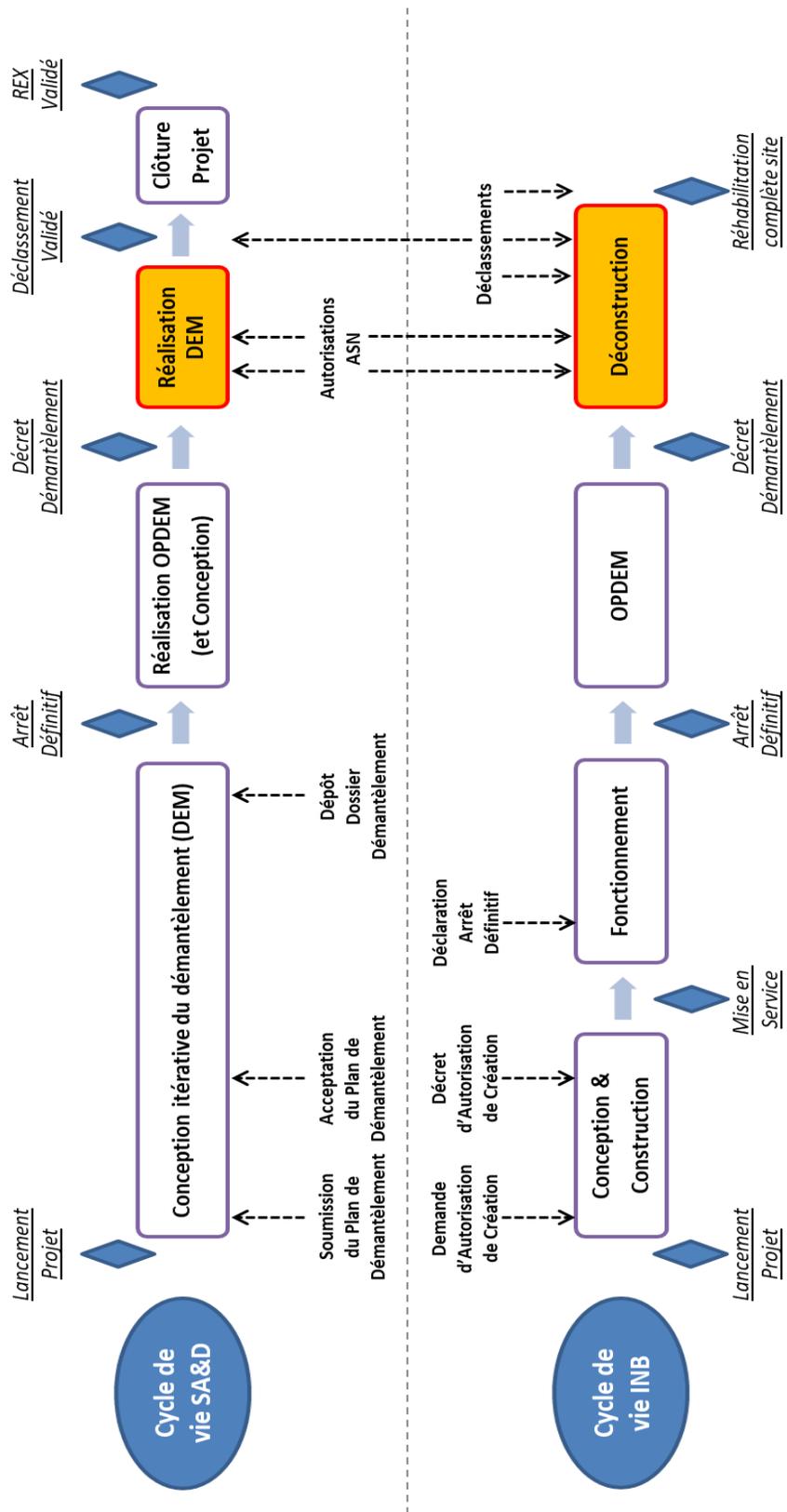


Figure 22 - Cycles de vie d'une INB et du premier SA&D associé

On retrouve en deuxième ligne les grandes phases du cycle de vie d'une INB vues plus haut. La durée de chacun des deux cycles de vie est approximativement la même et plusieurs jalons sont liés voire communs, comme l'arrêt définitif et l'entrée en vigueur du décret de démantèlement qui modifient profondément les opérations que peut mener un SA&D.

Tout comme chaque installation nucléaire représente un cas particulier, un SA&D qui lui est associé est tout aussi dédié et spécifique. En raison de tous les phénomènes et événements pouvant survenir pendant la durée de vie d'une installation, un SA&D doit par exemple, en France, pouvoir anticiper son démantèlement dès le lancement d'un projet de construction d'installation nouvelle (ASN, 2016a), et pouvoir s'adapter de manière dynamique au cas par cas, idéalement à tout moment.

Notamment, les SA&D définissent l'état final de chaque démantèlement, et donc les modalités de chaque déclassement. Ils gèrent l'ensemble des configurations successives des installations après chaque activité des SA&D. Ainsi, si à l'issue d'un démantèlement partiel, tout ou partie des éventuelles installations résiduelles continuent d'exercer tout ou partie des missions opérationnelles de l'installation initiale sujette au démantèlement, alors l'installation nucléaire n'a pas atteint sa « réhabilitation totale » et n'a donc pas atteint sa fin de vie (le système existe toujours). Malgré cela, le caractère contributeur du SA&D en charge de ce démantèlement s'estompe forcément, tandis que lui-même n'a pas forcément terminé son cycle de vie non plus. En effet, et selon les objectifs qui lui sont prédéfinis, le SA&D rentre alors dans sa dernière phase dite de clôture, dans laquelle le REX sera capitalisé et partagé.

3.2.3.4 Un couplage qui implique des interactions avec de nombreux autres systèmes

Il est aujourd'hui indispensable en France de prévoir le démantèlement dès l'intention de création d'une INB. Il s'agit donc ici de créer un ou des SA&D dès l'intention de création d'une INB. D'abord, comme vu dans l'état de l'art, les contraintes de démantèlement sont progressivement prises en compte lors de la conception et la construction de l'INB. Toutefois, en raison de la grandeur, de la complexité, et de sa durée de vie, les incertitudes relatives à l'INB sont trop fortes à ce jour pour que des modèles statistiques statuent dès le départ précisément sur les configurations de l'installation lors de son arrêt définitif et donc au début de sa déconstruction (d'un point de vue radiologique et de la présence d'anomalies dimensionnelles, physiques et chimiques, liés à des incidents d'exploitation notamment). Il est donc nécessaire d'identifier le plus en amont possible puis de suivre tout au long de la vie d'une installation les données, informations, et connaissances, qui seront pertinentes pour le SA&D. Cela passe par un échange constant de services entre les SA&D et l'INB, mais également entre le SA&D et les autres systèmes contributeurs de l'INB, notamment ses systèmes pour la conception et la construction, et pour l'exploitation et la maintenance.

De fait, un SA&D remplit ses missions principalement au cours de la phase de déconstruction de l'INB. En amont du cycle de vie d'une installation, seule la conception du SA&D, c'est-à-dire entre autres tâches l'élaboration et la mise à jour des scénarios de démantèlement, est traitée.

3.2.3.5 La fin de vie d'un SA&D

L'action du SA&D ne s'arrête pas à première vue lorsque tous les déchets ont été définitivement évacués matériellement vers des exutoires : l'exploitant reste responsable de la gestion de ses déchets y compris après prise en charge par l'ANDRA, ORANO (pour La Hague par exemple), etc. En effet, dans le cadre d'une INB et au sens de l'ASN⁵, cette responsabilité s'arrête après « [...] *vérification que le déchet a bien été géré dans des filières autorisées (filières de traitement, d'entreposage et de stockage)* ». Au sens de l'article L. 541-2 du code de l'environnement, tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ceux-ci jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement.

Conceptuellement, l'organisme exploitant administrativement l'installation nucléaire (dans notre cas, le CEA) englobe généralement le SA&D et le cas échéant en constitue son sous-système. Il serait cependant possible que le SA&D doive gérer des matières valorisées et réintégrées à l'installation nucléaire avant son déclassement. Les actions ultérieures que l'exploitant juridiquement responsable doit mener, pourront faire l'objet de missions d'autres sous-systèmes (autres entités du CEA dans notre cas), mais pas forcément d'autres SA&D.

Cette analyse nous a permis de consolider notre vision des types de produits issus du SA&D, au nombre de trois : une configuration finale de l'installation nucléaire, des déchets pris en charge selon un cahier des charges initial, et un ensemble de connaissances capitalisées et partagées sous forme de REX.

3.2.3.6 Un SA&D maintenu en conditions opérationnelles principalement par le système pour l'exploitation et la maintenance

Le système pour l'exploitation et la maintenance et les SA&D opèrent conjointement sur l'INB, dès le début de sa conception, au sujet de laquelle ils doivent donc concilier des exigences parfois contradictoires, puis jusqu'à sa fin de vie, mettant en jeu quelques fois les mêmes ressources. Le premier, en plus d'être contributeur de l'INB, fait partie de ses systèmes de SLI, qui ont pour mission de la maintenir en conditions opérationnelles. De ce fait, il fait également partie des systèmes de soutien logistique intégré du SA&D.

En effet, en raison du couplage entre le SA&D et l'INB, l'occurrence d'un événement impactant le mode opérationnel courant de l'INB impactera également les SA&D. Par exemple, une rupture de confinement empêchera toute activité de démantèlement du SA&D.

Le CEA intègre d'ailleurs dans les provisions de l'A&D les coûts que représente ce maintien de l'exploitation de l'INB après arrêt définitif, qu'on appelle coûts SENEX, non négligeables dans les projets d'A&D du fait notamment de leur durée.

3.2.3.7 Architectures du SA&D : un système organisationnel et technique

Le SA&D étant intimement lié au projet qu'il représente, nous pouvons considérer que c'est un système de systèmes de nature socio-technique. Nous l'avons illustré par les quelques exemples de modèles proposés dans le **Tableau I** en début de ce manuscrit. De fait, il est intéressant d'utiliser des concepts relatifs à la Gestion de Projet, notamment ceux de tâches et de ressources, afin de décrire les architectures fonctionnelles et physiques des SA&D :

- dans le cadre de ces travaux menés au sein du CEA, une architecture fonctionnelle générique est admise bien que ce degré de généricité ne soit pas nécessairement pertinent dans un autre cadre. Nous considérerons en effet, pour un SA&D donné, qu'une architecture fonctionnelle type peut être réalisée en suivant les recommandations du référentiel méthodologique de management de projet (R2MP). Les différentes fonctions ou activités sont actuellement formalisées sous la forme de divers livrables en amont du projet, dont un qui se veut global en terme de gestion de projet : le plan de management de projets PMP. Ce plan est repris du PMGP et doit inclure la description d'un certain nombre de solutions fonctionnelles en fonction des différents métiers : maîtrise des coûts, des configurations, des déchets, etc.
- l'architecture organique se modélise pour chaque SA&D en détaillant les ressources allouées pour réaliser chaque type d'activités. Pour ce faire, des référentiels de connaissance détaillant ces ressources existent. On peut par exemple évoquer les deux normes ISO 18557 et 16647 (ISO, 2017) (ISO, 2018).

Enfin, déterminer une sémantique opérationnelle pour chacune de ces deux architectures nous permettra d'étudier l'aspect comportemental du SA&D.

3.2.3.8 Décomposition d'un SA&D en lots

Enfin, en raison d'un découpage possible d'un projet en plusieurs lots, le SA&D pourra lui-même être décomposé en plusieurs sous-systèmes représentant ses lots.

3.2.4 L'environnement des SA&D : le sur-système et les systèmes à l'interface

Outre les interactions qui ont lieu avec la ou les installation(s) nucléaire(s) concernée(s), chaque SA&D interagit également avec de nombreux autres systèmes liés à la réglementation, à la gestion des déchets, à la normalisation et à la certification, etc. Chacune de ces relations signifie un certain nombre de services fournis et / ou reçus, par exemple l'ANDRA qui se doit de « *fournir les spécifications relatives aux sites de stockage existants* », ce qui implique directement des exigences qui ont une incidence sur la conception du SA&D.

Certaines exigences sont communes à de nombreux voire à tous les SA&D, telles que les contraintes génériques pour les transferts de déchets radioactifs ou les contraintes réglementaires (par exemple, les demandes d'obtention d'un décret de démantèlement qui doivent être étalées dans le temps pour pouvoir être traitées dans les délais impartis).

Il est donc nécessaire de mettre à disposition et de diffuser aux SA&D un certain nombre d'informations, et de coordonner l'ensemble des SA&D.

3.2.4.1 L'existence de systèmes relatifs aux programmes d'A&D, d'un système de gestion stratégique, et d'un sur-système global de l'A&D

Cela donne naissance à un système stratégique de l'A&D (**Figure 23**), dont la finalité est d'assurer le contrôle transversal des projets d'A&D et des relations externes, et dont les missions sont de :

- coordonner et programmer la mise en œuvre de l'A&D ;
- recueillir, organiser et fournir des connaissances dont les retours d'expériences ;
- établir des stratégies d'A&D avec les parties prenantes externes.

Nous avons ensuite considéré les programmes d'A&D comme des systèmes à part entière, qui ont pour finalité de garantir la conformité des performances de l'A&D à une stratégie de l'A&D. Leurs missions consistent en la mise en œuvre de cette stratégie de l'A&D (démanteler un site, réaliser des travaux de R&D sur des techniques d'A&D, etc.), et éventuellement de piloter un ou plusieurs SA&D. Ils possèdent leur propre cycle de vie, et gèrent des ressources et des activités propres. Les programmes ne constituent pas les sur-systèmes des SA&D (et réciproquement, les SA&D ne sont pas des sous-systèmes de programmes), car un programme ne pilote pas forcément de SA&D, et la disparition d'un programme qui pilote les SA&D n'entraînerait pas la suppression de ces derniers (mais pourrait être synonyme de réorganisation par exemple).

Le sur-système doit donc être un système plus global. Il englobe forcément tous les systèmes évoqués, comme présenté **Figure 23**. Sa finalité consiste à assurer l'amélioration continue de l'industrie de l'A&D afin de garantir sa compétitivité et sa pérennité. Un tel système global est néanmoins réduit aux projets et donc aux SA&D qui concernent un seul exploitant (ici le CEA), et ce pour plusieurs raisons, notamment liées à l'indépendance de sa gestion opérationnelle, stratégique et organisationnelle. De fait, un autre système global d'A&D peut être envisagé pour d'autres exploitants, par exemple ORANO ou EDF en France. Leur modèle serait voisin, avec la même finalité, les mêmes missions et des interfaces similaires : le modèle simplifié présenté **Figure 23** avec les systèmes mis en jeu serait également valide.

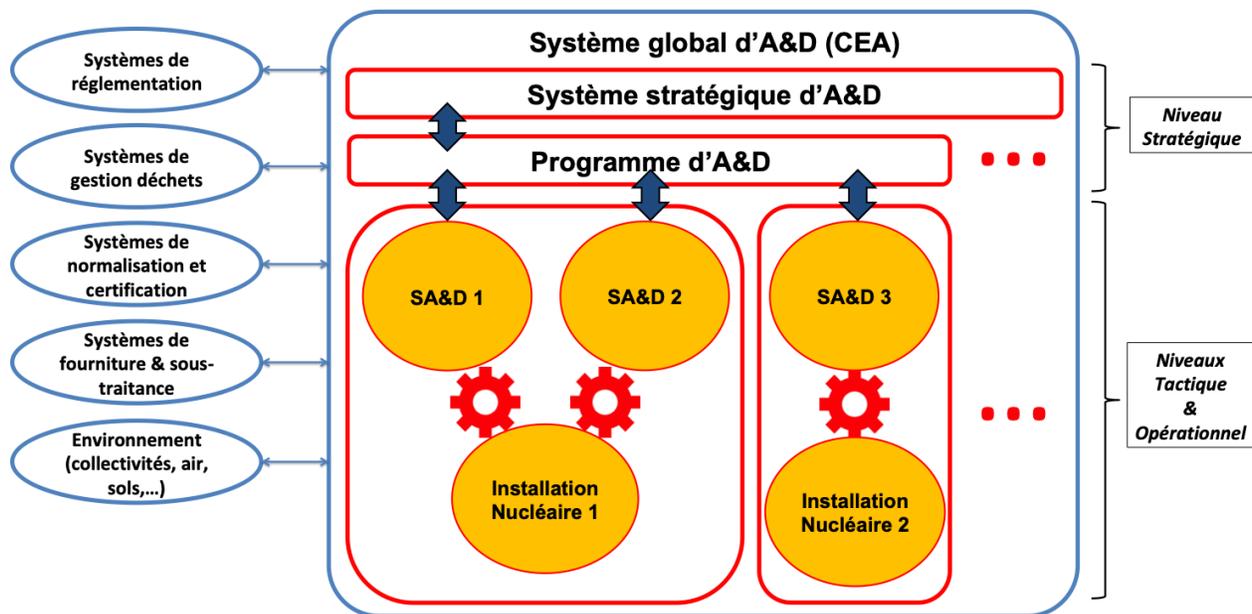


Figure 23 - Intégration des SA&D dans leur environnement

3.2.4.2 Des interactions à hiérarchiser

Au sein de ce système global, la séparation des systèmes d'A&D des programmes et du système stratégique dépend aussi de considérations stratégiques, tactiques et opérationnelles impliquant plus particulièrement les différents services reçus et fournis par les systèmes situés à l'interface. Ces considérations sont basées sur une hiérarchie décisionnelle. Toute décision stratégique doit être prioritaire sur le plan tactique, puis opérationnel. Une décision transversale concernant des projets, souvent de nature stratégique, doit être généralement prioritaire face à chaque décision d'un projet. C'est pourquoi les SA&D, en charge de la gestion de projets de démantèlement spécifiques, interviennent aux niveaux tactique et opérationnel. Ces niveaux sont pris en compte dans la description des interactions au sein du sur-système ainsi qu'avec les systèmes à l'interface.

À titre d'exemple, le Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD), développé conjointement par l'ANDRA et les producteurs de déchets impliqués dans le projet CIGEO de stockage en couches géologiques profondes (IRSN, 2013), limite les flux de déchets vers leurs destinations de manière quantitative et programmée, et agit transversalement sur tous les projets (y compris ceux d'autres systèmes globaux, ORANO et EDF principalement). D'un autre côté, les décideurs et sous-traitants de chaque projet communiquent également leurs besoins en matière de gestion des déchets qu'ils produisent. Néanmoins, les exigences liées aux contraintes imposées par le PIGD sont considérablement moins flexibles que celles liées à chaque projet et doivent donc être prises en compte en priorité lors de la conception d'un SA&D.

Cette hiérarchisation des interactions entre le SA&D et les autres systèmes peut aussi être guidée par une typologie des exigences induites. Par exemple, aujourd'hui, le respect des exigences de sûreté consiste en ce qui est priorisé coûte que coûte (et sans lequel il n'est pas possible d'opérer le démantèlement) ; les exigences réglementaires juridiquement contraignantes (suivant l'ordre de la pyramide juridique constitution/directives/lois/etc.) arrivent ensuite, etc.

3.2.4.3 Les contextes : des interactions permanentes et fortes

Analyser l'environnement des SA&D permet de formaliser davantage le périmètre de chaque SA&D, et donc de spécifier plus précisément ses missions, ses contraintes et donc les exigences à l'interface, etc. Afin d'obtenir tous les services reçus et fournis par un SA&D, il est nécessaire de prendre en compte et de modéliser tous ses contextes (par exemple, les opérations juste après l'arrêt définitif impliquent différents acteurs, activités, interactions à l'interface, etc.) tout au long de sa vie, durant laquelle il interagira différemment avec un certain nombre de systèmes à l'interface.

De plus, les systèmes en interaction avec les SA&D peuvent avoir plusieurs particularités. On parle des systèmes contributeurs, mais également des systèmes du soutien logistique. Sans eux, et donc sans prioriser les services qu'ils fournissent à un SA&D, l'opérationnalité de ce dernier est remise en cause, et le risque de passer en mode de fonctionnement dégradé voire à l'arrêt devient élevé. Ils ont un fort impact sur le taux de disponibilité du SA&D, par exemple. De fait, les interactions qui interviennent dans ces contextes, sont permanentes, et fortes. Nous l'avons bien vu premièrement via les forts couplages qui existent entre les SA&D, les systèmes qui permettent l'exploitation et la maintenance des installations nucléaires, et les installations nucléaires elles-mêmes.

Mais les interactions permanentes et fortes faisant entrer en jeu les SA&D ne s'arrêtent pas aux deux systèmes précités. Nous pouvons par exemple citer les nombreuses interactions avec les autorités, et nombreuses exigences qui transitent via celles-ci, tout au long du cycle de vie des SA&D.

3.2.4.4 Des parties prenantes à identifier

Dans la **Figure 23**, nous avons placé un type de systèmes nommé « Environnement » qui peut inclure de nombreux systèmes annexes, qui souvent représentent chacun une ou plusieurs parties prenantes qui interagissent et peuvent émettre des besoins qui contraignent les projets d'A&D. Il est particulièrement important de ne pas oublier dans les parties prenantes celles qui prennent part au débat sans agir directement dans les tâches d'A&D (collectivités, population, médias via les pressions médiatiques, associations diverses et variées telles que la CRIIRAD et le Réseau sortir du nucléaire, etc.). En effet, ces parties prenantes ne doivent pas être négligées car elles peuvent avoir une influence plus ou moins forte sur des éléments du SA&D.

3.2.5 Synthèse : construction d'un méta-modèle

La démarche d'analyse puis d'abstraction présentée ci-dessus a permis, outre une séparation voulue et annoncée entre le côté générique et le côté spécifique, d'avoir une vision globale et holistique de l'ensemble des systèmes mis en jeu (Lafon, et al., 2018).

Le méta-modèle qui est présenté maintenant reprend puis détaille et formalise les concepts essentiels vus plus haut, les relations qu'ils entretiennent et se veut suffisamment large pour couvrir l'ensemble du domaine de l'A&D, indépendamment du cadre applicatif, et des systèmes qu'il met en jeu. La **Figure 24** fait ainsi apparaître tout ce qui doit être modélisé par les concepts et relations présents dans le méta-modèle, et ce aux niveaux : global et stratégique, des programmes, des projets, des lots, et des installations nucléaires.

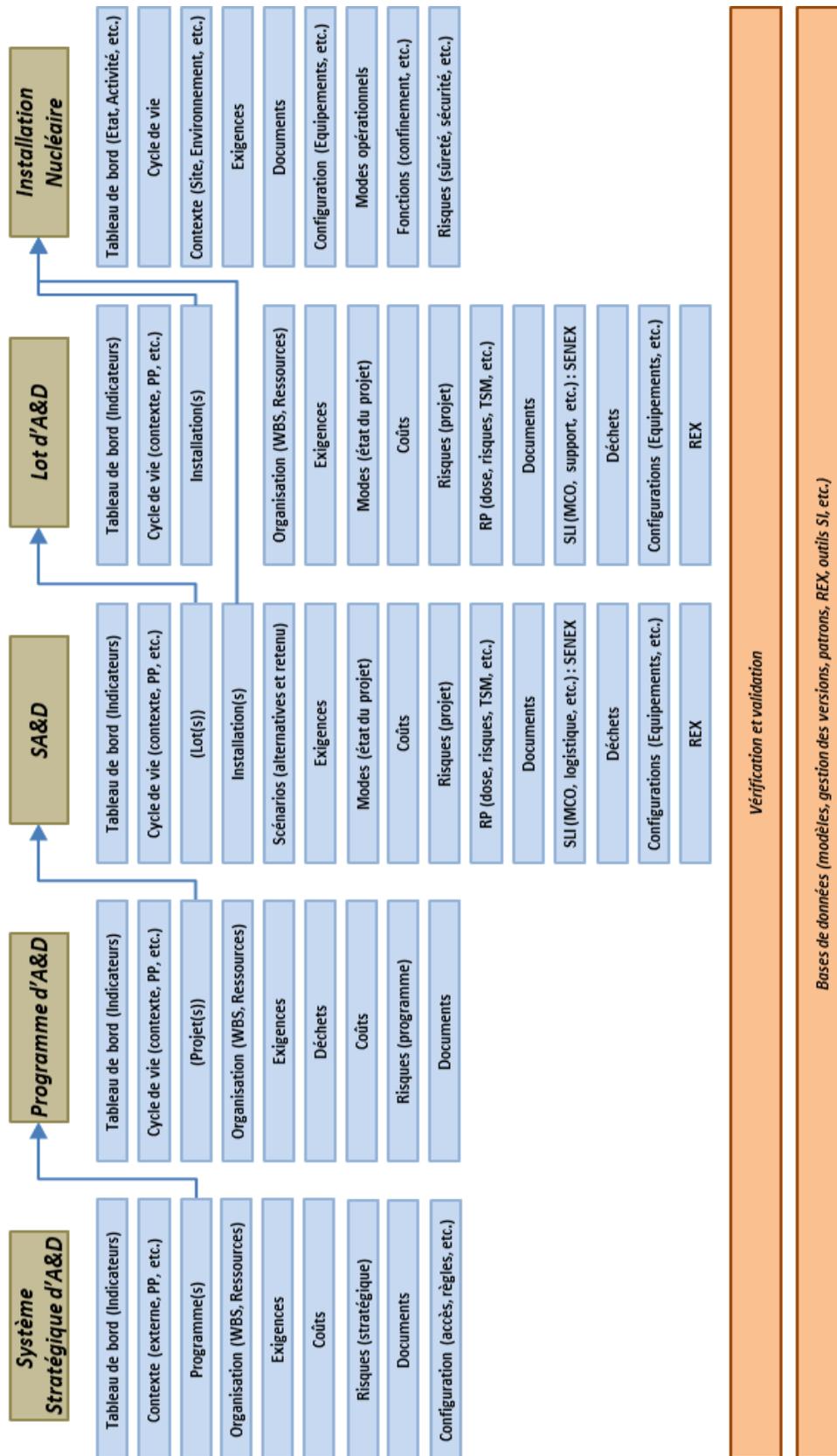


Figure 24 – Ensemble des éléments à modéliser pour décrire des SA&D, à formaliser dans le méta-modèle

3.2.6 Points de vue retenus pour la modélisation

Nous nous sommes, d'une part, inspirés des trois vues mises en avant par exemple dans la Méthode SAGACE (fonctionnelle, organique et opérationnelle), et des neuf points de vue que cette même méthode permet de définir. D'autre part, nous nous sommes inspirés des concepts de Gestion de Projet pour les systèmes socio-techniques, en reprenant et adaptant à notre méta-modèle un certain nombre de ceux proposés par le méta-modèle Software & Systems Process Engineering Metamodel (SPEM 2.0) (OMG, 2008) proposé par l'OMG. Compte tenu des spécificités du SA&D et des systèmes mis en jeu dans l'A&D, nous proposons un ensemble de points de vue décrits dans le **Tableau IX**.

Le lecteur trouvera en **Annexe II** le détail des points de vue et l'intégralité du méta-modèle.

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
1) Fonctionnel (opérationnel)	<ul style="list-style-type: none"> • <u>OperationalSystemFunctionalRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion de l'architecture fonctionnelle d'un système opérationnel ; • <u>Activity</u> : une activité correspond à un ensemble d'éléments qui peuvent faire partie de la structure d'un processus, tels qu'une tâche, une sous-activité, etc. ; • <u>PlanningData</u> : concept permettant d'associer des informations de placement temporel (dates de début/fin), de durée, ou d'intégration dans une séquence (rang) ; • <u>WorkSequence</u> : concept permettant ici de séquencer des activités.
2) Organique (opérationnel)	<ul style="list-style-type: none"> • <u>OperationalSystemPhysicalRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion de l'architecture organique d'un système opérationnel ; • <u>Component</u> : sous-système d'un système opérationnel, dont une instance sera généralement apparentée à un équipement ; • <u>Link</u> : lien réalisé pour faire passer un ou plusieurs flux permettant de réaliser le service ; • <u>NuclearFacility</u> ; • <u>Perimeter</u> : c'est le sur-système d'un Site. Une instance de Perimeter correspondra à un environnement opérationnel global intégrant un ensemble de sites nucléaires (des instances de Site), sur lesquels se trouvent des installations nucléaires (des instances de NuclearFacility), ainsi qu'éventuellement d'autres systèmes opérationnels (qui seront représentés sous forme de Component : exemple une route, un barrage, etc.) : ce concept de Perimeter n'est donc pas à confondre avec ce que le guide n°9 de l'ASN appelle le périmètre d'une INB ; • <u>Site</u> : c'est le sur-système d'une NuclearFacility (e.g. Marcoule) ;

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Zone</u> : emplacements géographiques dans lesquels se situent ces systèmes opérationnels.
3) Planification des activités	<ul style="list-style-type: none"> • <u>PlanRepresentation</u> : représente les différents scénarios possibles d'agencement des activités pour un système socio-technique. Pour un SA&D, on parlera ici de scénario de démantèlement ; • <u>Activity</u> ; • <u>Flow</u> : unité de matière, d'énergie ou de DIC en déplacement ; • <u>MethodConfiguration</u> : représente une alternative de gestion d'une Activity, en d'autres termes comment celle-ci va être configurée via des tâches et des ressources ; • <u>PlanningData</u> ; • <u>WorkSequence</u> : concept permettant ici de séquencer plusieurs activités entre elles.
4) Description des tâches	<ul style="list-style-type: none"> • <u>WBSRepresentation</u> : représente pour une alternative d'activité donnée l'organigramme des tâches requises et tâches prévues, planifiées, séquencées, et allouées à des ressources et des produits ; • <u>DefaultTaskDefinitionParameter</u> : un des paramètres d'entrée ou de sortie d'une TaskDefinition. À chaque ProcessParameter correspond un unique WorkProductDefinition qui va être sollicité ; • <u>DefaultTaskDefinitionPerformer</u> : évoque une ressource humaine idéale attendue pour réaliser une TaskDefinition ; • <u>PlanningData</u> ; • <u>ProcessParameter</u> : un des paramètres d'entrée ou de sortie d'une TaskUse. À chaque ProcessParameter correspond un unique WorkProductUse qui va être sollicité ; • <u>ProcessPerformer</u> : ressource humaine qui va réaliser une tâche : à noter que par essence c'est une partie prenante (Stakeholder) ; • <u>Step</u> : les tâches peuvent être décomposées en étapes ; • <u>TaskDefinition</u> : tâche requise par les différentes contraintes, qui se décline ensuite en une ou plusieurs tâches concrètes prévues dans l'organigramme ; on reste ici dans le domaine du problème ; • <u>TaskUse</u> : tâche prévue détaillant les solutions choisies pour mettre en œuvre une TaskDefinition ; • <u>TechnicalResource</u> : ressource technique qui va être sollicitée par une tâche ; • <u>WorkProductDefinition</u> : représente un des produits théoriquement

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
	<p>réalisables par une ou plusieurs TechnicalResource lorsqu'allouée à une TaskDefinition : donne par exemple une idée de ce que peut produire théoriquement un outil de découpe laser lorsqu'appliqué à une tâche de découpe de cuve, par exemple une nouvelle configuration d'une INB (cuve découpée en plusieurs Component) et des déchets (poussière éventuellement produire) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>WorkProductPort</u> : permet d'identifier si le produit va se situer en entrée ou en sortie d'une activité ou tâche ; • <u>WorkProductUse</u> : un des produits concrets attendus d'une tâche ou d'une activité. À noter qu'un produit peut être placé en entrée d'une tâche ou activity dans une séquence de travail : par exemple une configuration de l'INB en sortie d'une activité d'écroutage correspondra à la configuration d'entrée de l'activité suivante ; • <u>WorkSequence</u> : concept permettant ici de séquencer plusieurs tâches entre elles.
5) Gestion des Ressources	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ResourceRepresentation</u> : représente pour une alternative d'activité donnée l'ensemble des ressources engagées ; • <u>DefaultTaskDefinitionPerformer</u> ; • <u>DefaultResponsibilityAssignment</u> : responsabilités par défaut allouées à un RoleDefinition vis à vis de WorkProductDefinition ; • <u>Indicator</u> : indicateur quelconque (performance, description, etc.), ici associé à une ressource ou à une qualification ; • <u>ProcessPerformer</u> ; • <u>ProcessResponsibilityAssignment</u> : responsabilités allouées à un RoleUse vis à vis de WorkProductUse ; • <u>Qualification</u> : qualifications requises pour un RoleDefinition et fournies par un RoleUse, nécessaires pour la réalisation de tâches ; • <u>RoleDefinition</u> : rôle tel qu'envisagé pour un DefaultTaskDefinitionPerformer : sera décliné en plusieurs RoleUse ; • <u>RoleUse</u> : rôle prévu pour un ProcessPerformer ; • <u>Stakeholder</u> : partie prenante (une ressource humaine, c'est-à-dire une instance de DefaultTaskDefinitionPerformer ou de ProcessPerformer, est forcément une partie prenante, mais une partie prenante n'est pas forcément une ressource) ; • <u>TeamProfile</u> : « équipe » ayant un certain nombre de rôles prévus (RoleUse) : permet par exemple de définir une structure organisationnelle

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
	(laboratoires du CEA ou LGI2P de l'IMT Mines Alès, etc.) ; <ul style="list-style-type: none"> • <u>TechnicalResource</u>.
6) Cycle de vie	<ul style="list-style-type: none"> • <u>LifeCycleRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion d'un cycle de vie de système ; • <u>Condition</u> : représente ici la condition pour franchir un jalon ; • <u>Milestone</u> : jalon ; • <u>Objective</u> : objectifs que vise une ou plusieurs phase(s) ; • <u>Phase</u> ; • <u>Stakeholder</u> : partie prenante engagée dans une ou plusieurs phase(s).
7) Contexte	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ContextRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion d'un contexte d'une phase de cycle de vie ; • <u>Flow</u> ; • <u>Interaction</u> : chaque interaction décrit ici soit un service soit la propagation soudaine et souvent involontaire de flux de données, d'énergie ou de matière non souhaités (e.g. effet d'un incendie, d'une irradiation, etc.). Un service est une contribution à valeur ajoutée d'un système envers un autre qui en exprime le besoin pour remplir sa propre mission. La mission opérationnelle d'un système est décrite par l'ensemble des services sortants ou rendus. • <u>Interface</u> : système, protocole ou mécanisme, permettant d'établir l'interaction à la fois du côté du système émetteur et du système récepteur ; • <u>Link</u> ; • <u>Requirement</u> ; • <u>Stakeholder</u> : une des parties prenantes représentées par un système, qui peut imposer ses propres exigences ; • <u>System</u> : ici ce sera un des systèmes qui interagit avec le système dont c'est le contexte.
8) Modes opérationnels	<ul style="list-style-type: none"> • <u>OperationalModesRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion et suivi des modes opérationnels d'une phase de cycle de vie ; • <u>Condition</u> : représente ici la condition pour activer une transition de mode ; • <u>Configuration</u> : représente l'ensemble des éléments de l'architecture organique d'un système opérationnel à un instant donné ; • <u>Event</u> : un événement peut ici causer directement une transition de mode ou activer une condition prévue pour la transition de mode ; • <u>MethodConfiguration</u> ;

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ModeTransition</u> ; • <u>OperationalMode</u>.
9) Gestion des coûts	<ul style="list-style-type: none"> • <u>CostRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion des coûts d'un système ; • <u>Indicator</u> : concernera ici uniquement des indicateurs de coût ; • <u>ProcessElement</u> : classe abstraite dont héritent plusieurs concepts : voir Annexe II, diagrammes « (View) Breakdown Elements » et « (Detail) Modeling Object Hierarchy » ; • <u>Resource</u> : classe abstraite dont héritent plusieurs concepts : voir Annexe II, diagramme « (View) Resources ».
10) Tableau de bord	<ul style="list-style-type: none"> • <u>DashboardRepresentation</u> : représente l'environnement de suivi des indicateurs pertinents d'un système (TSM, dose, déchets, délais, coûts, etc.) ; • <u>Indicator</u> : concerne ici tous les indicateurs ; • <u>ProcessElement</u> ; • <u>Resource</u>.
11) Gestion des connaissances	<ul style="list-style-type: none"> • <u>KnowledgeRepresentation</u> : représente l'ensemble des DIC nécessaires ou produits par un système qu'il peut être intéressant de trier, catégoriser, etc. ; • <u>Document</u> : documents rattachés à une base de DIC ; • <u>Justification</u> : élément de justification permettant d'apporter une fiabilité accrue des modèles (par exemple, associer une justification à la valeur d'un indicateur de tenue au séisme d'une INB) ; • <u>KnowledgeRepository</u> : base de DIC qui peut ici être de n'importe quel type (physique, chimique, radiologique, déchets, exigences, risques, etc.).
12) Gestion des exigences	<ul style="list-style-type: none"> • <u>RequirementManagementRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion de l'ensemble des exigences applicables à un système (permettant de les organiser, d'identifier leur flexibilité, leur criticité, etc.) ; • <u>DAndDPlatform</u> : tous les éléments sont susceptibles d'être la source d'exigences ou de répondre à des exigences ; • <u>Objective</u> : un objectif se traduit en une ou plusieurs exigence(s) ; • <u>Requirement</u> ; • <u>RequirementBaseline</u> : représente le référentiel d'exigences applicables à un système ; • <u>Stakeholder</u> : partie prenante autrice d'une exigence.

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
13) Ingénierie d'exigences	<ul style="list-style-type: none"> • <u>BoilerPlate</u> : représente l'outil de formalisation d'une exigence ou d'une condition par une succession de parties textuelles fixes et variables contenant notamment des opérateurs mathématiques pour leur analyse (>, <, =, etc.) : voir les travaux de (Lemazurier, 2018) pour davantage de détails ; • <u>Condition</u> ; • <u>FixedTextPart</u> : correspond à une partie fixe du texte d'une exigence ou d'une condition ; • <u>MutableTextPart</u> : correspond à une partie variable du texte d'une exigence ou d'une condition, qui référence un élément quelconque du modèle concerné par cette exigence ou cette condition ; • <u>Requirement</u>.
14) Gestion des risques	<ul style="list-style-type: none"> • <u>RisksManagementRepresentation</u> : représente l'environnement d'analyses des risques d'un système ; • <u>Barrier</u> : une barrière est un système qui va permettre de prévenir un risque ou en corriger ses effets ; • <u>Condition</u> : est ici à prendre au sens de cause d'un risque ; • <u>Effect</u> ; • <u>Event</u> : un événement peut ici causer directement des effets inhérents ou non à un ou plusieurs risques du système, ou activer une cause (condition) d'un risque ; • <u>Risk</u> ; • <u>RisksRepository</u> : représente l'inventaire des risques de ce système.
15) Gestion des configurations	<ul style="list-style-type: none"> • <u>ConfigurationManagementRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion des configurations d'une alternative d'Activity, i.e. d'une MethodConfiguration ; • <u>ChemicalMapping</u> : base de DIC chimiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>Configuration</u> ; • <u>PhysicalMapping</u> : base de DIC physiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>RadiologicalMapping</u> : base de DIC radiologiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>WorkProductDefinition</u> ; • <u>WorkProductDefinitionRelationship</u> : permet de séquencer les produits attendus (par exemple, succession de configurations de l'INB) ;

Point de vue	Concepts métier pertinents manipulés
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>WorkProductUse</u> ; • <u>WorkProductUseRelationship</u> : permet de séquencer les produits concrets.
16) Gestion des déchets	<ul style="list-style-type: none"> • <u>WasteManagementRepresentation</u> : représente l'environnement de gestion des déchets produits par une alternative d'Activity i.e. par une MethodConfiguration ; • <u>ChemicalMapping</u> : base de DIC chimiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>PhysicalMapping</u> : base de DIC physiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>RadiologicalMapping</u> : base de DIC radiologiques (est un KnowledgeRepository particulier) ; • <u>Waste</u> : représente un déchet ; • <u>WasteInventory</u> : représente l'inventaire des déchets produits ; • <u>WorkProductDefinition</u> ; • <u>WorkProductDefinitionRelationship</u> ; • <u>WorkProductUse</u> ; • <u>WorkProductUseRelationship</u>.
17) Gestion du REX	<ul style="list-style-type: none"> • <u>FeedbackRepresentation</u> : représente les bases de connaissances produites par une alternative d'Activity i.e. par une MethodConfiguration ; • <u>KnowledgeRepository</u> ; • <u>WorkProductDefinition</u> ; • <u>WorkProductDefinitionRelationship</u> ; • <u>WorkProductUse</u> ; • <u>WorkProductUseRelationship</u>.

Tableau IX - Liste des points de vue présents dans le méta-modèle

3.2.6.1 Justification de ces points de vue

Concernant les points de vue fonctionnel **1)** et organique **2)** classiques de l'IS définis d'un côté pour des systèmes dits opérationnels, la contribution des travaux de thèse est réduite.

En revanche, de l'autre côté, afin de considérer la problématique de gestion des scénarios de démantèlement pour un SA&D, nous avons adapté de SPEM le concept de *MethodConfiguration*, qui permet pour chaque instance d'Activity de lui décrire une alternative de mise en œuvre. Ces activités, qui peuvent être séquencées par le point de vue **3)**, fournissent ledit scénario de démantèlement, et plus généralement pour n'importe quel système socio-technique, peuvent fournir un premier niveau d'architecture fonctionnelle.

Nous avons en outre associé cinq vues à chaque *MethodConfiguration*. Deux points de vue inspirés d'abord grandement des concepts de SPEM : le point de vue **4**) de l'organigramme des tâches, équivalent du point de vue fonctionnel, et la vue **5**) des ressources, équivalent de l'architecture organique. Ensuite, trois autres points de vue permettent de séparer conceptuellement puis gérer les trois types de produits de l'A&D : celui **15**) des configurations de la NuclearFacility (concept Configuration), celui **16**) des déchets (concept Waste), et celui **17**) des REX (instances de KnowledgeRepository).

Concernant les autres points de vue, on retrouve :

- des points de vue classiques, que l'on peut en effet retrouver dans de nombreux travaux, permettant de décrire un cycle de vie **6**) (Roques, 2016), un contexte **7**) (Vitech Corp., 2017), des modes opérationnels **8**) (Chapurlat, et al., 2013), la gestion et l'ingénierie des exigences **12**) et **13**) (Lemazurier, 2018), et enfin la gestion des risques **14**) (Hollnagel, et al., 2013) ;
- des points de vue proposés suite à des besoins métiers forts nécessitant l'existence de DSML dédiés, notamment les points de vue de gestion des coûts **9**), du tableau de bord **10**), et de gestion des connaissances **11**).

Le méta-modèle a été réalisé dans l'environnement de développement Eclipse, basé sur le méta-méta-modèle *Ecore*. Il est donc important tout d'abord de préciser plusieurs termes employés dans la suite :

- à chaque concept correspond une classe de concept ou *class* en anglais ;
- un attribut ou *attribute* est une caractéristique de chaque concept ;
- une relation, correspond à une référence ou *reference* en anglais ;
- la cardinalité (0..1, 0..n, 1..n, n..m) correspond aux limites hautes et basses ou *bound* du nombre d'éléments pouvant être référencés par une relation.

La **Figure 25** synthétise l'ensemble des différents points de vue considérés dans notre méta-modèle.

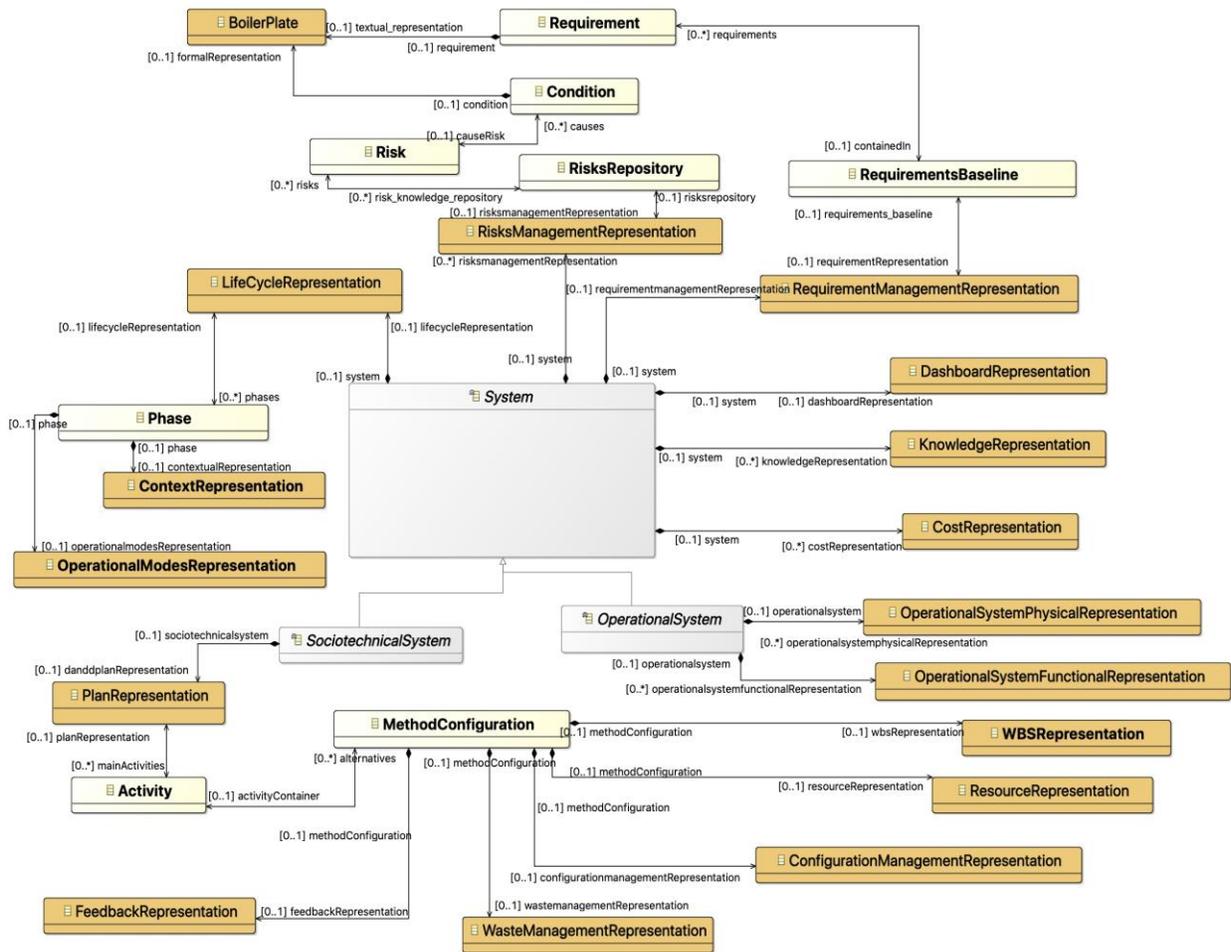


Figure 25 - Les différents points de vue des systèmes et objets de modélisation

3.2.6.2 Vers les DSML

À chaque point de vue va correspondre un DSML dédié. Le méta-modèle décrit donc la syntaxe abstraite de ces DSML. Leur(s) syntaxe(s) concrète(s) et leurs règles de modélisation et de sémantique opérationnelle seront présentées en Chapitre IV. À titre d'exemple, nous présentons la syntaxe abstraite du point de vue des contextes.

Nous choisissons cet exemple, car inspiré et éprouvé dans l'application de démarches d'Ingénierie Système (Collectif AFIS, 2012). Ce point de vue représente à la fois une nouveauté conceptuelle dans l'A&D, et une opportunité pour la démarche d'abstraction visée par les contributions.

C'est cette vue qui notamment offre l'opportunité de réduire les risques d'oubli de parties prenantes et d'interactions entre les systèmes (interfaces, services, flux, liens) de l'environnement des SA&D. La démarche opératoire doit intégrer des approches pour compléter au mieux cette vue, par exemple des brainstormings.

Le point de vue des contextes, présenté **Figure 26** ci-dessous, fait entrer en jeu :

- des systèmes (e.g. un SA&D et l'INB dont il assure le démantèlement) ;
- des interactions entre le système d'intérêt considéré et ces systèmes (e.g. le SA&D écoute, c'est-à-dire retire les couches superficielles, des parois du génie civil de l'INB) ;
- des exigences venant des parties prenantes ou induites de ces interactions (e.g. les exigences de performance liées à l'activité d'écroutage et des contraintes liées à la nature même de l'INB ciblée) ;
- les caractéristiques qui concrétisent les interactions : dont, dans les cas des services, des interfaces (e.g. le protocole d'écroutage qui s'applique à l'INB et dont les opérateurs ont connaissance), des liens (e.g. les opérateurs et les outils d'écroutage utilisés) entre ces interfaces et des flux transportés par ces liens (e.g. les déchets produits, l'énergie électrique nécessaire pour les outils, etc.).

3.2.7 Les concepts et relations

Les concepts et relations dans un méta-modèle sont de deux types : ceux nécessaires à la représentation du métier et du domaine, et ceux nécessaires à la structuration de ces concepts et relations métiers, afin de produire un méta-modèle unique et cohérent. Le lecteur trouvera en **Annexe II** le détail des concepts du méta-modèle point de vue par point de vue.

3.2.7.1 Exemple de concept de structuration : la méta-classe *DAndDPlatform*

Toutes les classes de concepts héritent dans notre méta-modèle d'une méta-classe unique dénommée *DAndDPlatform* (**Figure 27**). En héritant de *DAndDPlatform*, tous les concepts du méta-modèle héritent donc par défaut d'un certain nombre d'attributs et relations que possède *DAndDPlatform*, à savoir :

- *name* (attribut de type *EString*) : nom de l'élément ;
- *uniqueID* (attribut de type *ID*) : identifiant unique de l'élément ;
- *alias* (liste d'attributs de type *EString*) : autres noms possibles de l'élément ;
- *description* (attribut de type *EString*) : texte descriptif de l'élément ;
- *induces* (relation de type *Requirement*) : relation indiquant que l'élément est la base de (et donc contient) une ou plusieurs exigence(s) ;
- *respondsTo* (relation de type *Requirement*) : relation indiquant que l'élément permet de répondre et donc est allouée à une ou plusieurs exigence(s) ;
- *justifiedBy* (relation de type *Justification*) : relation indiquant que l'élément ou les valeurs de ses attributs sont justifiés. Nous avons fait ce choix de modélisation en utilisant ce concept de *Justification* car parfois, un élément d'un modèle est ajouté à celui-ci sans forcément être justifié par une exigence qui requiert son existence. À titre d'exemple, supposons qu'une exigence *E* requiert une performance mesurée par un *Indicator* *I_{requis}* quelconque, et que l'on réponde à cette exigence par une *Activity* *A*, qui possède un *Indicator* *I_{fourni}* respectant les conditions du *I_{requis}*. Une *Justification* *J* reliée éventuellement à un ou des documents *D_n* permettra d'apporter des éléments justificatifs pour montrer que *I_{fourni}* est fiable. Nous verrons dans le dernier chapitre que cela peut être notamment utile pour fiabiliser des données d'entrée des projets.

Ce concept *DAndDPlatform* regroupe donc ces attributs et relations considérés comme communs à tous les concepts métiers, qui héritent ensuite de cette classe mère.

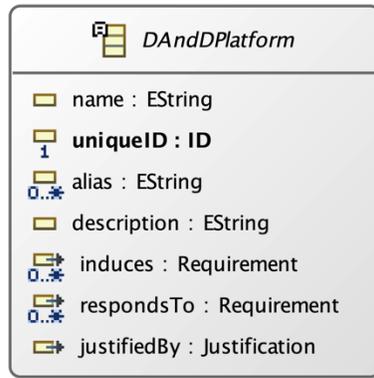


Figure 27 - Le concept de DAndDPlatform

De cette classe héritent à nouveau des classes de concepts qui peuvent être à leur tour structurants ou métiers :

- *StudyManager* (structurant) : nous avons utilisé le *StudyManager* pour décrire des concepts techniques pratiques qui nous permettent de représenter l'espace de conception des systèmes, afin de nous y positionner dedans lors de la réalisation d'un modèle global, de programme, de projet, ou de lot. Ces concepts, contrairement à tous les autres concepts du méta-modèle, ne représentent donc en aucun cas un élément représentatif de ce qu'est ou ce que doit décrire l'A&D d'après notre approche théorique ;
- *System* (structurant) : le concept structurant *System* permet de créer par héritage deux concepts structurants permettant de décrire respectivement des systèmes socio-techniques ou opérationnels. En particulier, un système dit socio-technique est un système qui peut prendre la forme d'un projet décomposé notamment en un ensemble de tâches réalisées avec un ensemble de ressources humaines, matérielles et financières diverses. Il reprend de nombreux concepts de la norme SPEM 2.0, tels que les différents *BreakdownElement* ;
- *ModelingObject* (structurant) : tous les concepts qui héritent de cette classe sont des concepts qui représentent des éléments propres à un système, qui seront donc contenus dans ce système : si le système n'existe plus, ses éléments n'existent plus ;
- *DSLMPPlatform* (structurant) : tous les concepts qui héritent de cette classe représentent des points de vue ;
- *Document* (métier) ;
- *Characteristic* (structurant) : c'est une caractéristique propre à un concept quelconque ;
- *Metric* (métier) : représente une métrique, qui permet d'apporter une dimension à une caractéristique ;
- *Requirement* (métier) : c'est le concept d'exigence, que nous présentons dans la suite ;

- *Event* (métier) : un événement est un élément indépendant de tout autre concept car il peut survenir de manière parfaitement indépendante de tout autre élément des modèles conçus ;
- *Condition* (métier) : fonction booléenne.

3.2.7.2 Exemples de concepts métiers : les différents systèmes mis en jeu

Parmi les systèmes opérationnels, nous considérons les concepts métiers suivants :

- la *NuclearFacility* : correspond à n'importe quelle installation nucléaire évoquée dans notre analyse ;
- le *Site* : c'est le sur-système d'une *NuclearFacility* ;
- le *Perimeter* : c'est le sur-système d'un *Site* ; une instance de *Perimeter* correspondra à un ensemble géographique global intégrant un ensemble de sites nucléaires (des instances de *Site*), sur lesquels se trouvent des installations nucléaires (des instances de *NuclearFacility*) : ce *Perimeter* n'est donc pas à confondre avec ce que le guide n°9 de l'ASN appelle le périmètre d'une INB ;
- le *Component* : c'est une brique de l'architecture organique d'un système opérationnel, dont une instance sera généralement apparentée à un équipement dans le cas d'une installation nucléaire.

Parmi les systèmes socio-techniques, nous considérons les concepts métiers suivants :

- *DAndDSystem* : c'est le SA&D, le Sol de notre méthode ;
- *DAndDLotSystem* : c'est un système qui hérite d'un *DAndDSystem*, mais qui va se concentrer principalement sur un lot (défini par un ou plusieurs *Zone* et/ou par un ou plusieurs *Component*) plutôt que sur une *NuclearFacility* : de fait, il est contenu dans un unique *DAndDSystem* ;
- *Program* : équivalent d'un programme d'A&D ;
- *DAndDStrategicSystem* : c'est le système stratégique de l'A&D ;
- *DAndDGlobalSystem* : c'est le sur-système de notre étude, le système global d'A&D ;
- *RCDSystem* : représente les systèmes pour la reprise et le conditionnement des déchets, importants pour l'A&D car ils entretiennent une relation particulière avec les *NuclearFacility* et les *DAndDSystem*, dont ils sont chargés de la reprise et le conditionnement des déchets ; nous avons donc choisi de regrouper dans un concept à part entière ces systèmes ;
- *Barrier* : c'est un système qui est conçu dans le but d'exclure un risque ou de pallier aux effets d'un *Risk* ; nous l'avons considéré socio-technique mais celui-ci peut être soit l'un soit l'autre ;
- *Interface*, tel que défini dans le tableau plus haut ;

- *ContextSystem* : cette classe correspond à l'ensemble des autres systèmes, qui n'ont pas de justification suffisante pour être considérés comme des concepts spécifiques ; c'est le cas par exemple de l'ensemble des systèmes pour l'exploitation et la maintenance d'une *NuclearFacility*.

3.2.7.3 Détail d'un concept métier entièrement nouveau

Un *DAndSystem*, concept du SA&D possède un certain nombre d'attributs et de relations héritées, qui sont grisées dans la **Figure 28** suivante.

À titre d'exemples, comme tout *System*, le *DAndSystem* contient les nombreux éléments qui le caractérisent, appelés *SystemModelingObject* (qui sont les *ModelingObject* pouvant être contenus dans tous les *System* ; une *Configuration* est un *ModelingObject* propre aux *OperationalSystem* et donc n'est pas un *SystemModelingObject*), dont héritent de nombreux éléments : *Phase*, *Milestone*, *Risk*, etc. De fait, cette relation de contenance est traduite par la relation *system_modeling_objects*, et implique que si le SA&D cesse d'exister, tous les éléments qu'il contient cessent également d'exister. Un *DAndSystem* peut également, comme tout *System*, se décomposer en sous-systèmes ou être intégré à un sur-système (relations *builtIn/builtFrom*), être contributeur d'autres systèmes ou avoir des systèmes contributeurs (relations *enabledSystems/enablingSystems*), et faire partie des systèmes de SLI ou avoir des systèmes de SLI (relations *ilsSystemOf/ilsSystems*).

Autrement, un *DAndSystem* ne possède pas d'attribut propre, et possède uniquement trois relations propres :

- *danddprojectstudymanager* (de type *DAndDProgramStudyManager*) ;
- *nuclearFacility* (de type *NuclearFacility*) : permet de tracer directement les installations nucléaires dont le *DAndSystem* est responsable du démantèlement ;
- *rcdssystem* (de type *RCDSsystem*) : cette relation est la réciproque de la relation qui permet aux *RCDSsystem* de connaître les projets de démantèlement dont ils ont la responsabilité de gérer la prise et le conditionnement des déchets. À noter que nous avons conservé systématiquement les relations réciproques dans le méta-modèle pour une meilleure traçabilité. Cela ne signifie pas que tous les utilisateurs des outils de modélisation pourront accéder ainsi à l'ensemble des modèles interconnectés, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

Nous pouvons enfin évoquer le fait que parfois, certaines relations semblant conceptuellement pertinentes ont été déportées sur des classes mères ou contenant la classe du concept étudié pour des raisons pratiques, comme c'est le cas ici pour la relation avec le programme en charge du projet. En effet, cette relation est traduite dans notre méta-modèle par la relation entre *DAndDProgramStudyManager* (contenant un unique *Program*) et *DAndDProjectStudyManager* (contenant un unique *DAndSystem*).

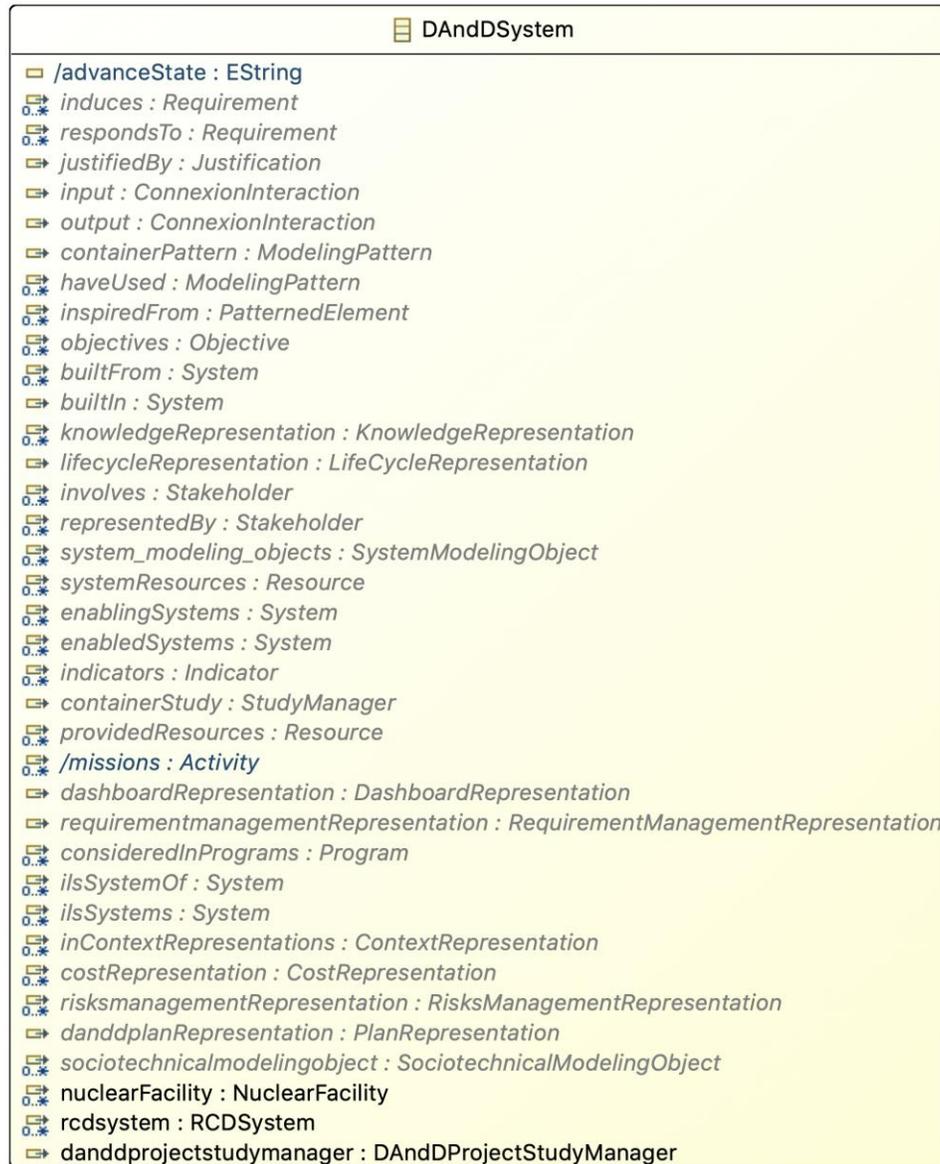


Figure 28 - Le concept de *DAndDSystem*

3.2.7.4 Détail d'un concept métier issu de SPEM adapté à notre méta-modèle : la *MethodConfiguration*

Une *MethodConfiguration* (**Figure 29**) représente une alternative possible à une *Activity*. Une *Activity* pouvant elle-même être décomposée en plusieurs *Activity*, et ainsi de suite, (du fait qu'elle peut contenir des *BreakdownElement*, dont *Activity* hérite), nous pouvons grâce aux *MethodConfiguration* construire ce que l'on appelle des scénarios de démantèlement, dans le but par la suite de les évaluer (en fonction de différents critères : réponse aux exigences, indicateurs de performance pouvant être associés à ses différents éléments comme les ressources technique et humaines engagées ou encore les coûts, etc.).

Pour ce faire, la *MethodConfiguration* possède plusieurs attributs booléens (vrai ou faux) propres importants afin de connaître son état :

- *validated* : indique si l'alternative est valide au sens qu'elle répond à toutes les exigences, mais n'a pas forcément été retenue car elle répond moins favorablement aux exigences de performance qu'une autre alternative ;
- *active* : signifie que cette alternative d'activité est en cours de réalisation ;
- *isChecked* : indique que l'alternative a été étudiée et évaluée dans sa conception à un moment t donné, mais n'est pas forcément validée ;
- *retained* : indique que l'alternative a été retenue dans la conception.

À noter qu'il est *a priori* incohérent d'avoir une instance de *MethodConfiguration* *active* si elle n'est pas *retained*, incohérent d'avoir une instance de *MethodConfiguration* *retained* si elle n'est pas *validated*, et enfin incohérent d'avoir une instance de *MethodConfiguration* *validated* si elle n'est pas *isChecked*.

Enfin, il est important de noter que le concept de *MethodConfiguration* se généralise à l'ensemble des *Activity* de n'importe quel système.

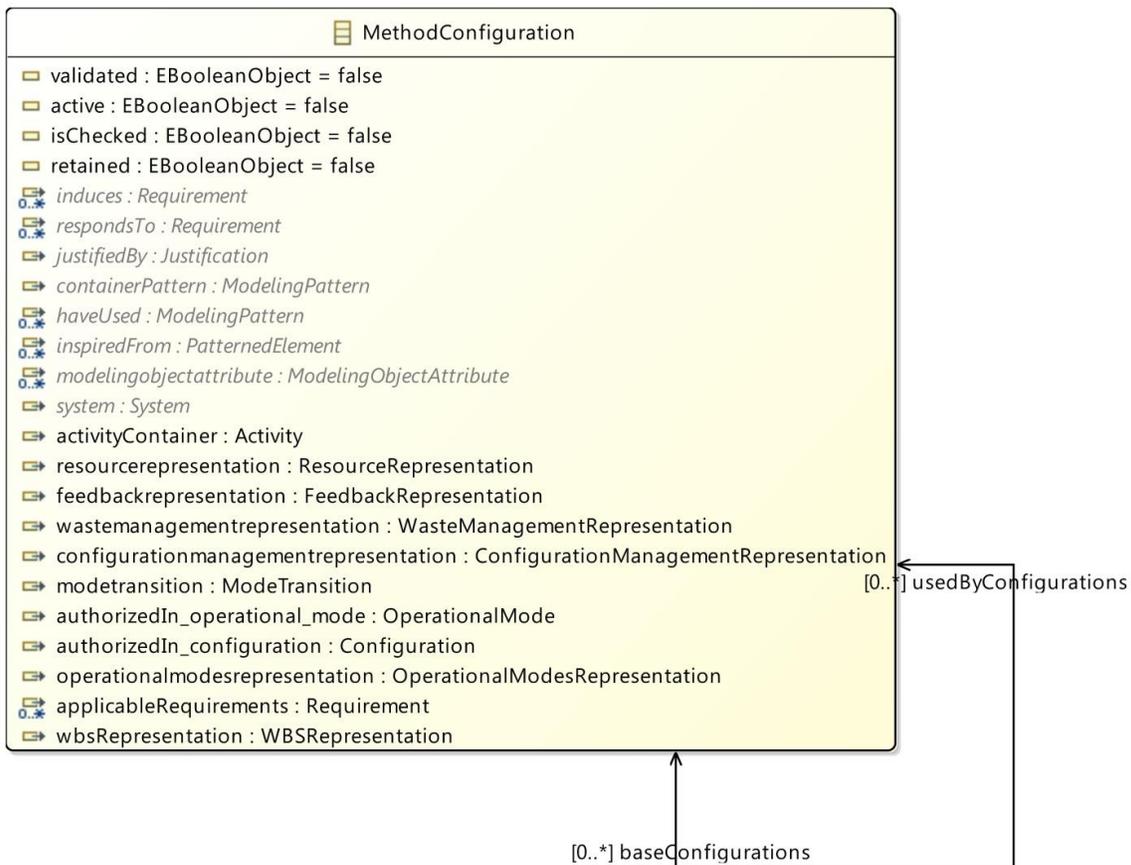


Figure 29 - Le concept de *MethodConfiguration*

3.2.7.5 Détail de deux concepts métiers issus de méthodes éprouvées de l'IS, et adaptés à notre contexte : Requirement et Risk

Les concepts d'exigences et de risques sont primordiaux car ils occupent une position centrale dans les modèles.

Le concept de *Requirement* (**Figure 30**) reprend la classique définition d'une exigence. Il inclut également l'idée de besoin exprimé par une partie prenante, souvent interprétable en premier lieu et nécessitant d'être ensuite raffiné (relation *refinesTo*) pour réduire le risque d'ambiguïté. Il est important de noter qu'une exigence peut être induite (relation *inducedBy*) par n'importe quel concept du méta-modèle (N.B. : si c'est une exigence qui *refinesTo* une autre exigence, alors la seconde est *inducedBy* la première), tout comme n'importe quel concept du modèle peut répondre à cette exigence et y être allouée (relation *basisOf*).

Une *Requirement* va être modélisé sous la forme d'un DSML textuel nommé *BoilerPlate*, qui va être composé d'une partie textuelle fixe et d'une partie textuelle variable, cette partie textuelle variable permettant de référencer et donc tracer d'autres éléments du modèle, ce qui pourra être utile pour la vérification automatique d'exigences (Lemazurier, 2018).

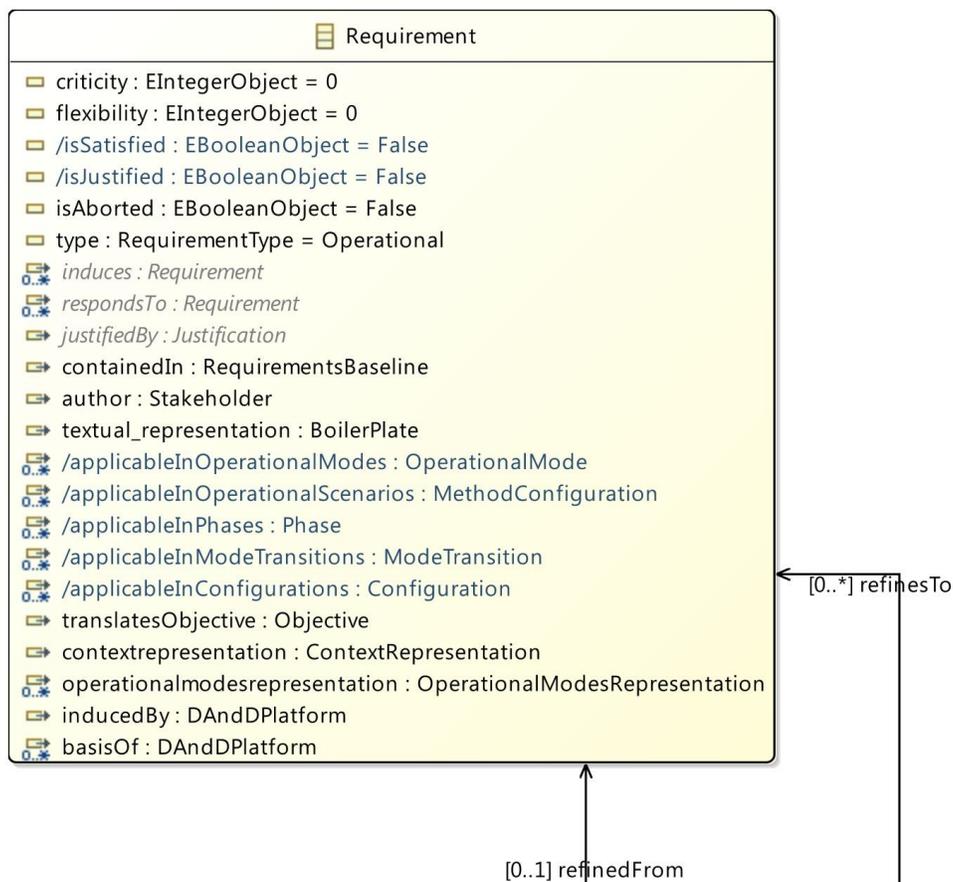


Figure 30 - Le concept de *Requirement*

Le concept de *Risk* (**Figure 31**) est intéressant ici car il est dans le domaine de l'A&D au cœur de processus bien distincts mais pourtant tous deux essentiels : la gestion des risques projet et la gestion des risques opérationnels (de sûreté/sécurité/etc.). Le DSML permettant de régir cette gestion des risques est un exemple typique de DSML qui doit faire l'objet de plusieurs syntaxes concrètes pour gérer cette différenciation, mais dont le méta-modèle illustre bien l'unicité de sa syntaxe abstraite.

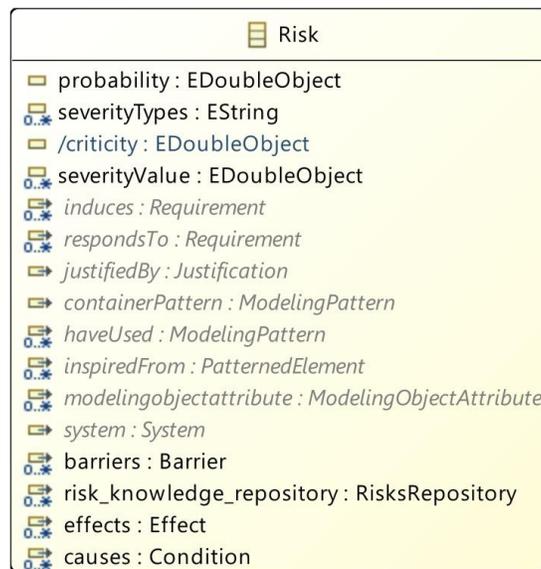


Figure 31 - Le concept de *Risk*

3.2.8 Qualités essentielles du méta-modèle

3.2.8.1 Possibilité de travailler par niveaux d'abstraction (problème/solution)

Le méta-modèle prend en compte les notions de domaines du problème (ou du besoin) et de domaine de la solution, importants dans la démarche d'IS (Collectif AFIS, 2012) consistant à s'abstraire (par l'analyse de multiples points de vue) avant de se recentrer (sur les solutions), pour éviter tout blocage et tout oubli lors de la réalisation.

Cette capacité d'abstraction passe notamment par la différenciation inspirée de SPEM entre *Definition* et *Use*, sur un certain nombre de concepts (tâches, rôles, produits, etc.). Cela se traduit, pour donner un exemple, par le fait qu'une *Qualification* va être requise d'une part par une *TaskDefinition* (domaine du problème), et d'autre part fournie par un *RoleUse* puis utilisée lors d'une *TaskUse* (domaine de la solution).

L'intégration du point de vue contextuel dans le méta-modèle permet également de mieux définir le domaine du problème pour chaque projet d'A&D, en approfondissant davantage l'étude des interactions avec l'ensemble des parties prenantes, induisant besoin et contraintes, et donc des exigences.

3.2.8.2 Méta-modèle unique induisant l'interopérabilité des modèles

L'unicité du méta-modèle :

- facilite la traçabilité de l'impact des modifications de DIC communes ;
- permet de faire des analyses de sensibilité sans pertes sémantiques (e.g. pas de transformation ni d'alignement de modèles requis pour ces analyses) ;
- permet des simulations multi-vues, et la mise en œuvre d'outils de preuve, par la production de règles formelles de sémantique opérationnelle.

3.2.8.3 Méta-modèle transposable à d'autres cadres que le CEA, et pérenne

Le caractère transposable et pérenne du méta-modèle se prouve par plusieurs choix :

- la décomposition en sous concepts : par exemple le découpage en sous-systèmes. Si les projets de démantèlement se décomposent autrement qu'en lots à l'avenir, on pourra toujours modéliser ces projets en conservant les mêmes concepts et le même méta-modèle ;
- le concept *ModelingObjectAttribute* : il permet d'ajouter n'importe quelle caractéristique en cas d'absence dans le modèle générique ;
- la cardinalité non limitante : le nombre de *DAndDSystem* applicables à la même *NuclearFacility* n'est pas restreint, ni le nombre de missions (*Activity* de plus haut niveau), le nombre d'objectifs, etc. Par exemple, il est possible de réautoriser plusieurs démantèlements successifs pour une même installation nucléaire et donc plusieurs SA&D ;
- la non spécificité des points de vue à chaque classe héritant de *System* : en effet, bien que le concept de *MethodConfiguration* ait été adopté en raison de la nécessité de pouvoir modéliser des alternatives de scénarios de démantèlement pour un *DAndDSystem*, n'importe quel *SocioTechnicalSystem* peut voir ses activités et sous-activités modélisées sous plusieurs alternatives. Par exemple, plusieurs choix de stratégies d'A&D au niveau global d'un exploitant d'installations nucléaires. On pourrait également imaginer, comme autre exemple, qu'un programme d'A&D (*Program*) ait à gérer des configurations d'un site nucléaire (*Site*) : nous avons donc décidé de ne pas restreindre les points de vue à chaque classe de *System* mais d'autoriser par exemple n'importe quel système socio-technique à gérer des configurations de systèmes opérationnels ;
- la possibilité de générer des types, quels qu'ils soient, c'est à dire d'avoir parfois créé des classes plutôt que des attributs : par exemple concernant les indicateurs de performances qui ne sont aujourd'hui pas consensuels. Nous utiliserons donc dans ce cas la classe *Indicator*, plutôt que de figer dans le méta-modèle dès maintenant les *Indicator* jugés les plus pertinents en référence à chaque concept ;

- la capacité à modéliser de manière souple, sans ordre figé : ce point a du être géré selon les règles de l'outil EMF, utilisé pour construire le méta-modèle, et il pourra être amplifié ou réduit selon la façon de développer l'outil de modélisation qui sera finalement manipulé (accès aux vues notamment) ;
- possibilité de découper les projets selon plusieurs angles différents : par exemple le découpage en lots « géographiques » ou en lots « équipements ».

L'intemporalité et le caractère transposable, notamment en octroyant plus de liberté aux modélisateurs, permettent de vérifier l'hypothèse initiale qui consistait à dire qu'en s'intéressant au contexte français, les éléments spécifiques à d'autres contextes s'appliqueraient également dans le cadre du méta-modèle, qui donc, de fait, remplit théoriquement sa mission de généralité.

3.2.9 Conclusion de l'approche conceptuelle

Nous constatons aujourd'hui une grande diversité d'installations nucléaires et donc de systèmes d'intérêts du démantèlement. Nous constatons également que les techniques et les stratégies de démantèlement varient d'un exploitant à l'autre et évoluent dans le temps, avec des états finaux pouvant potentiellement être très différents d'une installation à l'autre selon les spécificités de chacune d'entre elles.

Le méta-modèle proposé permet d'identifier les concepts importants mis en jeu, leurs attributs et les relations systématiques existant entre eux. Il est maintenant proposé d'enrichir ce méta-modèle avec un mécanisme de modélisation basé sur des patrons.

3.3 Des patrons de modélisation au service du Référentiel Méthode

Comme nous l'avons dit, le méta-modèle présente les concepts, attributs et relations entre concepts jugés nécessaires ici pour la modélisation des projets d'A&D et donc particulièrement de n'importe quel SA&D. Celle-ci consiste donc à instancier, c'est-à-dire créer un élément de modèle à partir d'un des concepts, puis relier et renseigner tout ou partie de ces éléments selon le type du projet, sa cible, etc. À titre d'exemples, cette instanciation va donner :

- *Nuclear Facility* → INB 32 – ATPu, qui est une des deux installations nucléaires concernées par le chantier pilote présenté en Chapitre V ;
- *DAndDSystem* → Projet de démantèlement CFCa (Complexe de Fabrication de Cadarache), qui est le projet associé au chantier pilote présenté en Chapitre V.

Cette modélisation peut s'avérer fastidieuse. Un raisonnement simple du type « *je dois modéliser tel élément, je le modélise en instanciant ces concepts et en les renseignant* » requiert en effet du temps, un niveau de connaissances et un niveau d'abstraction difficilement maîtrisables par n'importe quel responsable de projet. Le méta-modèle proposé a évidemment

pour principal avantage de structurer et de guider ce responsable pour modéliser son projet. Plusieurs difficultés limitent pourtant son usage. À titre d'exemple, il peut s'avérer nécessaire de modéliser des interactions avec des organismes réglementaires et normatifs. Cela implique de prendre en compte plusieurs exigences (e.g. émanant de l'ASN ou de l'ANDRA). Celles-ci peuvent être évidemment communes à d'autres projets, et certaines peuvent avoir déjà été modélisées. De même, modéliser des techniques et solutions d'A&D éprouvées (mousses, écouteur, découpe laser, etc.) donne, ici aussi, des modèles communs, même partiels, pouvant quand même être utiles et partageables par plusieurs projets. Nous proposons une aide à la modélisation, par des principes de réutilisation totale ou partielle de certains modèles, considérés comme suffisamment éprouvés, voire même validés en situation, qu'il serait donc inutile et pesant de devoir reformuler.

Les exigences évoquées ci-dessus sont en effet liées à des interactions, valides dans certains contextes, avec des systèmes à l'interface. Ces interactions font apparaître, entre autres, des services dont le SA&D a besoin pour remplir sa mission (services entrants) ou rendus par le SA&D au titre même de cette mission (services sortants). Chaque service pourra donc induire une ou plusieurs exigences telle que « Respecter l'ensemble des dispositions et exigences réglementaires associées au Titre IX du Livre V du Code de l'environnement ». Il convient alors de modéliser puis de mettre à disposition des différents responsables de projets différents un modèle, jugé suffisant, du système législatif français (avec lequel chaque SA&D sera en interaction), en y associant les différents documents du code de l'environnement, etc. Lorsqu'une exigence évoluera dans le Titre IX du Livre V du code de l'environnement portant sur la sécurité nucléaire et les installations nucléaires de base, l'ensemble des SA&D échangeant le service pourront alors tracer cette évolution et impacter les projets.

De même, le second exemple évoqué ci-dessus concerne les techniques et solutions d'A&D éprouvées. Il est nécessaire de partager et de réutiliser les connaissances liées à ces techniques, par exemple, celles issues de retours d'expérience.

La durée du processus de modélisation, jugée souvent critique, peut être raccourcie. De même, les risques encourus dans le domaine de l'A&D deviennent plus facilement cernables et donc maîtrisables. Pour cela, nous proposons donc, premièrement, d'adopter et d'adapter la notion de *Design Pattern* (patron de conception, ou patron de modélisation dans la suite) à notre méthode, et, ensuite, de définir les mécanismes pour gérer cet aspect de partage puis de réutilisation de modèles, facilitant la propagation et la traçabilité des évolutions, notamment des exigences.

3.3.1 Qu'est-ce qu'un patron de modélisation ?

Un patron de modélisation consiste ici en un artéfact de modélisation d'un objet, par exemple, d'un phénomène, d'un point de vue ou d'un système, à un niveau de détail et pour des objectifs définis de représentation puis d'analyse de ce phénomène, de ce point de vue ou de ce

système. Cet artéfact est jugé pertinent ou, *a minima*, suffisamment informatif, pour guider et soutenir l'effort de modélisation puis d'analyse des modèles établis pendant la construction d'un projet d'A&D.

Un patron de modélisation est donc, en quelque sorte, une réponse à plusieurs questions que se pose le responsable d'un projet :

- quelqu'un a-t'il déjà procédé à, puis proposé, une modélisation d'un objet évoquant celui sur lequel je me concentre et dont j'ai besoin ?
- le résultat de cette modélisation a-t-il été testé et éprouvé ? Est-il jugé satisfaisant et est-il argumenté pour être utile et directement réutilisable ? Me donne-t-il des connaissances intéressantes sur ce qu'il vaut mieux tenter ou, *a contrario*, ne pas tenter, autrement dit est-il une source d'inspiration valable ?
- comment cette solution peut-elle alors m'aider, moyennant une adaptation ou un paramétrage, ou m'inspirer pour modéliser, en confiance et plus rapidement, tout ou partie de mon projet d'A&D ? En effet, un patron de modélisation n'a pas forcément pour vocation à être utilisé dans une approche de type « copier / coller ».

Dans le cas de la méthode considérée dans ces travaux, un patron se doit, par hypothèse, d'être conforme au méta-modèle présenté plus haut. Cette hypothèse permet d'éviter les problèmes classiques d'alignement de modèles d'un point de vue syntaxique comme sémantique, et facilite donc le besoin même de réutilisation.

Créer puis manipuler (intégrer, adapter, tracer, etc.) un ensemble de patrons de modélisation permet donc de construire une partie importante du Référentiel Méthode puis d'irriguer le processus de modélisation. Nous sommes ici dans une stratégie dite de *modélisation guidée* considérée comme une des quatre stratégies possibles de vérification et de validation de modèles de systèmes complexes (Nastov, et al., 2017).

À titre d'exemple (**Figure 32**), un responsable se demande, en premier lieu, quelle est l'installation nucléaire qu'il doit mettre hors service. S'il répond « réacteur », il devra alors rechercher puis sélectionner un patron parmi ceux correspondant à sa requête d'aide. Il s'agit donc ici de donner accès à différents patrons présents dans le référentiel Méthode, décrivant les éléments communs concernant tous les réacteurs, et leurs équivalents, mais aussi des modèles réputés incompatibles ou inutilisables dans son cas de figure.

En avançant et précisant alors sa requête, ce responsable projet va pouvoir disposer de patrons plus détaillés d'installations raffinant en quelque sorte (en termes de détail, de précision ou d'adéquation aux objectifs de ce responsable projet) le patron de « réacteur ». Par exemple, un réacteur de type « REP » (Réacteur à Eau Pressurisé) peut faire l'objet de plusieurs autres patrons requis, par exemple les composants d'un REP.

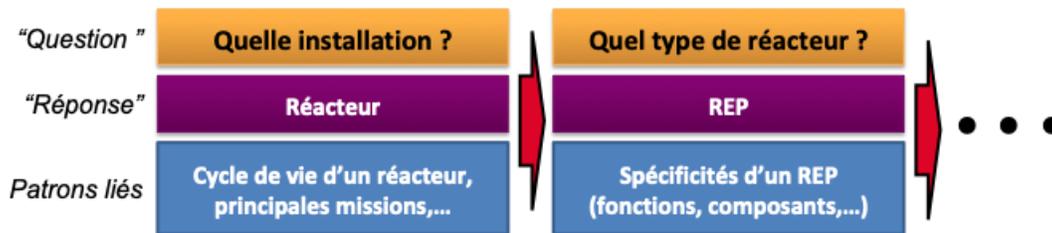


Figure 32 - Exemple de démarche de modélisation guidée par les patrons

On retrouve bien ici la dimension de niveaux d'instanciation proposée par le standard GERAM (IFIC, IFAC, 1999). À noter par ailleurs que la dimension holistique de GERAM sera traitée grâce aux différents points de vue, et que la troisième dimension, temporelle, sera considérée via la décomposition en phases du cycle de vie, et en activités et tâches séquencées.

3.3.2 Formalisation du concept de Patron et de ses mécanismes de gestion

Les concepts et les relations sur lesquels reposent les mécanismes de création et de manipulation des patrons de modélisation sont totalement intégrés dans le méta-modèle (**Figure 33**). Ces concepts sont :

- *ModelingPattern* : il suit la définition vue plus haut, en tenant compte des relations entre patrons présentées plus bas ;
- *PatternManager* : de la même façon que les *StudyManager* le sont pour un programme, un projet, etc., le *PatternManager* est un espace de travail qui regroupe les fonctionnalités et mécanismes de gestion des patrons de modélisation de leur conception jusqu'à leur obsolescence ;
- *PatternedElement* : un *PatternedElement* correspond à toute instance de concept du méta-modèle qui doit pouvoir être partageable et réutilisable (e.g. un système, un point de vue, un objet de modélisation, ou une métrique peuvent s'avérer être communs à plusieurs projets), et donc peut faire l'objet d'un patron de modélisation ;
- *PatternState* : il définit l'état de maturité du patron.

Afin de créer un patron de modélisation, il s'agira d'instancier la classe *ModelingPattern* (qui hérite donc directement de *DAndDPlatform*). Il s'agit donc d'instancier un ou plusieurs concept(s) héritant de la classe *PatternedElement*, instance(s) qui sera(ont) contenue(s) dans l'instance du *ModelingPattern* via la relation *patternedElements*.

Pour simplifier la gestion des patrons de modélisation, une instance de *PatternManager* contient tous les patrons de modélisation et les relations établies entre eux. Ces relations sont :

- deux patrons sont équivalents (relation *equivalentPatterns*) : cette relation signifie que deux patrons de modélisation, bien que différents par exemple par certains de leurs attributs (on pourra citer l'exemple de deux patrons utilisant deux langues différentes), modélisent la même chose sémantiquement parlant et sont donc interchangeables ;
- deux patrons sont incompatibles (relation *antiPatterns*) : cette relation signifie que si les deux sont utilisés dans un même modèle, il y a de très fortes chances que le modèle final soit faux ;
- deux patrons sont associés (relation *relatedPatterns*) : cette relation signifie que l'utilisation d'un de ces patrons nécessiterait normalement d'utiliser le ou les patron(s) qui lui est (sont) relié(s) ;
- un patron est requis par un autre (relation *requests*) : cette relation signifie que l'utilisation (import) d'un patron de modélisation, requiert d'autres patrons, qui correspondent à des éléments contenus dans l'élément du patron importé (exemple : un patron de *SystemModelingObject* peut être requis par un patron de *System*). Ils seront par hypothèse importés automatiquement quitte à supprimer ou réécrire ensuite des parties spécifiquement (ce choix technique sera détaillé dans le Chapitre IV) ;
- un patron raffine un autre patron (relation *refines*) : cette relation signifie une amélioration du niveau de détail ou de précision. À titre d'exemple, dans la Figure 32, le patron « REP » raffine le patron « Réacteur » ;
- un patron est une version antérieure à un autre (relation *previousVersion*) : permet une traçabilité lors du versionnement d'un patron.

Enfin, les mécanismes de gestion des patrons ont été implémentés dans le démonstrateur présenté Chapitre IV.

À titre d'exemple, on peut constater que le cycle de vie générique pour une INB proposé en **Figure 18** dans notre approche conceptuelle peut alimenter le Référentiel Méthode en devenant donc un patron de modélisation de cycle de vie, *requestedBy* le patron d'une INB, qui lui-même peut être *refinedBy* le patron « Réacteur » (**Figure 34**). Ce patron est implémenté Chapitre IV.

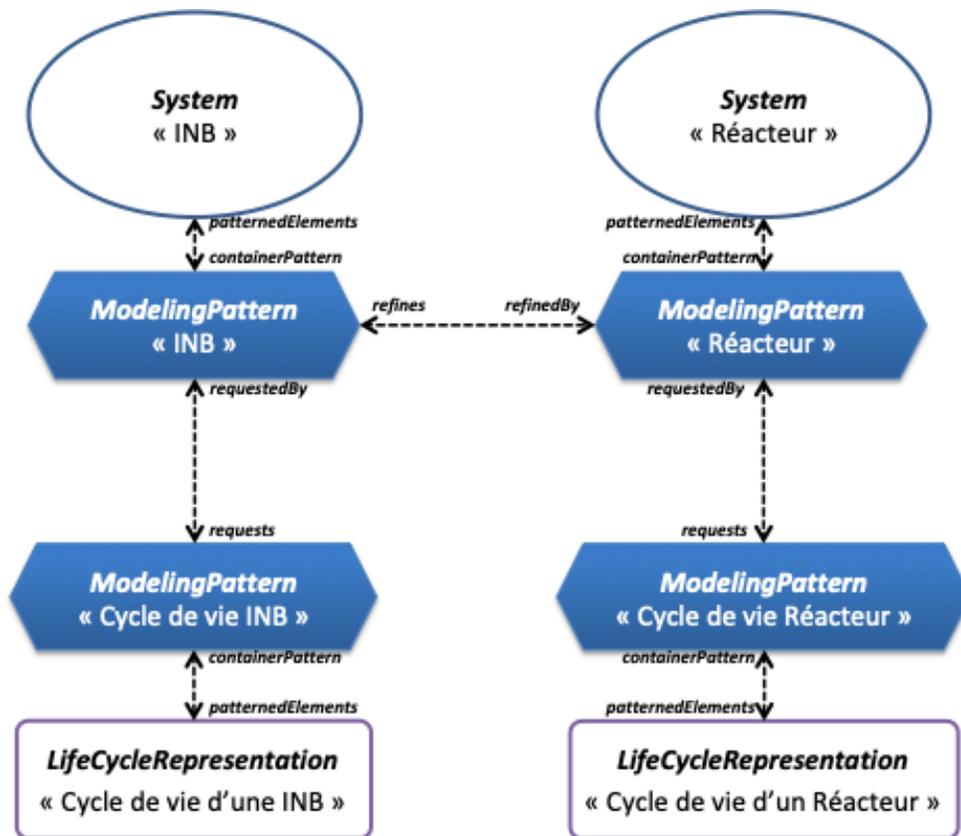


Figure 34 - Exemples de patrons de modélisation et leurs modèles associés, avec quelques exemples de relations entre ces patrons (par souci de lisibilité, les phases et jalons ne sont pas représentés)

3.3.3 Conclusion

En capitalisant les connaissances, les patrons de modélisation représentent un excellent outil pour alimenter le Référentiel Méthode puis irriguer à bon escient le processus de modélisation (Figure 35) qui représente une part importante de la démarche opérationnelle présentée ci-après.

Néanmoins, pour posséder des patrons de modélisation nombreux, pertinents et d'usage avéré, il est important de souligner l'importance d'une ontologie de référence de l'A&D. Pour cela, les nombreux outils existant présentés dans l'état de l'art vont être particulièrement utiles. C'est par exemple le cas des travaux présentés par (Plana, et al., 2018), qui par des outils de *text mining* et de *deep learning* visent à extraire puis valoriser des connaissances issues de corpus documentaires anciens mais très volumineux. Les patrons de modélisation, dans ce cas précis, représentent un excellent moyen de formater des connaissances collectées.

En définitive, l'ensemble des travaux réalisés dans le but de valoriser des données et informations en connaissances, qui sont très nombreux en ne prenant que l'exemple du CEA, créent une base de connaissance que nous proposons alors de représenter, certes partiellement, sous forme de patrons.

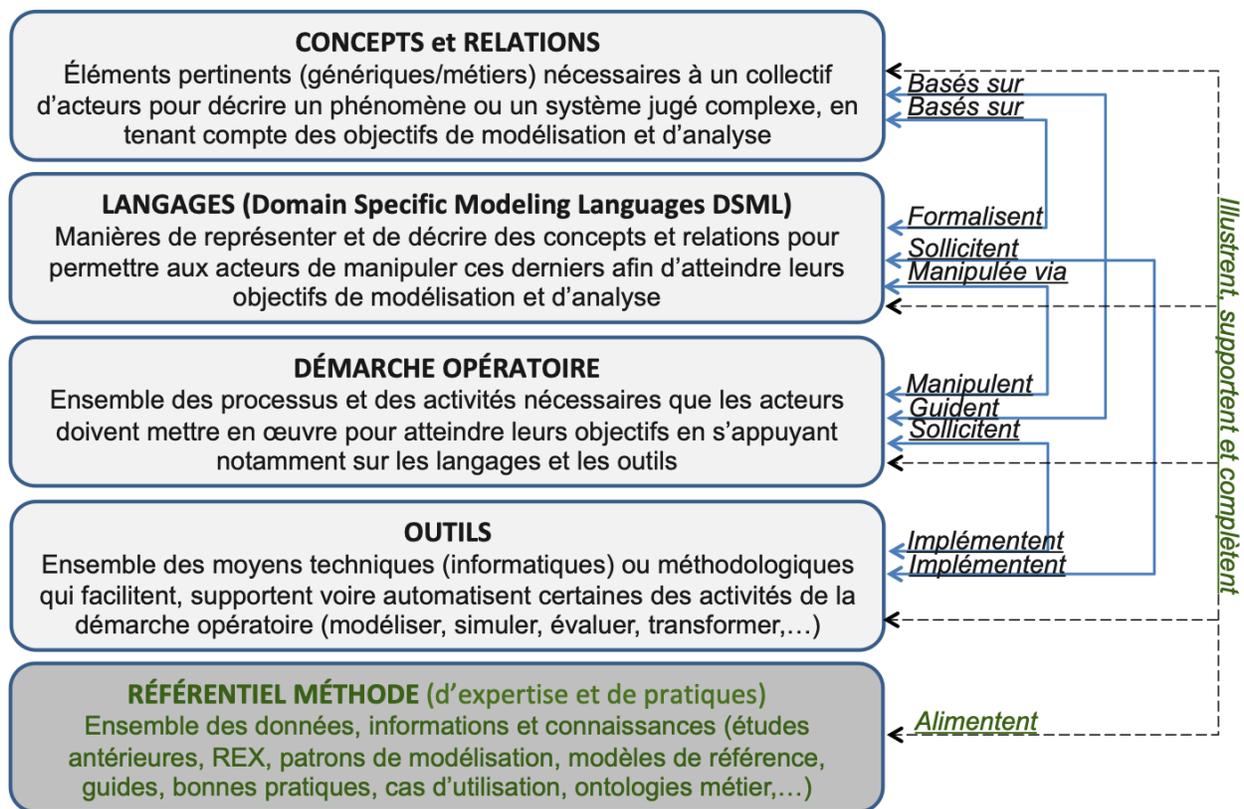


Figure 35 - Apport des patrons de modélisation sur le Référentiel Méthode

3.4 La démarche opératoire de la méthode

La démarche de modélisation proposée dans ces travaux de thèse va consister à créer une instance d'un SA&D pour chaque projet d'A&D à partir du concept de *DAndDSystem* (concept du méta-modèle), puis à l'enrichir et le préciser itérativement, en travaillant vue par vue, et en respectant l'hypothèse de conformité au méta-modèle établie plus haut.

Afin de comprendre où se situent ces modèles de projets, et reprenant la **Figure 12** présentée dans le Chapitre II, nous conservons bien deux niveaux d'abstraction dans la modélisation au sens du MOF (OMG, 2016). Un « niveau » de modèles intermédiaires, représenté par les patrons de modélisation (**Figure 36**), s'avère cependant nécessaire. Celui-ci ne présente pas un niveau supplémentaire d'abstraction car ces patrons vont être des modèles instanciés directement depuis le méta-modèle, c'est à dire conformes à ce dernier, tout comme les modèles de projet. Comme décrit précédemment, ils sont ensuite mis à disposition du responsable de projet pour s'en inspirer et les intégrer comme des parties de modèles existantes, suivant donc la démarche de modélisation guidée évoquée plus haut.

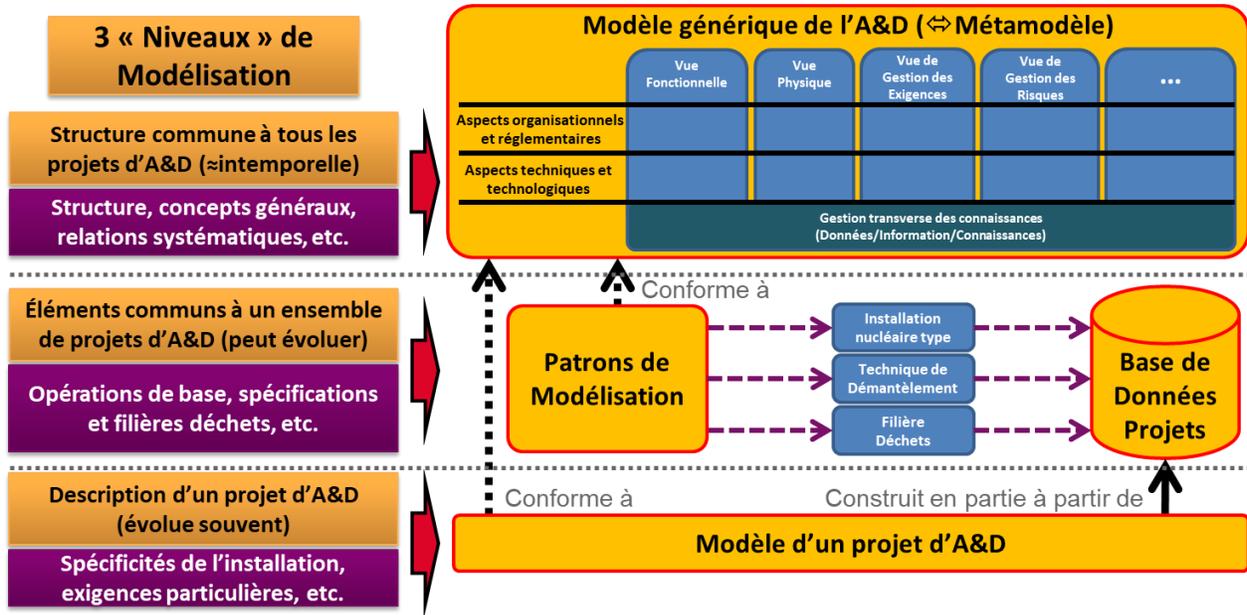


Figure 36 - Les différents « niveaux » de modélisation proposés par la méthode

La démarche opératoire est un processus qui combine des activités de modélisation, de vérification et de validation, de manière itérative et collaborative afin d'impliquer toutes les parties prenantes. Elle doit conférer au projet un niveau de confiance accru et un temps de mise en œuvre réduit. Elle doit ensuite permettre aux responsables de suivre et de gérer de manière dynamique leur projet au fil du temps, par exemple en fonction des aléas. Cela nous a donc amené à étudier la démarche opératoire de la méthode par le biais de deux phases de conception puis d'exécution, que nous nommerons respectivement « *Design Time* » et « *Run Time* », étant séparées par un jalon de validation de la conception initiale, comme synthétisé dans la Figure 37.

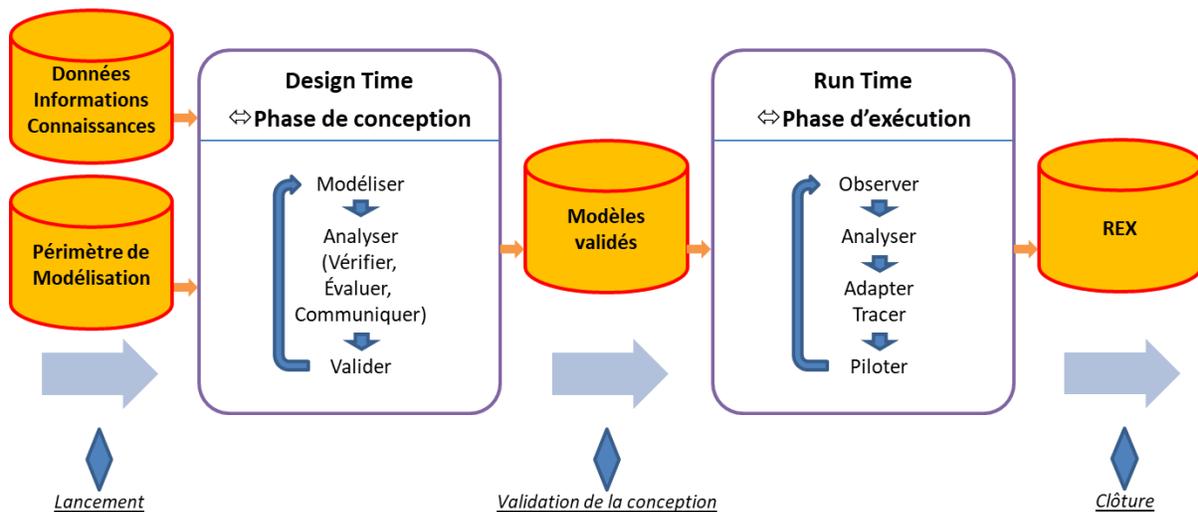


Figure 37 - Processus de conception et d'exécution de la démarche opératoire

3.4.1 Une phase de conception : le « *Design Time* »

3.4.1.1 Une phase de conception guidée par la notion de système de systèmes

La notion de système de systèmes nous a permis de mieux appréhender la phase de conception des projets d'A&D et donc du SA&D, notamment en identifiant la nécessité d'adopter des démarches agiles de validation avec l'ensemble des parties prenantes concernées, ou encore la nécessité du caractère itératif de la démarche de conception.

Le « *Design Time* », correspond donc à une phase pendant laquelle le SA&D est décrit et caractérisé tel que prévu ou souhaité, simulé et validé progressivement et itérativement jusqu'à ce qu'il soit jugé acceptable par toutes les parties prenantes, y compris, entre autres, par l'autorité de sûreté, l'exploitant, les maîtres d'œuvre et le responsable du projet. Le concept de système de systèmes est ici crucial pour obtenir une représentation à la fois statique et dynamique du SA&D. En effet, les simulations et les analyses effectuées permettent de prévoir et donc d'anticiper certaines évolutions, d'évaluer les risques, etc. Les principales activités du « *Design Time* » sont :

- la modélisation, en prenant en compte les principes du système de systèmes, avec saisie des données, informations et connaissances nécessaires, formatage, nettoyage, etc., et utilisation de patrons de modélisation ;
- l'analyse itérative du modèle de SA&D pour prendre en compte la maturité croissante du projet, c'est-à-dire :
 - vérifier la cohérence des modèles et des données, informations et connaissances au regard des objectifs et des exigences du projet, ainsi que le respect des règles de construction des modèles ;
 - évaluer les effets de la propagation de diverses modifications et la sensibilité de tout ou partie des modèles du projet à ces modifications. Cela induit par exemple la possibilité de simuler des événements pour aider à percevoir les effets secondaires ;
 - communiquer et expliquer aux parties prenantes.
- la validation progressive avec les parties prenantes (validation agile) pour évaluer la relative exhaustivité et la pertinence de ces modèles jusqu'à ce que les niveaux requis de sûreté et de sécurité soient atteints et que les délais et les coûts soient jugés acceptables et partagés par toutes les parties prenantes.

3.4.1.2 Peut-on préconiser des règles métiers qui régissent la démarche ?

Aujourd'hui, en prenant l'exemple du CEA, la première étape d'élaboration d'un projet de démantèlement consiste systématiquement par des questions de base :

- Quel est l'état initial de l'installation avant les opérations (i.e. les configurations passées et la configuration actuelle, les modes passés et actuels, les niveaux et caractéristiques de l'activité, les données répertoriées, les possibles REX qui semblent pertinents, ...) ? Il est primordial de se mettre d'accord sur les différents paramètres à considérer pour décrire cet état initial : configuration, modes, niveau, caractéristique, activité résiduelle, etc. ;
- Quelle est la fiabilité des données disponibles qui définissent cet état ? Plus précisément, quels sont les éléments justificatifs qui permettent de s'assurer que cet état initial formalisé est bien le « bon » c'est-à-dire représentatif de la réalité ? Faut-il prévoir de nouvelles investigations pour conforter la vision globale et l'état initial de l'installation ? Ou valider simplement les données sans faire de nouvelles investigations (procéder par expertise, par simulation, etc.) ?
- Quelle est la fiabilité des systèmes qui ont permis de générer (e.g. systèmes de mesure et d'investigation), de stocker (e.g. systèmes d'informations, de sauvegarde, documents papiers...) et de sécuriser ces données ?
- Les données disponibles sont lacunaires, elles ne suffisent jamais ; il faut donc aller chercher d'autres données : lesquelles ? Où ? Comment ? Avec quels moyens ? Quels sont les risques ? Etc.

Cet état initial, dont la modélisation peut s'avérer complexe, va également contraindre le SA&D dans son entier, notamment la réalisation des opérations et l'état final attendu. Il va donc falloir manipuler et respecter des exigences provenant de très nombreuses sources (contraintes liées à l'état final, à l'état initial, au cadre réglementaire, etc.) pouvant parfois être en contradiction apparente ou réelle, pour proposer des solutions. Chaque solution induira de fait de nouvelles exigences. Posséder un référentiel structuré des exigences applicables à chaque SA&D (et donc à chaque élément de celui-ci), puis ensuite pouvoir à tout instant tracer et vérifier celui-ci, est donc primordial. Nous proposons en outre ici de modéliser les contextes de manière la plus détaillée possible afin d'augmenter le travail de conception du domaine du problème (i.e. se poser la question : « quels paramètres, quelles parties prenantes, quelles exigences dois-je prendre en compte dans mon démantèlement ? »), et donc également de minimiser les risques d'oublis.

Un scénario de démantèlement efficace consiste à supprimer au plus vite les sources de risques (dont sources radioactives), qui nécessitent de la surveillance et des investigations continues. C'est en quelque sorte des bonnes pratiques qui apparaissent ici :

- éliminer en priorité les procédés qui nécessitent de la surveillance coûteuse : on pourra simplifier l'INB (exemple : enlever des capteurs qui deviennent non nécessaires) et économiser sur cette surveillance ;
- éliminer également en priorité les zones qui nécessitent une mise aux normes.

On peut donc préconiser une priorisation des activités. Cela passera dans notre méthode par l'importance du concept d'*Indicator*, dont le suivi et la hiérarchisation (qui se fera via des exigences diverses, souvent émises en contrainte par des systèmes à l'interface, tels que la minimisation des coûts, délais, déchets, dose, ou priorisation du TSM, etc.) impactera la façon de modéliser les scénarios de démantèlement.

3.4.2 Une phase d'exécution : le « *Run Time* »

3.4.2.1 Description de la phase

Le « *Run Time* » correspond aux moments au cours desquels le projet est examiné et éventuellement mis à jour et complété en fonction des nouvelles données, informations et connaissances acquises après la validation initiale de la conception. Au cours de cette phase, le projet est exécuté et piloté logiquement jusqu'à ce que le déclassement souhaité de l'installation nucléaire, le contrôle final des déchets de démantèlement, et la clôture du projet incluant la capitalisation du REX, soient terminés. Les concepts de système de systèmes et de workflow adaptatif trouvent ici toute leur légitimité en prenant en compte et en contrôlant mieux la dynamique d'un système par nature complexe et soumis à des contraintes strictes. Les principales activités du « *Run Time* » sont les suivantes :

- L'observation de la situation et la collecte de données, d'informations et de connaissances depuis le terrain des opérations ;
- L'évaluation de la situation et la détection de dérives potentielles conduisant à des risques et / ou au non-respect des exigences ;
- L'adaptation du SA&D dans son ensemble et éventuellement la recherche de nouvelles alternatives pour le projet, en utilisant les mêmes démarches et outils que dans le « *Design Time* » ;
- L'évaluation et la sélection des solutions de remplacement, ainsi que la justification de l'approbation ou du rejet de chaque alternative ;
- La traçabilité des modifications, approbations, rejets et décisions ;
- L'orchestration de la nouvelle solution ;
- L'itération jusqu'à la fin du projet, lorsque le SA&D n'existe plus.

3.4.2.2 Une phase portée par un workflow adaptatif

Une fois la conception initiale entièrement validée, on constate que tout au long de la réalisation des opérations, le domaine du problème pourra varier, tout comme au cours du « *Design Time* », notamment du fait des imprévus qui peuvent survenir. De plus, ces variations peuvent toucher tous les points de vue du projet. Notamment, le niveau de détail d'un scénario de démantèlement initial est affiné au fil du temps en fonction du niveau de connaissance de l'installation, à tous égards : ressources allouées, activités réalisées, etc. Certaines particularités,

des événements imprévus, etc. peuvent avoir une incidence sur le calendrier initial et donc sur l'organisation générale du projet. C'est pourquoi le concept de workflow adaptatif tire son sens (Barthe-Delanoë, et al., 2018).

En pratique, un workflow (van der Aalst & van Hee, 2004) est un processus exécutable dont le pilotage et le suivi sont assistés et partiellement automatisables. Le processus est ici la composition de l'ensemble des activités, ressources et flux (en entrée et en sortie : configurations, documents, matières et déchets, etc.) décrivant l'évolution d'un SA&D, c'est-à-dire la manière dont le projet d'A&D associé à ce SA&D est organisé et doit être exécuté.

D'un point de vue conceptuel, un workflow adaptatif permet de ne pas définir l'ensemble du processus en cours d'exécution *a priori*, mais de s'inspirer du modèle de base établi en « *Design Time* » et possédant *a priori* la description de plusieurs alternatives. Les activités, tâches et opérations prévues ne seront donc pas organisées systématiquement, mais pourront être activées si nécessaire, sur demande (d'où l'attribut correspondant sur le concept de *MethodConfiguration*). Le planning initial prévu en « *Design Time* » doit en effet pouvoir s'adapter : les tâches planifiées sont ajustées en temps réel pour s'inscrire dans un périmètre initialement dimensionné lors de la conception du projet. Divers travaux évoquent ce mécanisme de workflow adaptatif et précisent ses intérêts (Divitini, et al., 2001) (Adams, et al., 2006) (Samiri, et al., 2017) (Barthe-Delanoë, et al., 2018).

D'un point de vue méthodologique, un workflow adaptatif permet de choisir des alternatives et d'orchestrer les modifications du processus au fur et à mesure de son exécution. Il prend en compte, en particulier, les réactions des parties prenantes impliquées dans les opérations planifiées, les événements et / ou les situations imprévues rencontrées nécessitant *a priori* de contester le processus en cours, les demandes de modifications d'exigences, et les nouvelles contraintes émises alors que le projet avance.

La valeur de ce mécanisme de workflow adaptatif repose donc sur la capacité des responsables de projet à :

- Saisir les événements et les variations de situations ainsi que les retours des parties prenantes ;
- Juger de leur pertinence, de leur importance et de leur urgence au regard de la conception du projet initialement prévue et du référentiel d'exigences qui a été établi et est maintenu pendant la durée du projet ;
- Trouver rapidement et valider une ou plusieurs solutions alternatives qui continuent de respecter cette base de référence et qui rassurent toutes les parties prenantes sur la sûreté et la sécurité du projet dans son ensemble. Ces solutions contiennent donc des propositions pour :
 - des changements dans les activités planifiées pour rester cohérent avec la réalité sur le terrain, en questionnant les flux d'entrée et de sortie (notamment les produits) ainsi que les ressources allouées et le référentiel d'exigences ;

- des ajouts aux activités (éventuellement en questionnant de la même manière que dans le point précédent) ;
- des changements dans les transitions entre les activités (par exemple, un temps supplémentaire pour pouvoir effectuer certaines activités).

Pour conclure, le workflow adaptatif sert directement la deuxième problématique identifiée dans le Chapitre I, liée à l'évolution inéluctable des projets, qui rend les modèles caducs quasi systématiquement et avant même leur exploitation à des fins de pilotage.

3.4.3 La démarche opératoire : plusieurs « *Design Time* » et plusieurs « *Run Time* »

3.4.3.1 Constat dans la pratique

Il est important de préciser que la démarche opératoire proposée ne consiste pas, pour chaque SA&D, en un unique « *Design Time* » et un unique « *Run Time* ». En effet, un SA&D peut connaître plusieurs vagues de validation successives.

Par exemple, pour une INB, le SA&D va devoir lors de l'entrée en vigueur du décret de démantèlement être validé sur plusieurs aspects, dont les activités de plus haut niveau (appelées « étapes » dans un décret de démantèlement), qui précisent les missions (i.e. activités principales) du SA&D, et permettent d'étayer les phases et jalons du cycle de vie. Le cycle de vie du SA&D est donc validé à ce moment-là, car chaque jalon doit être proposé, et un calendrier doit être validé. Néanmoins, comme l'on ne rentre pas encore dans le détail des sous-activités proposées, il est impossible de valider des contextes à ce moment-là, ni les modes opérationnels (si nécessité il y a de les spécifier) possibles du SA&D dans chaque étape.

Ces sous-activités et contextes vont en effet devoir être validées selon un calendrier, qui aujourd'hui est fixé pour chaque étape selon une contrainte forte : chaque étape doit voir l'ensemble de ses sous-activités validées 5 ans avant le début de réalisation de l'étape.

3.4.3.2 Mise en œuvre des multiples « *Design Time* » et « *Run Time* »

Il peut donc se dérouler plusieurs couples de « *Design Time* » / « *Run Time* » pour un même SA&D, par exemple un global pour le SA&D puis un pour chaque lot, comme le montre la **Figure 38**.

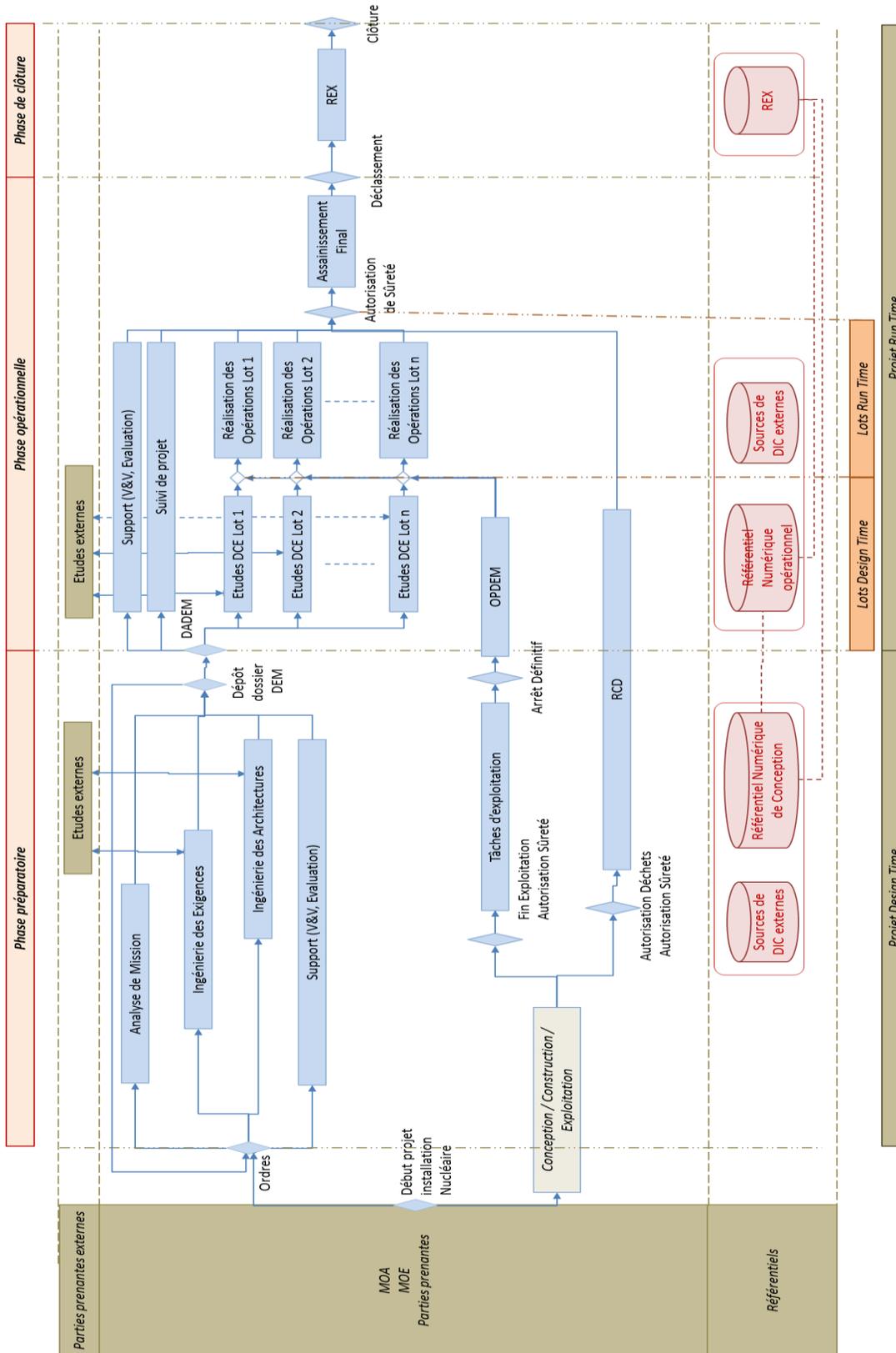


Figure 38 - Découpage de la démarche au cours d'un projet en lots et en plusieurs « Design Time » et « Run Time »

En plus des différentes règles métiers identifiées plus haut, nous insistons ici sur la nécessité de bien définir, en amont de chaque « *Design Time* », le périmètre de ce dernier et plus particulièrement de ce qui doit être validé lorsqu'il est terminé. Pour ce faire, il s'agit de répondre *a minima* aux questions suivantes :

- doit-on définir et valider le cycle de vie ou est-il déjà validé ?
- doit-on définir et valider certains diagrammes de contextes ou de modes opérationnels correspondant aux différentes phases, ou sont-ils déjà validés ?
- quelles activités sont concernées par le « *Design Time* », et doivent être décrites et validées dans leur intégralité (ressources, tâches, et spécification des déchets, REX, et configurations concernés) ?
- jusqu'à quels niveaux de sous-activités doit-on décrire et valider l'ensemble ?

Une fois la démarche itérative et la validation par l'ensemble des parties prenantes concernées par les exigences et les choix de conception réalisées, cela impactera la validation partielle d'éléments d'autres points de vue globaux du système, à savoir exactement : les exigences applicables, les risques encourus, les coûts engagés, et les indicateurs de performance visés.

Ensuite, en passant dans un « *Run Time* » lorsque les éléments considérés sont validés, il conviendra pour chaque événement pouvant survenir, de se poser également un ensemble de questions, dont notamment :

- les activités validées et leurs modalités de mise en œuvre (ressources, tâches, et déchets, REX, et configurations en intrants / extrants concernés) sont-elles impactées ?
- le cycle de vie est-il remis en cause ? Les systèmes mis en jeu ou éléments de contextes sont-ils remis en cause ?
- les exigences validées sont-elles remises en cause ?
- l'événement active-t-il la condition d'un ou de plusieurs risques encourus ? Met-il en évidence de nouveaux risques ?

3.4.4 Compléments

3.4.4.1 Transversalité de la démarche

En modélisant en « *Design Time* » les contextes, et donc en s'assurant de décrire les interactions et services rendus dans les deux sens entre chaque SA&D et chaque système à l'interface, puis en analysant les impacts d'événements sur ces contextes (que ces événements impactent le SA&D et/ou les systèmes à l'interface) on permet à ces systèmes à l'interface d'être mis au courant des modifications dans les services reçus ou fournis. Or, ces services concernant les systèmes à l'interface, dont les programmes et le système de gestion stratégique, de telles modifications permettront de fait d'intégrer les aspects transversaux aux SA&D et réciproquement de guider les décideurs de l'A&D dans leurs choix stratégiques et tactiques pour la gestion des programmes d'A&D et la gestion des déchets.

En dernière conclusion, il est à noter que de la même façon que pour chacun des SA&D, on peut tout à fait transposer la démarche de « *Design Time* » / « *Run Time* » à chaque système socio-technique.

3.4.4.2 Un exemple : l'apport des patrons de modélisation sur la démarche

Afin de prendre en compte les deux notions de système de systèmes et de workflow adaptatif, on peut noter le fait que les patrons de modélisation sont très utiles.

En effet, il est nécessaire de modéliser les éléments des différents SA&D dont on s'intéresse. Or ces parties peuvent être communes à plusieurs SA&D. Les patrons de modélisation vont ainsi aider à modéliser les éléments en commun à plusieurs de ces systèmes de systèmes (**Figure 39**).

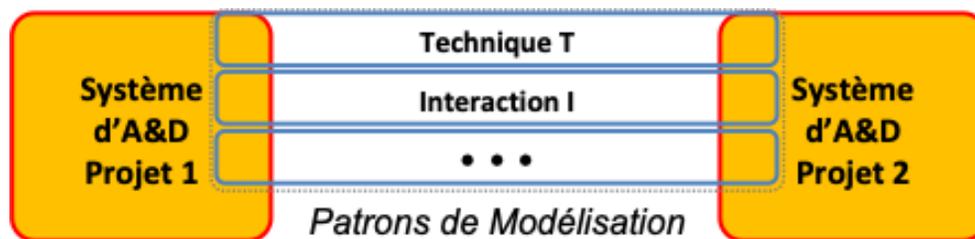


Figure 39 - Des patrons de modélisation au service de plusieurs systèmes de systèmes

Deuxièmement, les patrons facilitent la conception d'alternatives, en fournissant un certain nombre d'éléments préconçus, permettant de construire et de valider rapidement des alternatives, puis d'adapter le flux de travail en cas d'événement imprévu (**Figure 40**).

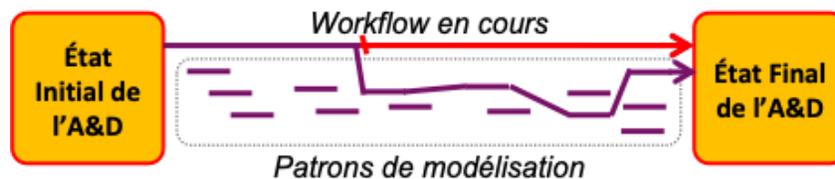


Figure 40 - Des patrons de modélisation au service du workflow adaptatif

3.4.5 Conclusion : limites des contributions conceptuelles à la mise en œuvre de la démarche

L'outil présenté dans le prochain chapitre permettra d'implémenter les règles métiers que nous avons vues. Il permettra en particulier d'implémenter le concept de sémantique opérationnelle des DSML, autorisant ainsi la simulation et l'analyse des modèles établis avec ces DSML, aux fins de vérification et de validation.

3.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre nous a permis de présenter et d'avoir des éléments de justification d'un certain nombre de contributions proposées en fin de chapitre précédent, synthétisées dans le tableau suivant (**Tableau X**).

Verrou	Contributions présentées et justifiées
Conceptuel : Vision partagée entre les parties prenantes des modalités de l'A&D (périmètre, finalité, missions, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Identification des points sensibles pouvant soulever des risques d'interprétation, rencontres et analyse de l'existant et des retours d'expériences passés • Proposition de définition du périmètre, de la finalité, des missions, etc. de l'A&D
Conceptuel : Ontologie métier de l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Formalisation des termes communs de l'A&D • Proposition de concepts, attributs, et relations pour traduire cette formalisation
Conceptuel : Modèle générique, permettant de gérer l'effet de série de l'A&D, et spécifiant formellement les métadonnées importantes pour l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Étude de la généricité des éléments des projets d'A&D : éléments structurants génériques, éléments reproductibles, éléments spécifiques • Proposition d'un méta-modèle unique • Proposition des principes des patrons de modélisation
Méthodologique : Consolidation des règles de conception de l'A&D	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche opératoire (modélisation, V&V, évaluation, analyse) pour assister la décision des responsables projets, réduire les erreurs, ou omissions, et mieux maîtriser des écarts en cours de projet
Méthodologique : Référentiel unique et partagé d'exigences SMART	<ul style="list-style-type: none"> • Centralisation des exigences à chaque niveau (projet, programme, etc.) • Prise en compte dans le méta-modèle de la traçabilité des exigences, mais aussi des données, des informations et des connaissances qui y sont relatives
Méthodologique : Accessibilité et adaptabilité des standards et règles	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche itérative favorisant le raffinement des besoins et des contraintes en exigences SMART
Méthodologique : Capacité à prévoir à l'avance et adapter rapidement les scénarios d'A&D en suivant et traçant les évolutions	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte dans le méta-modèle des besoins en termes de conception, d'évaluation et de traçabilité des alternatives de projets-solutions • Proposition d'une démarche d'adaptation des processus, activités, tâches et opérations du projet en suivant les principes des workflows adaptatifs

Verrou	Contributions présentées et justifiées
<p>Méthodologique : Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte dans le méta-modèle du besoin global de traçabilité • Proposition d'une démarche de modélisation intégrant les aspects transversaux aux projets et réciproquement guidant les décideurs de l'A&D dans leurs choix stratégiques et tactiques pour la gestion des programmes d'A&D et la gestion des déchets • Proposition d'une démarche agile favorisant la validation commune des exigences en fin de conception de chaque élément
<p>Technique : Outils interopérables et fichiers d'échanges conformes et compatibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un méta-modèle de concepts et de points de vue fédérés, qui permet plus facilement d'y associer ensuite les différents outils des systèmes d'information de l'entreprise étendue
<p>Technique : Garantie de la fiabilité des données d'entrée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un méta-modèle de concepts et de points de vue fédérés, permettant plus aisément d'identifier les métadonnées importantes à collecter puis d'y indexer des données brutes • Proposition d'une traçabilité entre les éléments permettant ici aussi de faciliter la détection d'éventuelles contradictions dans les données
<p>Économique : Conciliation des intérêts industriels et de la propriété intellectuelle des parties prenantes dans des démarches collaboratives</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'une démarche facilitant la prise en compte des exigences de toutes les parties prenantes
<p>FOH : Accompagnement au changement pour catalyser les évolutions de pratiques et d'habitudes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'aller vers une plateforme de services pour l'A&D (modélisation, V&V, évaluation, gestion de workflows adaptatifs, etc.) et non vers des outils distincts • Souplesse du méta-modèle, intégrant des éléments favorisant sa pérennité, sa modularité

Tableau X - Synthèse des contributions présentées dans le Chapitre III

Chapitre IV : Contribution technique et illustration

4.1 Introduction

Ce Chapitre IV traitera des apports que les outils et les langages représentent pour la mise en œuvre de la méthode proposée par ces travaux de thèse (**Figure 41**). Ce chapitre illustre également l'application démonstrative de la méthode à un chantier pilote retenu et décrit dans la suite.

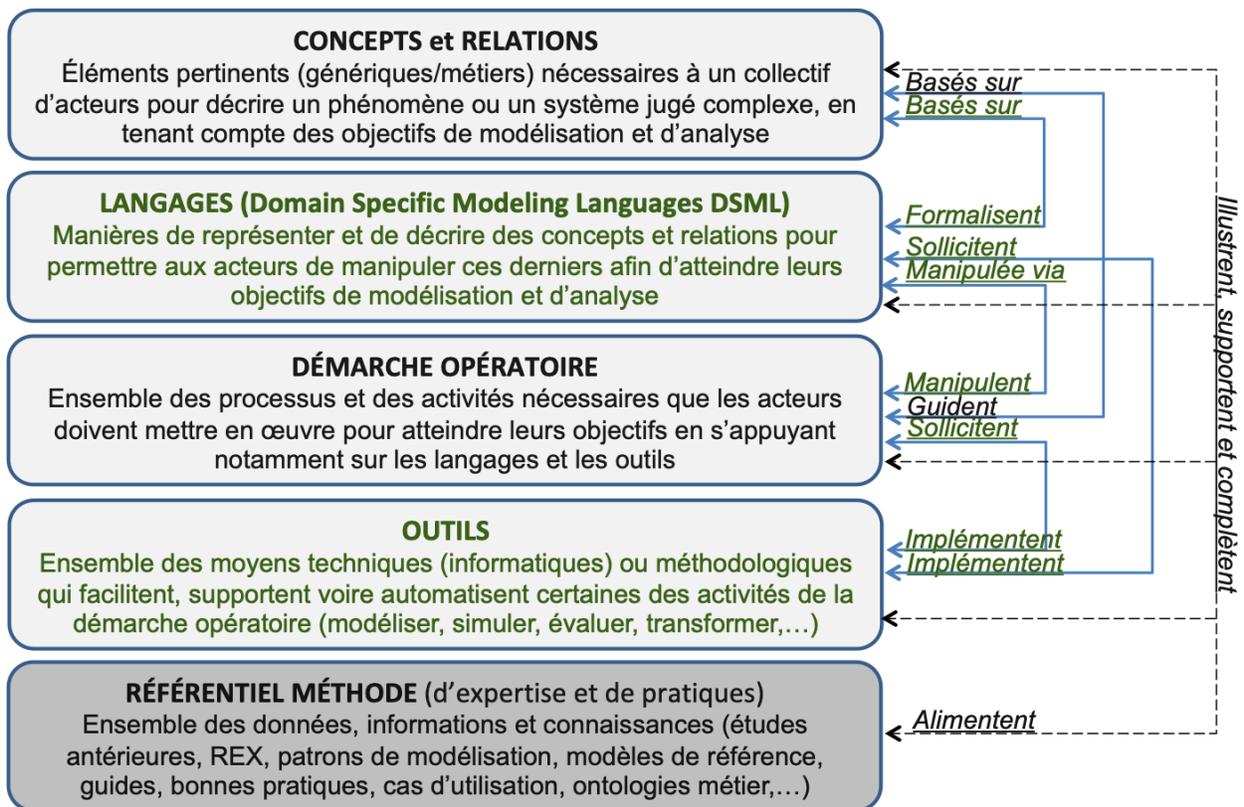


Figure 41 - Les contributions présentées en Chapitre IV se concentreront sur les outils et les DSML

4.2 Vue d'ensemble des exigences de l'outil

De nombreux outils existent et sont actuellement utilisés pour aider à la conception, à l'organisation et au suivi des projets d'A&D, notamment pour construire des modèles tels que ceux présentés en **Tableau I**.

Pour répondre aux diverses contraintes identifiées lors de la formalisation du SA&D, et considérer les notions de système de systèmes et de workflow adaptatif, nous proposons de

disposer d'un nouvel outil supportant la méthode proposée. Cela signifie le développement de nouvelles fonctionnalités :

- répondant aux besoins des « *Design Time* » comme ceux du « *Run Time* » ;
- garantissant l'interopérabilité (sémantique et pragmatique) de ce nouvel outil avec les outils déjà en place, outils que nous avons choisi de conserver afin de ne pas bouleverser les pratiques et les habitudes des managers, des experts métiers et des opérateurs ;
- assurant une gestion efficace des données, des informations et des connaissances.

Ce nouvel outil doit donc permettre de répondre à certaines exigences, déduites des contributions théoriques de ces travaux de thèse.

Le **Tableau XI** présente ces exigences, et synthétise l'état actuel de prise en compte de ces exigences et de maturité de l'outil démonstrateur développé et présenté dans la suite. Un « + » signifie que l'exigence a été prise en compte et est allouée dans l'outil démonstrateur à des éléments structurels de celui-ci ou à des fonctionnalités développées. Un « - » signifie que les contributions techniques actuelles ne prennent pas encore en compte l'exigence, qui est de fait placée en frontière de la thèse. Enfin, un « ± » signifie que certaines fonctionnalités développées proposent une réponse, mais incomplète, à l'exigence.

Exigences		État de maturité (+, -, ±)
Modéliser de manière exhaustive	Modéliser les éléments des projets L'outil doit permettre d'instancier et de manipuler tous les concepts, relations, et attributs du méta-modèle de manière unique et à un niveau de détail suffisant.	+
	Gérer les rôles et responsabilités des différentes parties prenantes La gestion des autorisations d'accès aux différentes études et bases de données visera à respecter les rôles et responsabilités de chaque partie prenante, à améliorer le niveau de sécurité et à préserver la propriété intellectuelle de chaque collaborateur.	±
	Assurer la flexibilité, la modularité et la pérennité de la modélisation L'outil doit permettre d'enrichir et de paramétrer le méta-modèle en fonction des besoins inhérents à chaque type d'organisations de l'A&D (sans / avec programmes, sans / avec projets décomposés en lots, etc.). L'outil doit pouvoir associer à chacun des modèles un ou plusieurs référentiels de connaissances qui compléteront sa description.	+

Exigences		État de maturité (+, -, ±)
Capitaliser et valoriser les connaissances	<p>Gérer les patrons de modélisation décrivant des solutions éprouvées</p> <p>Les utilisateurs, tels que les experts, pourront créer, interconnecter, valider et gérer un ensemble de modèles dans une base de données mise à la disposition des responsables pour la modélisation de leurs SA&D. L'outil doit viser également, afin de réduire la charge de travail permettant le remplissage de cette base de patrons, à promouvoir la création automatisée de patrons (la validation restera manuelle) grâce à la reconnaissance de similitudes entre les modèles présents dans la base de données globale des modèles. De la même manière, deux modèles représentant le même élément concret dans plusieurs projets peuvent être fusionnés pour éviter les redondances.</p>	+
	<p>Utiliser les patrons de modélisation</p> <p>L'outil doit permettre une approche intuitive de l'usage des patrons de modélisation. L'outil doit offrir pour cela une interface ergonomique de manipulation et d'importation de patrons.</p>	+
Analyser et questionner les modèles	<p>Vérifier (consistance et cohérence des modèles et règles de modélisation), analyser (sensibilité, impact, et dépendance), valider et notifier</p> <p>L'outil doit permettre de prouver un certain nombre de propriétés de modélisation (e.g. cohérence, consistance des attributs associés et relatifs aux relations entre concepts et entre DSML décrites dans le méta-modèle, respect de règles de modélisation) dans le but de vérifier les modèles avant même leur utilisation à des fins de simulation et d'analyse du projet tel qu'il a été modélisé.</p> <p>L'outil doit garder un suivi des exceptions qui engagent la responsabilité de l'utilisateur (par exemple, décisions menant à ignorer l'incompatibilité de patrons de modélisation).</p> <p>L'outil doit guider la modélisation sans pour autant l'imposer aux utilisateurs : il s'agit ici de respecter la stratégie de modélisation guidée et, pour cela, donner accès aux patrons réputés déjà vérifiés, à des règles de modélisation et à des propriétés attendues de l'objet modélisé (e.g. respect des exigences).</p> <p>L'outil doit permettre de réaliser des analyses de sensibilité et d'impact qui aideront les responsables de projet dans la conception du démantèlement et dans leurs décisions d'adaptation.</p>	-

Exigences		État de maturité (+, -, ±)
	<p>L'outil doit enfin permettre d'exécuter les modèles isolément puis globalement.</p> <p>À ces fins, l'outil doit posséder des fonctionnalités permettant d'intégrer des règles de modélisation, des propriétés et de la sémantique opérationnelle de chaque DSML pouvant être associé à un comportement. Cela nécessite aussi des mécanismes de preuve de ces règles et propriétés, et de mécanismes de simulation pour exécuter le modèle tels que ceux proposés dans (Nastov, 2016).</p>	
	<p>Evaluer des alternatives, guider la décision, et justifier (approbations, rejets)</p> <p>Les différentes fonctionnalités des outils permettant les vérifications et l'analyse doivent également rendre possible l'évaluation de différentes alternatives de solutions, afin d'aider les responsables à prendre des décisions tout en apportant des justifications.</p>	-
	<p>Documenter - générer les documents requis selon les pratiques et habitudes des parties prenantes</p> <p>Tout modèle doit pouvoir faire l'objet d'une génération de documents personnalisée en fonction des pratiques et des habitudes des parties prenantes demandant ces documents.</p>	-
Partager	<p>Partager les modèles, les utiliser et les adapter aux types de ressources externes</p> <p>L'outil ne supprime pas les outils existants au sein des systèmes d'information des différentes parties prenantes impliquées dans les projets d'A&D. Il doit simplement s'interfacer avec des bases de données alimentées par des outils existants et par des référentiels de connaissances, qui justifieront les exigences énoncées et les diverses solutions proposées pour les satisfaire. Ainsi, chaque acteur conserve sa propriété intellectuelle, son savoir-faire et son organisation interne, tout en alimentant en données, informations et connaissances l'outil en fonction des besoins de chaque projet.</p>	±
Détecter, adapter, et prévenir	<p>Tracer les modifications de modèles, variations d'entrées/sorties, etc.</p> <p>L'outil doit systématiquement et automatiquement assurer la traçabilité des modifications des modèles et des patrons. L'ensemble des choix de modélisation qui auront été faits suite à des conflits d'exigences doit également être tracé et conservé.</p>	±

Exigences	État de maturité (+, -, ±)
<p>Capturer les variations, notifier / alerter, et mettre en œuvre un workflow adaptatif</p> <p>En cas de variation ou de présage de variation future de la situation sur le terrain, l'outil doit capter les informations pertinentes puis analyser les impacts de cette variation sur les modèles. Des simulations doivent pouvoir être effectuées pour une meilleure anticipation.</p> <p>La modification de n'importe quel élément des modèles peut avoir un impact sur un ou plusieurs projets, sur des études de niveau supérieur (programmes, globale), voire sur des systèmes externes. L'outil doit évaluer et propager les impacts de ces modifications de manière automatique et notifier les différents utilisateurs et parties prenantes de leurs effets.</p> <p>Enfin, afin de s'adapter au mieux aux aléas, une base de données importante et partagée de patrons de modélisation, avec une option de recherche automatique (par exemple pour répondre à une nouvelle exigence), catalysera la capacité à s'adapter progressivement, notamment en proposant plusieurs alternatives d'architectures fonctionnelle et organique (par exemple, des alternatives d'organigrammes des tâches ou de diagrammes de Gantt en fonction des risques identifiés du projet).</p>	-

Tableau XI - Exigences de l'outil déduites des contributions de la thèse

4.3 Chantier pilote

Afin de mettre en pratique la méthode, et de réaliser des preuves de concept (PoC, de l'anglais *Proof of Concept*), nous avons choisi un chantier démonstratif en cours de réalisation, qui concerne deux INB du site de Cadarache : l'INB 32 (Atelier de Technologie du Plutonium, ATPu) et l'INB 54 (Laboratoire de Purification Chimique, LPC).

Les deux décrets de démantèlement associés à ces deux INB ont été publiés en mars 2009.

Ces installations sont en cours de démantèlement par les projets « Complexe de Fabrication de Cadarache » CFCa (démantèlement de l'ATPu et du LPC hors atelier de cryotraitement) et CRYO (démantèlement du seul atelier de cryotraitement du LPC) (**Figure 42**).

Il convient de se concentrer dans l'outil démonstrateur sur le projet CFCa mais de prendre en compte la problématique de deux projets sur une INB (le LPC) et un décret unique par INB. À

noter que les arrêts définitifs ont eu lieu également conjointement en 2003 pour des raisons de manque de tenue au séisme des bâtiments.

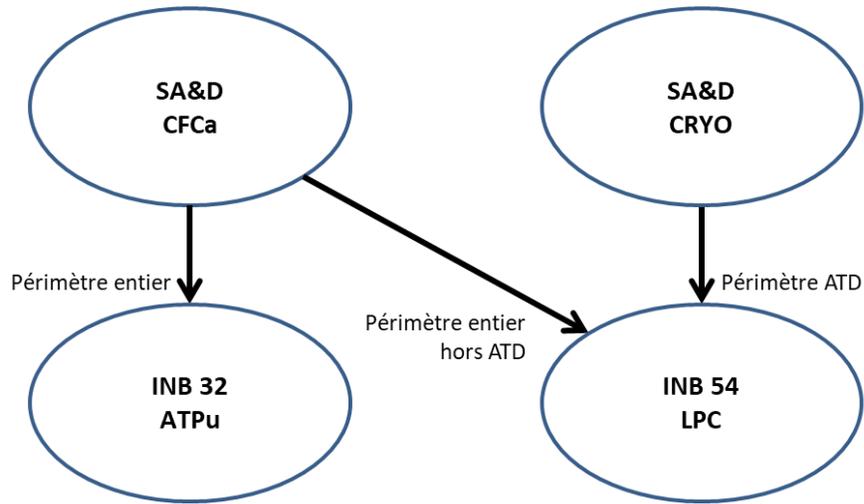


Figure 42 - Contexte du cas test

Les objectifs de cette PoC sont présentés dans le **Tableau XII**.

Opérationnalité	Montrer que le démonstrateur permet de réaliser des tests de fonctions présentées.
Exhaustivité	Montrer que le méta-modèle peut couvrir toutes les disciplines de la gestion de projet (organisation et pilotage). Montrer que le démonstrateur permet d'inclure toutes les parties prenantes de l'entreprise étendue, toutes les exigences (« Problème »), toutes les réponses à ces exigences (« Solution »), et toute la démarche itérative de V&V associée.
Réaction rapide aux aléas	Montrer que la structure même des modèles, la présence des patrons de modélisation, et les différentes fonctionnalités, permettent une réaction rapide aux aléas, et également une capacité à simuler en amont des aléas/alternatives de scénarios.
Transversalité	Montrer que le démonstrateur permet d'inclure la problématique de transversalité des projets/programmes (e.g. interactions externes, contraintes déchets, etc.) et la problématique de valorisation du REX ==> exhaustivité des interactions et de l'intégration du REX.
Assistance et non substitution de l'utilisateur	Montrer que l'outil ne doit pas bloquer le scénariste dans sa définition du projet : l'outil ne remplace pas l'intelligence des scénaristes, mais doit tracer ce qui peut être la source de risques projets (exigences incompatibles, ou solutions absentes, incomplètes, immatures, non fiables, etc.).

Tableau XII - Objectifs de performance associés à la démonstration

Pour les besoins de la PoC, les points particuliers à traiter dans le contexte du chantier pilote sont présentés en **Annexe III**. Ceux-ci ont permis d'identifier certaines activités de modélisation, organisées suivant la démarche opératoire présentée au Chapitre III. Ces activités sont également présentées en **Annexe III**.

4.4 Un environnement de modélisation et d'analyse

Les outils EMF (*Eclipse Modeling Framework*) et Obeo Designer permettent, via l'environnement de développement Eclipse, de spécifier et de créer un méta-modèle puis de créer les outils de modélisation et les modèles de SA&D. De fait, utiliser l'environnement Eclipse implique que les différents modèles réalisés correspondent techniquement à des classes d'objets du langage de programmation Java.

Le méta-modèle de la méthode a ainsi été implémenté conformément au méta-méta-modèle *Ecore* (implémenté dans l'outil EMF).

La **Figure 43** illustre l'exemple de la modélisation, d'un service fourni par un SA&D, réalisée via ces outils, en montrant les différents niveaux de modélisation évoqués en Chapitre II. On y retrouve au niveau M3 le méta-méta-modèle *Ecore*, incluant notamment les concepts (EClass), les attributs (EAttribute) et les relations (EReference), qui nous ont permis de spécifier le niveau M2 de l'A&D : notre méta-modèle. L'exemple retenu dans la figure au niveau M2 est le point de vue des contextes.

Enfin, afin de modéliser le niveau M1, Obeo Designer intègre un outil permettant de spécifier et générer la syntaxe concrète et quelques règles graphiques de représentation pour chaque DSML : on retrouve ici le système dont on analyse le contexte (rectangle gris clair), les systèmes avec lesquels il interagit (ellipses gris foncé), et les services fournis ou reçus (flèche).

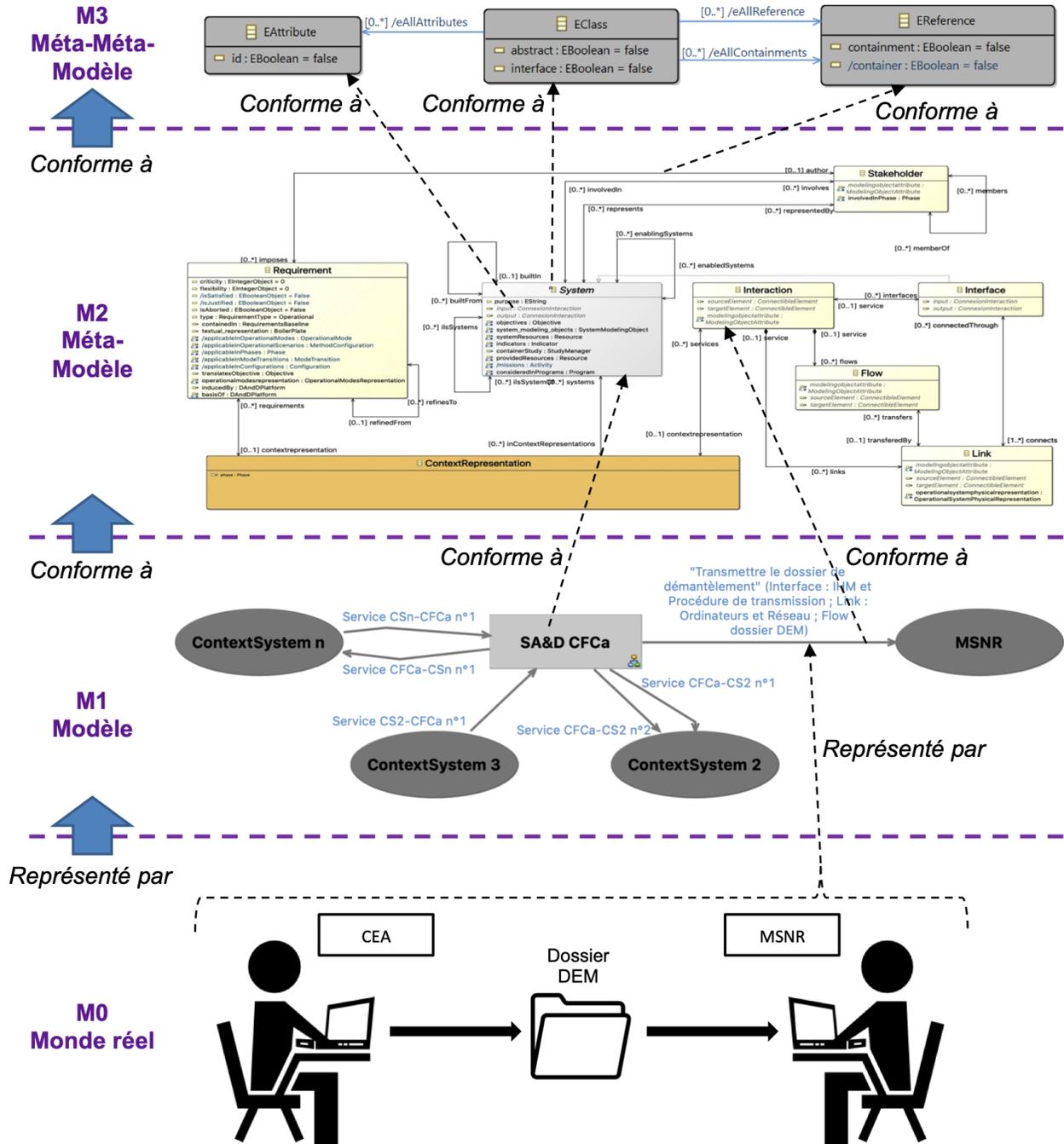


Figure 43 - Exemple illustrant les niveaux de modélisation dans Eclipse et Obeo Designer

4.5 Intégration des DSML

Le méta-modèle définit la syntaxe abstraite des DSML. L'environnement Obeo Designer propose un certain nombre de fonctionnalités permettant ensuite de définir la syntaxe concrète, c'est-à-dire une ou plusieurs façons alternatives de représenter concrètement les concepts et les relations présents dans la syntaxe abstraite. Ces fonctionnalités ont ainsi été exploitées.

La spécification de la syntaxe concrète se fait donc par la création d'un *Viewpoint Specification Project*, dans lequel est contenu un fichier de format « .odesign ». Ce fichier permet à Obeo Designer de définir comment représenter les instances de modèles, ainsi que les outils mis à disposition de l'utilisateur final pour gérer ces modèles.

Le développeur du fichier .odesign utilise majoritairement des commandes Aceleo Query Language¹² (AQL), qui est un langage permettant notamment de naviguer dans les modèles. Une fois ce travail effectué, il suffira lors de la création d'un Modeling Project (et donc du fichier correspondant, contenant le modèle) de lui associer le Viewpoint précédemment configuré.

Un exemple de syntaxe concrète graphique exprimée sous forme de diagramme, développée pour le DSML de cycle de vie, est proposé **Figure 44**.

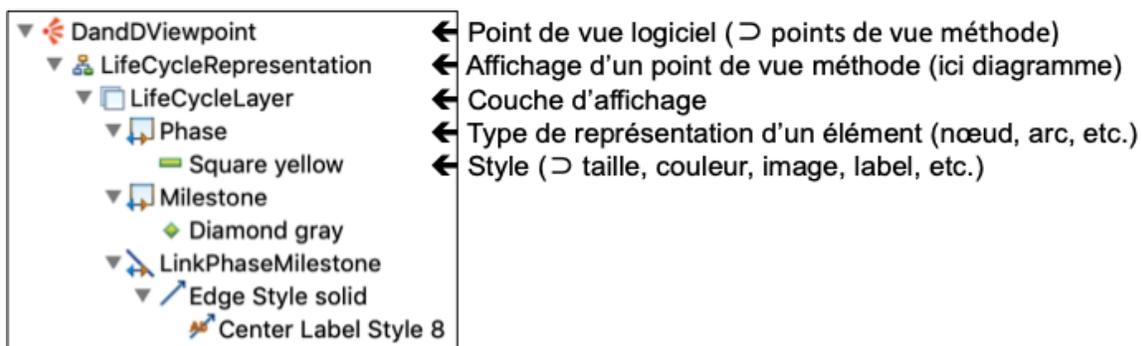


Figure 44 - Proposition de syntaxe concrète du DSML de cycle de vie, outillée via Obeo Designer

Cette syntaxe concrète n'est pas nécessairement unique pour une même syntaxe abstraite, elle pourra s'adapter aux habitudes des modélisateurs. Par exemple, il est possible de représenter différemment les risques projet d'un SA&D et les risques sûreté propres à une INB.

Enfin, la syntaxe concrète peut être graphique ou textuelle : Obeo Designer permet notamment de l'exprimer sous forme de tableau, forme que nous avons par exemple retenue pour la gestion d'exigences et de patrons de modélisation.

Afin d'illustrer l'implémentation des DSML dans l'outil, la **Figure 45** permet de montrer le modèle du cycle de vie d'une INB ayant importé le cycle de vie type d'une INB présenté **Figure 18**. On y voit apparaître (à droite de la figure) la palette des outils développés dans le cadre de ces travaux, permettant de créer des jalons et des phases, d'associer des parties prenantes ou des objectifs à des phases, et des conditions à des jalons, qui sont tous des concepts importants du cycle de vie présentés **Tableau IX**. Quant aux points de vue des modes opérationnels et du contexte associés à chaque phase, l'outil permet de les créer puis de naviguer vers eux, via un menu déroulant qui s'ouvre par un clic droit sur chacune de ces phases, représentées ici par un carré jaune.

¹² <https://www.eclipse.org/aceleo/documentation> : Dernière visite 31/07/19

The screenshot displays the Beo Designer Community interface. The main workspace shows a life cycle diagram with the following elements:

- Diagram Elements:**
 - Start:** Lancement Projet (diamond)
 - Phase 1:** Conception & Construction (rectangle)
 - Decision 1:** Mise en Service (diamond)
 - Phase 2:** Fonctionnement (rectangle)
 - Decision 2:** Arrêt Définitif (diamond)
 - Phase 3:** OPDEM (rectangle)
 - Decision 3:** Décret DEM (diamond)
 - Phase 4:** Déconstruction (rectangle)
 - Final:** Déclassement (diamond)
- Flow:** Lancement Projet → Conception & Construction → Mise en Service → Fonctionnement → Arrêt Définitif → OPDEM → Décret DEM → Déconstruction → Déclassement.

The **Properties** panel on the right shows the following details for the selected element:

- Name:** Cycle de vie ATPu
- Unique ID:** LCR-5
- Alias:** (empty)

The **Model Explorer** on the left shows a tree structure with the following items:

- CasTest1
 - Project Dependencies
 - ceaADcivil.sad_v0
 - DAnd DGlobal Study I
 - ceaADcivil
 - Context System AS
 - Context System DF
 - DAnd DGlobal Syst
 - DAnd DStrategic S
 - Program Program
 - DAnd DSystem SA
 - Nuclear Facility INE
 - INB 32 ATPu
 - Life Cycle Repre
 - Cycle de vie /
 - Interaction Dem
 - Interaction Resp
 - Interaction
 - Interaction Tran
 - Phase OPDEM
 - Milestone Lance
 - Phase Concepti
 - Milestone Mise €
 - Phase Fonctionr
 - Milestone Arrêt I
 - Milestone Décre
 - Phase Déconstr
 - Milestone Décla:

Figure 45 - Patron de modélisation d'un cycle de vie type d'INB importé dans le point de vue du cycle de vie de l'ATPu

Cet environnement permet donc de fixer aussi des règles de modélisation c'est-à-dire des règles de construction de modèles, de manière à s'assurer de leur conformité sémantique et non plus seulement syntaxique avec le méta-modèle. Elles sont spécifiées dans la syntaxe abstraite, telles que les cardinalités ou des contraintes d'exclusion entre concepts.

Enfin, un certain nombre d'activités nécessitent une sémantique opérationnelle, notamment :

- en « *Design Time* » :
 - traçabilité et analyse de dépendances ;
 - simulation d'alternatives, en analysant la sensibilité externe (e.g. sur les programmes et donc sur les processus transversaux) ;
- en « *Run Time* » :
 - analyses d'impact d'événements ;
 - mécanismes d'orchestration des solutions ;
- en « *Design Time* » et en « *Run Time* » :
 - évaluation (performances, sûreté, etc.) ;
 - preuve pour la vérification de règles, de propriétés et validation partielle, traçabilité, etc. ;
 - mécanismes de gestion des patrons ;
 - fonctions génériques de l'outil (affichage, alerte, notification, etc.).

L'approche théorique présentée en Chapitre III a permis d'identifier certaines contraintes pouvant alimenter les règles de modélisation et de sémantique opérationnelle, bien qu'actuellement non formalisées mathématiquement ni implémentées dans l'outil (**Annexe IV**). La sémantique opérationnelle a été placée en frontière de la thèse et n'a pas été implémentée.

Concernant les règles de modélisation, et à titre d'exemple, tout modèle de cycle de vie doit respecter les trois règles (1), (2) et (3) suivantes. À noter qu'ici « $p \in Phase$ » signifie « p instance du concept *Phase* ».

$$(1) \forall p \in Phase, \forall m \in Milestone, \quad p.output = m \implies p.input \neq m$$

Cette première règle signifie qu'il est impossible pour une phase de cycle de vie d'avoir le même jalon en entrée et en sortie.

$$(2) \forall p \in Phase, \exists! (m_1, m_2) \in Milestone / p.input = m_1 \text{ et } p.output = m_2$$

Cette deuxième règle signifie que toutes les phases du cycle de vie doivent avoir un jalon d'entrée et un jalon de sortie

$$(3) \forall l \in LifeCycleRepresentation, \exists! (m_1, m_2) \in Milestone /$$

$$\begin{cases} m_1.sourceElement.size() = 0 \\ m_2.targetElement.size() = 0 \end{cases}$$

Cette troisième et dernière règle signifie que dans un cycle de vie, il existe un unique jalon qui n'a pas de phase amont (premier jalon) et un unique jalon qui n'a pas de phase aval (dernier jalon).

La règle (1) est une règle d'exclusion qui a été directement incluse lors de la modélisation du cycle de vie par l'outil, telle que présentée **Figure 45** : il est impossible après avoir connecté une phase à un jalon de reconnecter ce jalon à cette même phase.

Les règles (2) et (3) ont été quant à elles implémentées par des méthodes Java, permettant de vérifier à tout instant la consistance d'un modèle de cycle de vie.

4.6 Développement de l'outil démonstrateur : exemple des patrons de modélisation

Des choix ont été faits afin de créer des modèles dans l'environnement Eclipse.

Un utilisateur de l'outil peut jouer trois rôles lors de la création de modèles. Le premier rôle est celui d'architecte système, actuellement tenu (sans exister réellement) par les chefs de projet, programme, etc. Le second rôle est nouveau, c'est celui de créateur et gestionnaire de patrons de modélisation, qui serait tenu par les experts de tous les métiers impliqués dans l'A&D. Le troisième rôle que notre méthode fait intervenir est celui de configurateur ou modérateur de l'outil, qui devra capitaliser et implémenter l'évolution des différentes règles de modélisation et de sémantique opérationnelle des DSML.

Les deux premiers rôles sont représentés dans le méta-modèle : le premier, par les concepts des *StudyManager* (incluant les *ProgramManager*, *StudyManager*, etc., se focalisant sur les modèles de programmes, projets, etc.), et le second, par le concept de *PatternManager*.

Ainsi :

- un *StudyManager* peut importer et s'inspirer des patrons de modélisation validés par le *PatternManager*. Il ne pourra pas créer de patrons de modélisation ;
- le *PatternManager* peut créer des patrons de modélisation et gérer toutes les relations entre les patrons existant dans le Référentiel Méthode. Il a à sa disposition des outils lui permettant la création de ces patrons. Il lui est possible d'importer le contenu d'un patron de modélisation dans le patron qu'il est en train de réaliser, puisqu'un patron de modélisation reste par essence un modèle réutilisable lui-même. Il lui est également possible d'importer le contenu de n'importe quels autres modèles (issus par exemple d'instances de *StudyManager*) pour s'en inspirer. Il peut, par exemple, créer ou « versionner » un patron à partir de modèles qui se retrouvent dans plusieurs projets.

Ils utilisent ainsi des modèles dissociés les uns des autres : les *StudyManager* sont guidés via l'import de patrons générés par le *PatternManager* ; le *PatternManager* peut utiliser les modèles appliqués réalisés par les *StudyManager* pour la création de nouveaux patrons (en

identifiant des similitudes entre modèles par exemple) ou le versionnement de patrons existants.

Au niveau des outils, ces deux rôles se traduisent donc sous la forme de plusieurs modèles distincts, et donc également sous la forme de fichiers de modèles distincts (**Figure 46**).

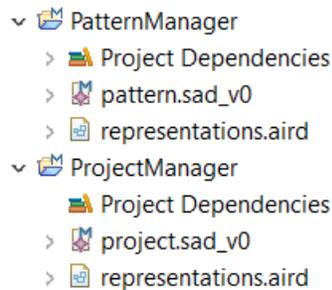


Figure 46 - Exemple de deux fichiers de modèles différents (un PatternManager et un ProjectManager)

Nous ne détaillerons pas dans ce manuscrit l'ensemble des choix et solutions techniques mis en œuvre, mais nous proposons d'illustrer certains d'entre eux qui concernent les mécanismes de gestion de patrons de modélisation, ces derniers représentant une forte contribution de la thèse et des travaux menés en stage M1 par (Bourdon, 2018) (voir **Figure 33** pour les concepts et relations évoquées dans la suite).

4.6.1.1 Modularité des patrons

Dans le cas d'un *ModelingPattern* contenant plusieurs instances de *PatternedElement*, un choix technique important a été fait afin de rendre plus souple la modularité des patrons de modélisation : ces instances doivent provenir d'un même et unique point de vue.

En d'autres termes, on peut donc se représenter un patron de modélisation comme une brique élémentaire de modèle qui va être rattachée à d'autres briques élémentaires selon des règles précisées en fonction du type de relations qui les lient. À ce stade, des règles ont par exemple été proposées (mais pas encore implémentées) pour l'import d'un patron de modélisation, à savoir :

- l'ensemble des patrons *refinedBy* sont directement proposés dans une fenêtre de sélection ;
- les patrons qu'il *requests* sont automatiquement importés ;
- les patrons qu'il *relates* sont suggérés par une notification ;
- les *antipatterns* sont notifiés en alertes écrites en rouge ;
- les *equivalentpatterns* sont notifiés par des alertes écrites en vert.

4.6.1.2 Création et import de patrons

L'utilisateur endossant le rôle de *PatternManager* dispose d'une interface particulière que nous avons réalisée, pour créer des patrons de modélisation puis gérer leurs attributs, d'abord via

deux fenêtres successives, une de sélection du type de *PatternedElement* qui caractérise le type du *ModelingPattern*, puis une autre qui permet de saisir les attributs de cet élément. La modification d'un patron de modélisation après sa validation entraîne l'ajout d'une nouvelle version de celui-ci.

Dans le cadre du démonstrateur, le fichier de modèles relatif à l'instance du concept de *PatternManager* représente la base de données des patrons de modélisation. De fait, le fichier de modèles lui étant associé est unique et contient tous les patrons. Nous avons en outre lié automatiquement ce fichier à tout fichier de modèles « appliqués » des *StudyManager*, dans le but de permettre à ces derniers d'importer les patrons, tout en conservant la traçabilité de l'import. La programmation en Java a été nécessaire pour ce point et l'ensemble des points présentés par la suite.

L'import de patrons se fait via l'interface du *PatternManager*, en naviguant dans ce dernier pour récupérer les éléments que l'on souhaite. Afin de s'assurer de la pertinence de l'import, les fonctionnalités qui ont été créées dans le fichier « .odesign » restreignent ensuite l'accès aux patrons pertinents, selon le point de vue considéré (un patron de *Phase* ne peut pas être importée dans un diagramme de ressources par exemple), et selon les règles évoquées plus haut dépendantes du rôle considéré.

La première partie de l'import consiste à la création des nouvelles instances correspondant aux *PatternedElement* présents dans le patron importé. La deuxième partie est le clonage des attributs et relations de toutes les instances de ce patron. S'il est choisi que les patrons requis par le premier patron (relation *requestedBy*) soient importés automatiquement, alors le processus est itéré pour importer chacun de ces patrons requis. Enfin, afin d'assurer la traçabilité lors de l'import d'un patron de modélisation, la relation *haveUsed* permet de savoir pour n'importe quel élément de n'importe quel modèle si oui ou non un patron de modélisation a été utilisé et si oui, lequel et dans quelle version.

4.6.1.3 Vers une modélisation guidée

Ces travaux réalisés sur l'import nous apportent des premiers éléments de modélisation guidée pour tous les responsables de *StudyManager*. Il sera ensuite possible d'ajouter une recherche automatique des patrons raffinés d'un patron importé afin de suivre le raisonnement présenté **Figure 32**.

4.6.1.4 Vers une génération automatique de fonctionnalités logicielles

En écrivant le fichier « .odesign », pour implémenter les syntaxes concrètes et les règles de modélisation des DSML dédiés aux points de vue d'abord, puis ensuite pour intégrer les mécanismes de gestion des patrons, nous avons constaté l'aspect fastidieux des travaux de développement logiciel à réaliser.

À titre d'exemple, lors de la création d'un patron, il s'agit d'abord de sélectionner dans une fenêtre le type de patron que le *PatternManager* souhaite créer, puis de proposer une fenêtre de saisie des attributs du patron souhaité. Le simple choix du type de patron dans la fenêtre de sélection est traduit dans le « .odesign » par la réalisation d'un « Switch ». Celui-ci présente un nombre de « Case » correspondant au nombre de choix possibles (**Figure 47**), c'est à dire au nombre de concepts du méta-modèle pouvant faire l'objet d'un patron de modélisation. Ensuite, il est nécessaire de coder pour chaque « Case » une fenêtre de saisie proposant chaque attribut du concept correspondant au patron souhaité.

Afin de s'affranchir de cet aspect fastidieux du développement informatique, nous avons donc travaillé sur la génération automatique de code Java et de code XML (langage de programmation du fichier « .odesign »). Concernant l'exemple présenté, cela a pu être réalisé grâce à un fichier Acceleo relativement court intégrant les règles relatives à la création de patrons, e.g. pour chaque « Case », et pour chaque attribut de type « EString » (chaîne de caractère) rencontré, il est proposé une ligne de saisie manuelle de caractères.

De fait, ces travaux de génération automatique faciliteront le travail des utilisateurs chargés du troisième rôle (configuration/modérateur de l'outil).

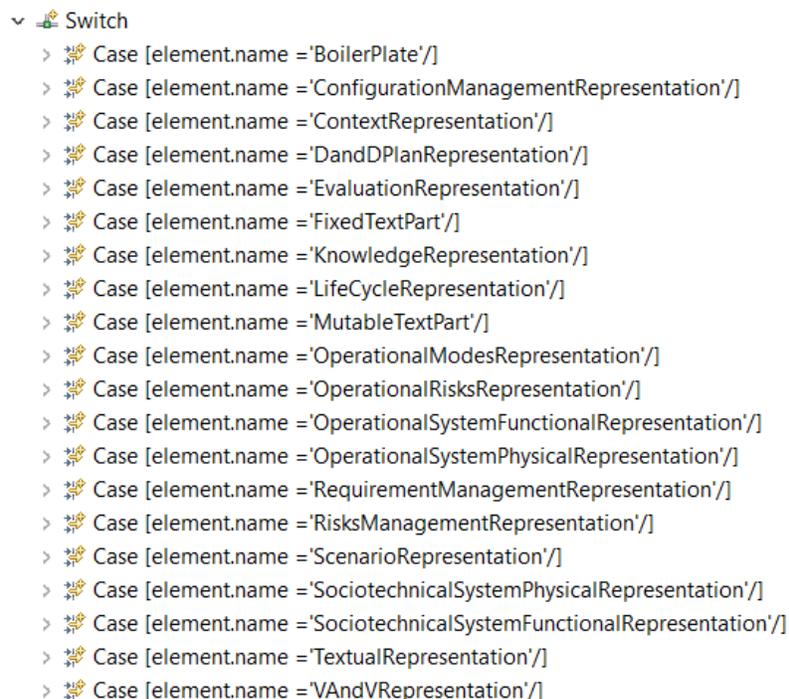


Figure 47. Exemple d'un switch avec une partie des nombreux choix possibles

4.7 Conclusion du chapitre

Ce chapitre nous a permis de présenter l'ensemble des contributions proposées en fin de Chapitre II et non encore présentées dans le Chapitre III, résumées dans le Tableau XIII.

Verrou	Contributions présentées et justifiées
Méthodologique : Consolidation des règles de conception de l'A&D	<ul style="list-style-type: none">• Réalisation de tests sur un chantier pilote, visant à montrer l'efficacité de la démarche de modélisation au regard de ces objectifs• Proposition de règles de modélisation basées sur des patrons
Méthodologique : Méthodologie qui intègre l'entreprise étendue, avec notamment des processus partagés et une validation de la réponse aux exigences par l'ensemble des parties prenantes via une démarche agile	<ul style="list-style-type: none">• Proposition d'un outil global unique favorisant son insertion et son interopérabilité avec les outils et les systèmes d'information existant chez les partenaires, avec des mécanismes de notification, d'alerte, et de traçabilité des modifications• Réalisation de tests considérant plusieurs rôles de modélisation (architecte système à différents niveaux, experts de différents métiers, etc.)
FOH : Accompagnement au changement pour catalyser les évolutions de pratiques et d'habitudes	<ul style="list-style-type: none">• Proposition de DSML ergonomiques, et la non-substitution de l'utilisateur par des outils au niveau décisionnel• Réalisation de démonstrations appliquées à un cas test

Tableau XIII - Contributions présentées dans le Chapitre IV

Conclusion générale

Apports de la méthode

La situation du domaine de l'A&D, aujourd'hui, impose de s'éloigner de l'idée de projets individuels spécifiques, en travaillant plutôt avec une vision industrielle reproductible globale. Celle-ci impose de prendre en compte les différences qui existent entre chaque installation nucléaire. La conception de projets d'A&D doit de même utiliser des ensembles complets de données d'entrée appropriées, ciblées en fonction d'exigences applicables, et issues d'une base de données unique. La méthode proposée est une contribution innovante en ce sens qu'elle s'inspire de principes systémiques puis donne accès à des concepts, et une démarche globalisante, structurante et holistique de l'A&D.

Les concepts

La formalisation d'un méta-modèle unique mettant en avant des concepts métiers de l'A&D (systèmes d'A&D, installation nucléaire, équipement, etc.) permet de percevoir et de représenter, donc de modéliser des projets sous forme de systèmes interagissant entre eux. Il autorise donc l'abstraction, le raisonnement, ainsi que la structuration des données, des informations et des connaissances relatives à des projets d'A&D complexes, en mettant en avant des concepts plus généraux provenant de l'Ingénierie Système et de la modélisation d'entreprise (exigences, scénarios, organisation, rôle, activité, tâche, phase, jalon, etc.).

Ce méta-modèle met ensuite à disposition des parties prenantes et notamment des responsables de projets d'A&D un ensemble de relations et de mécanismes leur permettant d'évaluer, de simuler leurs projets, de mener à bien des analyses de sensibilité, et d'appréhender et tracer l'impact de toute modification.

Enfin, ce méta-modèle est utile et suffisant pour, à la fois, décrire et piloter les projets, tout en restant enrichissable et adaptable à d'autres cadres que le CEA.

La démarche opératoire

La démarche opératoire de la méthode met en avant deux étapes qui permettent de bien séparer la préparation de l'exécution des projets et des opérations d'A&D, tout en imposant un travail collaboratif et itératif, donc agile, et basé sur la nécessaire vérification et validation de chacune des étapes de préparation puis d'adaptation en exécution.

Référentiel Méthode

La démarche opératoire inclut notamment la création, le partage et l'utilisation de patrons de modélisation. Ceux-ci favorisent la capitalisation de connaissances en terme de modélisation des systèmes en jeu et de leurs caractéristiques. Ce Référentiel Méthode est bien entendu

appelé à s'enrichir de données, informations et connaissances métiers, de REX, et de bonnes pratiques.

Les outils et les langages métiers (DSML)

Enfin, différentes fonctionnalités ont été outillées, en visant en particulier la modélisation, l'analyse, la simulation et le pilotage, via des workflows adaptatifs. Leur implémentation a nécessité la définition de langages métiers, i.e. DSML (syntaxes abstraite et concrète, et règles de modélisation et de sémantique opérationnelle). Ces langages et ces premières fonctionnalités ont permis de se mettre en situation de test sur un chantier réel pilote.

Limitations perçues

Nous pensons que les limitations de la méthode sont essentiellement liées à l'implémentation de l'outil support, très incomplète et qui ne permet pas une démonstration suffisante vis-à-vis du chantier pilote. Les possibilités de vérification, de simulation, et d'évaluation restent en effet très limitées.

L'interopérabilité entre cet outil et les autres outils métiers, initialement visée par ces travaux, a de fait été placée en frontière de la thèse. En effet, même si le méta-modèle est unifié et assure l'interopérabilité des modèles que l'on peut construire, il est maintenant nécessaire de formaliser et d'implémenter la sémantique opérationnelle des DSML. Il est également nécessaire de se poser la question de la transformation et de l'alignement de modèles construits sur la base de ce méta-modèle avec les modèles construits avec des outils externes. Ensuite, la notion de workflow adaptatif, évoquée et mise en avant, n'a pas pu faire l'objet des développements nécessaires à sa mise en œuvre.

Perspectives

Malgré ces limitations importantes, la méthode proposée préconise des principes, une pensée et des moyens pour lever l'ensemble des verrous identifiés en début de manuscrit (voir **Tableau VI**).

Pour conclure, il est important de préciser que les travaux de thèse auront davantage servi, en tant que thèse inaugurale dans ce domaine de la gestion des projets de l'A&D, à dégrossir puis à identifier de nombreuses perspectives possibles en Recherche, en Analyse industrielle, et en Développement.

Celles-ci se présentent autour de trois thèmes :

- Implémenter la méthode dans un outil robuste, pérenne, et interopérable, par :
 - L'analyse et l'implémentation de la sémantique opérationnelle applicable à chaque langage de modélisation, en s'inspirant de travaux existants (Lemazurier, 2018) (Chapurlat, et al., 2013) dans ce domaine ;
 - Le développement d'algorithmes de création et génération automatique de composants logiciels à partir du méta-modèle de la méthode, qui peut potentiellement évoluer, en s'inspirant des travaux réalisés dans cette thèse conjointement avec (Bourdon, 2018) ;
 - Le déploiement de l'outil final collaboratif de conception et d'organisation considérant les éléments de la méthode, en considérant les apports de l'existant (e.g. ensemble des travaux référencés d'INDEX et DEM2018) ;
 - L'alignement de cet outil avec les outils des systèmes d'information de l'entreprise étendue, en utilisant, entre autres résultats, ceux des travaux de (Malaval, 2017), et en développant des mécanismes de transformation de modèles ;
- Aller vers une ontologie métier de l'A&D enrichie de connaissances, grâce à :
 - La consolidation de l'ontologie métier de l'A&D et le développement de modèles de données, informations, et connaissances pour optimiser la gestion transverse des référentiels de connaissances, en s'inspirant de travaux de recherche tels que (Samah, et al., 2016) ou (Plana, et al., 2018) (SAMAH 2018) ;
 - L'étude, la justification, et la consolidation des critères de performance de l'A&D ;
 - L'identification pour tous les concepts des nombreuses connaissances et donc des patrons de modélisation susceptibles d'être générés ;
 - Le développement d'algorithmes de recherche et création automatique de patrons de modélisation, basé notamment sur une analyse de similitudes ;
- Mettre en œuvre la méthode sur des chantiers concrets et la déployer à l'échelle industrielle, via :
 - La mise en œuvre des démonstrations préconisées sur le chantier pilote, notamment via la réalisation de preuves de concept sur les éléments de la méthode pas ou peu développés (par exemple la dynamique qui relève du workflow adaptatif) ;
 - La démonstration de la transposition à d'autres cadres de l'A&D, et l'optimisation de la méthode aux cas d'ICPE, d'installations mobiles et de sites anciens ;
 - La mise en place du rôle d'architecte système et les mesures adéquates associées de formation et d'accompagnement au changement.

Annexes

Annexe I : Démarche bibliographique menée

Pour diverses raisons (cadre récent de l'A&D dans les années 2000, accident nucléaire de Fukushima en 2011 suscitant de nombreux problèmes méthodologiques et techniques (Noda, 2018), etc.) une grande partie de la bibliographie portant sur les travaux pour la levée des verrous, notamment techniques, sont postérieures au début du projet de thèse, c'est-à-dire publiés depuis 2016. On le constate par l'apparition progressive des sujets en lien avec ces nouvelles technologies du numérique et de la mécatronique dans les groupes de travail des différentes organisations, dans les conférences et séminaires, etc.

Ainsi, afin de garantir un certain niveau de veille sur l'état de l'art tout au long du projet de thèse, nous avons identifié dès le début des travaux de thèse, fin 2016, les principales ressources pouvant être utilisées, pour engranger des connaissances plutôt dans un des deux domaines (A&D/Métier ou Systémique) ou dans les deux. Cela nous a permis de suivre les évolutions dans les deux domaines au regard des problématiques et verrous identifiés.

Domaine	Systémique - Théorique	Démantèlement - Pratique	Les 2
Ressources utilisées	<ul style="list-style-type: none"> • Normes : AFNOR, CEN, ISO, (CEI), (W3C), (EAN-UPC-GS1), (ECMA), (ANSI), (NIST), (JISC), (SAC), (IEEE),... • Ressources de l'IMT Mines Alès : thèses, articles, travaux réalisés, etc. • Documentation AFIS, INCOSE, SEBoK, ... 	<ul style="list-style-type: none"> • ASN : guides, décisions, RFS... • IRSN • AIEA (INIS) • Documentation technique d'installations • Documents projets d'A&D et référentiels DDCC et DEN (référentiel R2MP) • PVSI, SFEN, Cyclium, PNB • CSFN • Normes : ISO, ASTM,... • OECD-NEA • WNA (World Nuclear Association) • CSSIN/HCTISN 	<ul style="list-style-type: none"> • Bibliothèques CEA Marcoule Grenoble Cadarache Saclay : G2I, outil Sygeca • Revues scientifiques : Techniques de l'ingénieur,... • INSTN : documentation et formations • Formations diverses • Ressources humaines et connaissances propres aux : directeur de thèse, encadrants écoles et CEA, référent DPAD (DDCC), parties prenantes au projet,... • Thèses et HDR • HAL archives ouvertes • Bases de recherche bibliographique mises à disposition au CEA (Sygeca, WOS, Sudoc, INIS, Orbit, Sagaweb, ProQuest, Scopus,...)

Domaine	Systémique - Théorique	Démantèlement - Pratique	Les 2
		<ul style="list-style-type: none"> • Intranet CEA (Monographies DEN, documents départements,...) • Documentation juridique : lois (code environnement), décrets, arrêtés, directives européennes • Documents internes REX : BDREX, BCD,... • Conférences : WM, ICOND, DEM, INDEX,... 	<ul style="list-style-type: none"> • Internet (Google, références Wikipédia,...) • Benchmarks applicatifs d'autres domaines (Automobile, Aéronautique, Défense,...) • Séminaires, conférences, congrès divers

Plus spécifiquement, nous avons également initié une démarche de recherche sur les bases bibliographiques indexant les communications scientifiques (voir tableau ci-dessus : Web of Science, Scopus, INIS, etc.) dans le but de vérifier l'existence ou non de travaux de recherche visant à confronter les connaissances de l'approche systémique aux problématiques évoquées de l'A&D.

Nous ne détaillerons pas la démarche entière réalisée, mais pouvons noter certains points importants de celle-ci :

- Nous avons organisé nos recherches selon des mots-clés répartis en plusieurs colonnes, sémantiquement proches ou portant sur un même domaine (voir deux premiers tableaux suivants) ;
- Les recherches se sont organisées en mixant les mots-clés d'un certain nombre de colonnes, en fonction des objectifs de chaque recherche (les résultats recherchés doivent comporter au moins un mot-clé de chaque colonne retenue) ;
- Les premières recherches sur les textes intégraux, mixant notamment les 4 premières colonnes, ont donné soit beaucoup trop de résultats pour être exploitables, soit pas assez voire aucun résultat en y ajoutant les colonnes 5 à 8 ;
- Nous avons ainsi réduit les mots clés utilisés (voir dernier tableau de cette Annexe, pour éviter notamment les mots-clés parasites trop communément utilisés dans n'importe quel autre domaine que l'A&D : système, contamination, etc. En effet, pour donner un exemple, de très nombreux résultats non pertinents avec le domaine de l'A&D pouvaient notamment contenir les termes « contamination », « assainissement », « système », et « structure d'entreprise », lorsque l'on mixait les 4 premières colonnes ;
- Nous avons également concentré nos recherches davantage sur les résumés et les titres ;
- Nous avons enfin focalisé davantage nos recherches sur la base INIS spécialisée dans le domaine pour filtrer les éventuels résultats non pertinents, en dehors du domaine nucléaire, qui subsisteraient.

Nous avons constaté, par notre étude bibliographique sur les bases de données classiques, qu'en dehors des travaux de R&D techniques (techniques d'assainissement, de démantèlement, de conditionnement des matières, d'investigation, etc.) et scientifiques (études des comportements physiques, chimiques, radiologiques, etc.), le domaine de la gestion des projets d'A&D est relativement fermé. En effet, à titre d'exemple, malgré la réalisation et la communication d'articles, les actes de conférences internationales telles que Waste Management Symposia, DEM2018, et INDEX 2018, pourtant reconnues au niveau international, ne sont pas référencées sur les bases bibliographiques classiques et donc difficilement accessibles.

Il est donc malheureusement difficile d'évaluer la fiabilité de notre état de l'art par une simple analyse des bases de données bibliographiques scientifiques, d'où la nécessité d'utiliser toutes les ressources identifiées et la pertinence d'avoir réalisé un travail de veille par les autres méthodes évoquées : échanges avec les parties prenantes, suivi des événements significatifs (conférences, groupes de travail, pôles de compétitivité, etc.), analyse de l'évolution des pratiques, des normes, des standards et des réglementations, etc.

Mots-clés en français

	1 A&D	Ou	2 Installations	Ou	3 Organisation & Modélisation	Ou	4 Approche systémique	Ou	5 Pilotage chantier	Ou	6 Industrie	Ou	7 Performance	Ou	8 Amélioration continue
		Et		Et		Et		Et		Et		Et		Et	
Mots clés français	Assainissement*		Nucléaire*		Théorie des organisations		Ingénierie Système*		Chantier*		Reproductib*		Coût*		Amélioration continue
	Démantèlement*		Radioacti*		Modélisation d'entreprise		Approche* système*		Scénari*		Industr*		Délai*		Retour d'expérience
	Déclassement*		Contamination		Lean Manufacturing		Système* complexe*		Gestion* de projet*		Produi*		Qualité		REX
					Changement* organisationnel*		Systémique*		Management de projet*		Producti*		Sûreté		Etat de l'art
					Modélisation* de* processus		Architecture* organique*		Planifi*		Processus		Sécurité		
					Modèle* de* processus		Architecture* fonctionnelle*				Procédure*				
					Modélisation* d'activité*						Qualificat*				
					Modèle* d'activité*						Certif*				
					Structure* d'entreprise*						Standard*				
					Comportement* d'entreprise*						Normalis*				
					Fonction* d'entreprise*						Norme				
					Entreprise* étendue*						Normes				
					Système* d'information*										
					Partage* d'information*										

Mots-clés en anglais

	1	Or	2	Or	3	Or	4	Or	5	Or	6	Or	7	Or	8
	Decommissioning	And	Installations	And	Organization & Modeling	And	Systemic approach	And	Worksite supervision	And	Industry	And	Performance	And	Continual improvement
	Sanitation		Nuclear		Organizational theor*		System* Engineer*		Worksite*		Reproducibility		Cost*		Continual improv*
	Dismantl*		Radioactiv*		Enterprise Model*		System* science*		Working area*		Industr*		Time		Continuous improv*
	Decommission*		Contamination		Business Model*		System* approach*		Project Manag*		Product*		Quality		Feedback*
					Lean Manufactur*		Complex system*		Schedul*		Process*		Safety		Post-mortem
					Business process engineer*		Systemics		Plan*		Procedure*		Security		Postmortem
					Process model*		Organic architecture*		Scenari*		Qualificat*				State of the art
					Activity model*		Functional architecture*				Certificat*				State-of-the-art
					Enterprise structure		Engineer* System*				Standard*				Cutting edge
					Enterprise behavio*						Normaliz*				
					Enterprise function*						Norm				
					Business process*						Norms				
					Extended enterprise*						Certify*				
					Extended compan*						Qualify*				
					Information system*										
					Information* shar*										
					Organizational change*										
					Enterprise architecture*										
					Enterprise integration*										
					Enterprise Engineer*										

Mots
clés
anglais

Mots-clés réduits

		1	Ou	2	Ou	3	Ou	4	Ou	5	Ou	6	Ou	7	Ou	8
		A&D	Et	Installations	Et	Organisation	Et	Approche systémique	Et	Pilotage chantier	Et	Industrie	Et	Performance	Et	Amélioration continue
Mots clefs Français		Assainissement*		Nucléaire*		Théorie des organisations		Ingénierie Système*		Suivi* de chantier*		Reproductibilité		Coût*		Amélioration continue
		Démantèlement*				Modélisation d'entreprise		Approche* système*		Pilotage* de chantier*		Industrialisation		Délai*		Retour d'expérience
		Déclassement*				Lean Manufacturing		Systemique*		Gestion* de projet*		Industrie		Qualité		REX
						Modélisation* de* processus				Management de projet*				Sûreté		Etat de l'art
						Modèle* de* processus				Planifi*				Sécurité		
										Scénari*						
Mots clefs Anglais		Decommissioning	Or And	Installations	Or And	Organization	Or And	Systemic approach	Or And	Worksite supervision	Or And	Industry	Or And	Performance	Or And	Continual improvement
		Sanit*		Nuclear		Organizational theor*		System* Engineer*		Worksite* supervision		Reproducibility		Cost*		Continual improv*
		Dismantl*				Enterprise Model*		Engineer* System*		Working area* supervision		Industrialization		Time		Continuous improv*
		Decommission*				Business Model*		System* approach*		Worksite* monitor*		Industry		Quality		Feedback
						Lean Manufactur*		System* science*		Working area* monitor*				Safety		Post-mortem
						Business process engineer*		Systemics		Worksite* manag*				Security		Postmortem
						Process model*				Working area* manag*						State of the art
						Enterprise Engineer*				Worksite* follow-up						State-of-the-art
										Working area* follow-up						Cutting edge
										Project* Manag*						

Annexe II : Les différents points de vue du méta-modèle

Cette Annexe II présentera les diagrammes de l'ensemble des points de vue présentés au Chapitre III.

Afin d'en faciliter la compréhension, les premiers diagrammes, à savoir le « (Global) Hierarchy » puis ceux de type « (Detail) XXX », permettent de préciser les héritages et relations depuis la classe mère *DAndDPlatform*, pour des concepts en particulier, afin de mieux appréhender l'architecture du méta-modèle et les attributs et relations hérités.

Ainsi, par mesure de lisibilité, la plupart des attributs et relations hérités des méta-classes présentées dans les diagrammes de type « (Detail) XXX » et le « (Global) Hierarchy », ne sont pas affichées dans les points de vue « (View) YYY » : e.g. les relations *modelingObjectAttributes*, *induces*, *respondsTo*, etc. Seules celles permettant de relier deux concepts d'un même point de vue le sont (e.g. *source*, *target*, etc.).

De plus, pour les mêmes raisons de lisibilité, tous les attributs et les relations relatifs aux *ModelingPattern*, concept présenté dans la suite du Chapitre III après le méta-modèle, ne sont pas affichés dans les diagrammes de points de vue présentés dans cette Annexe II.

Enfin, concernant les attributs et relations, un « / » signifie que celles-ci pourront être déduites ou calculées automatiquement à partir d'autres attributs ou relations du modèle, en implémentant les règles de modélisation adéquates.

Code couleur des classes de concept affichées dans les diagrammes :

- Grise : classes abstraites ne pouvant pas être instanciée ;
- Violette : classes qui ne sont pas abstraites et héritant de la classe abstraite *StudyManager* ;
- Orange : classes qui ne sont pas abstraites et héritant de la classe abstraite *DSMLPlatform* ;
- Verte : classes d'énumérations proposant, à un attribut du type d'une de ces classes, un ensemble figé de valeurs ;
- Jaune : toutes autres classes qui ne sont pas abstraites.

Diagramme « (Global) Hierarchy »

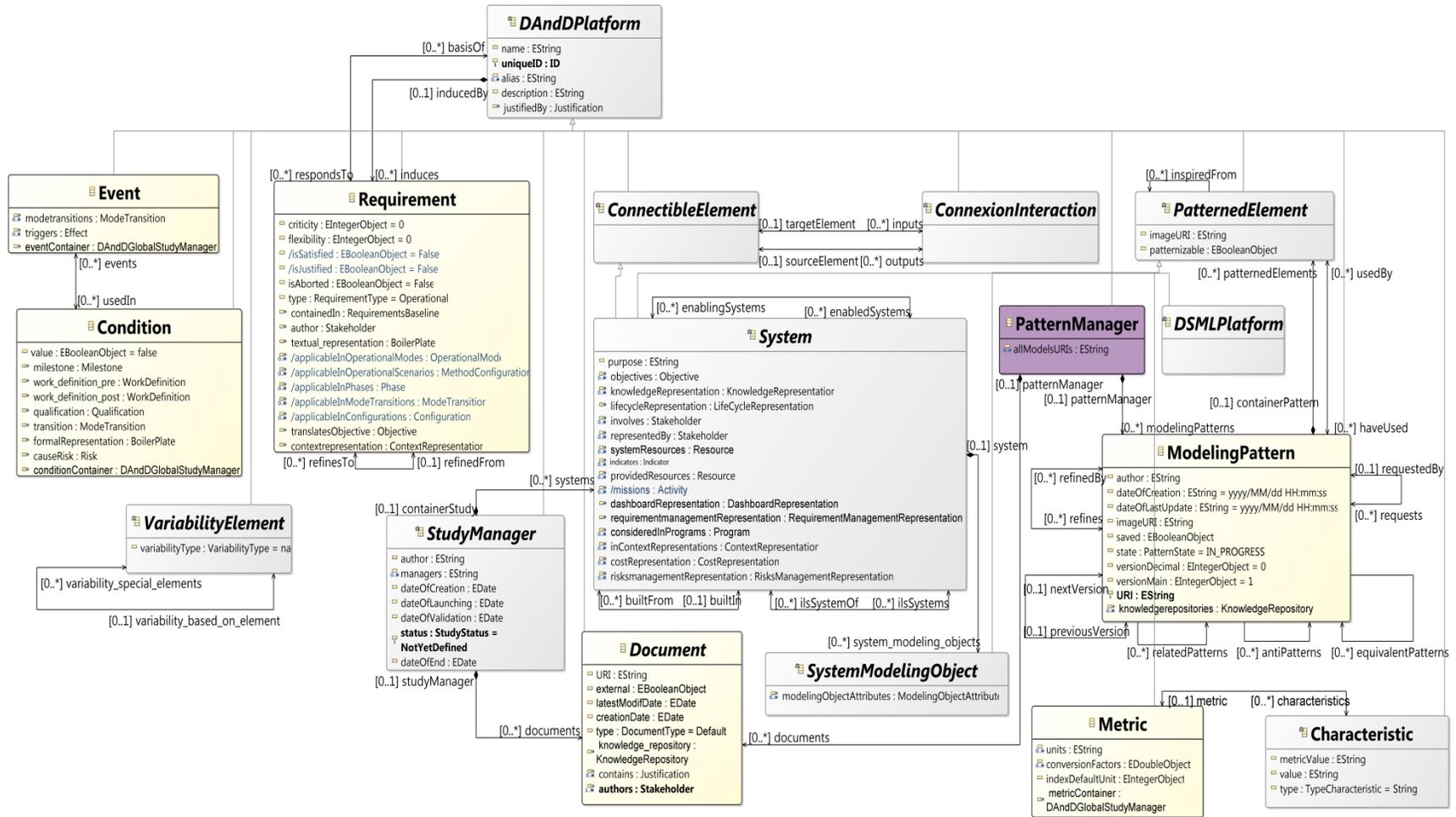


Diagramme « (Detail) Characteristic »

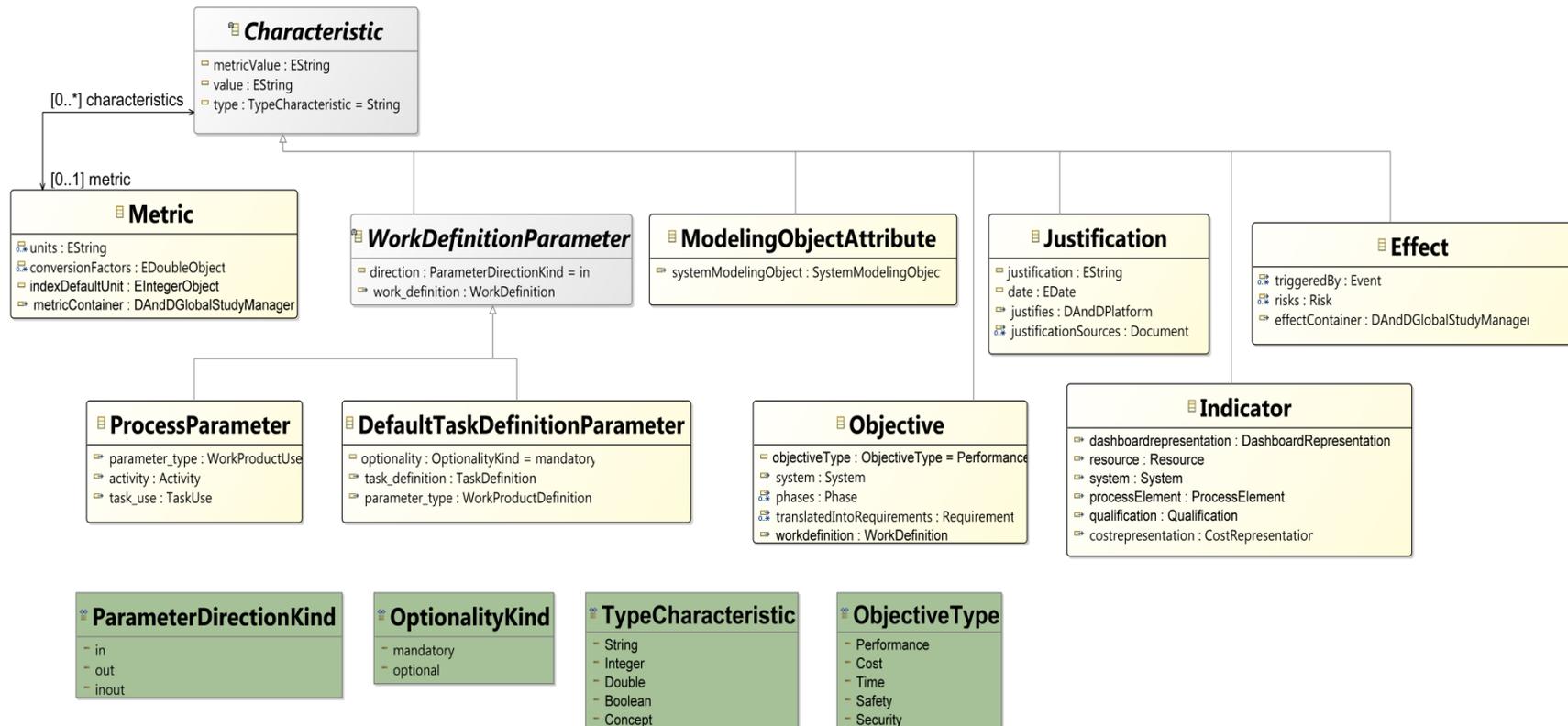


Diagramme « (Detail) Description of DandD studies »

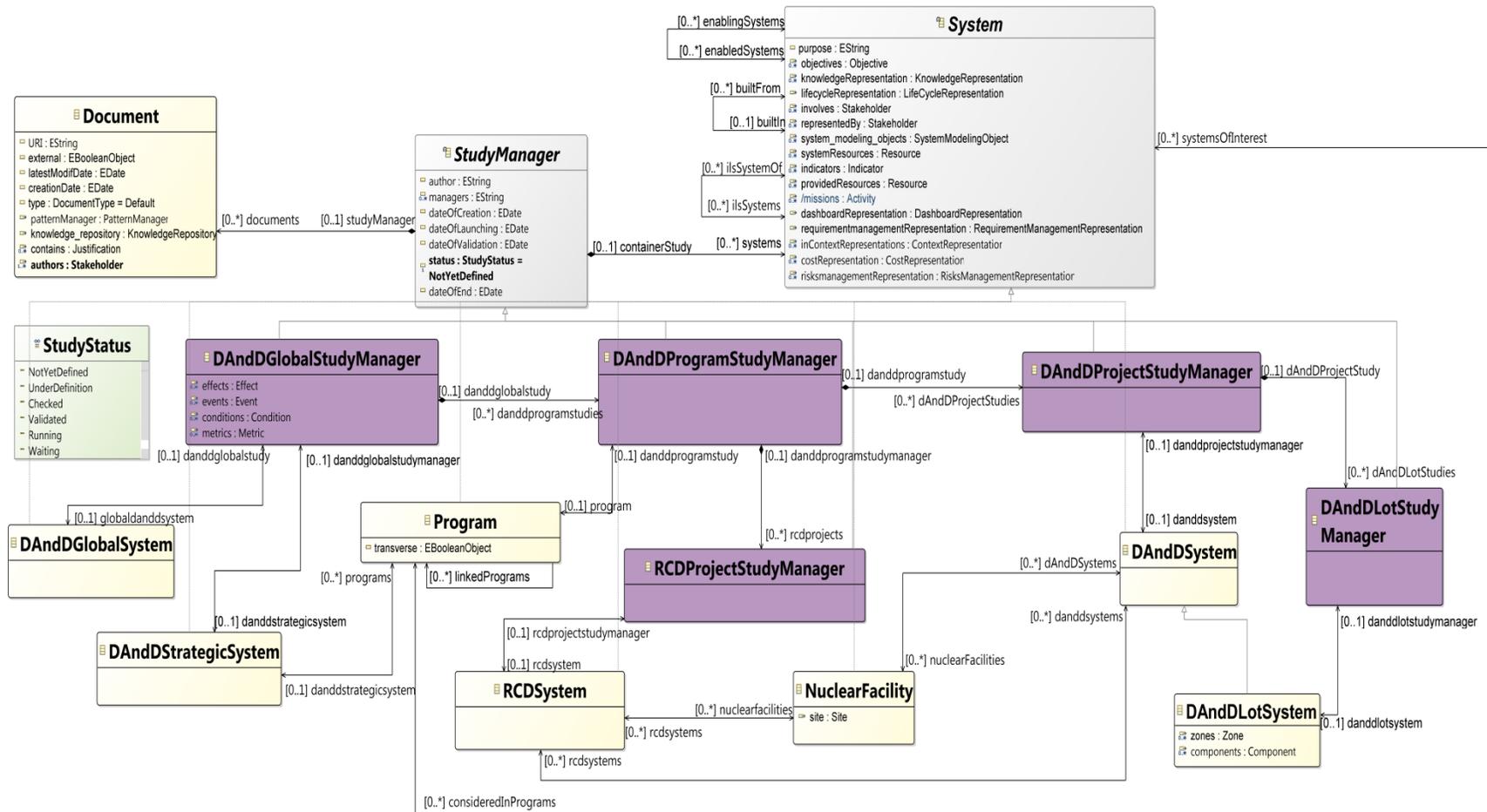


Diagramme « (Detail) Knowledge Repositories »

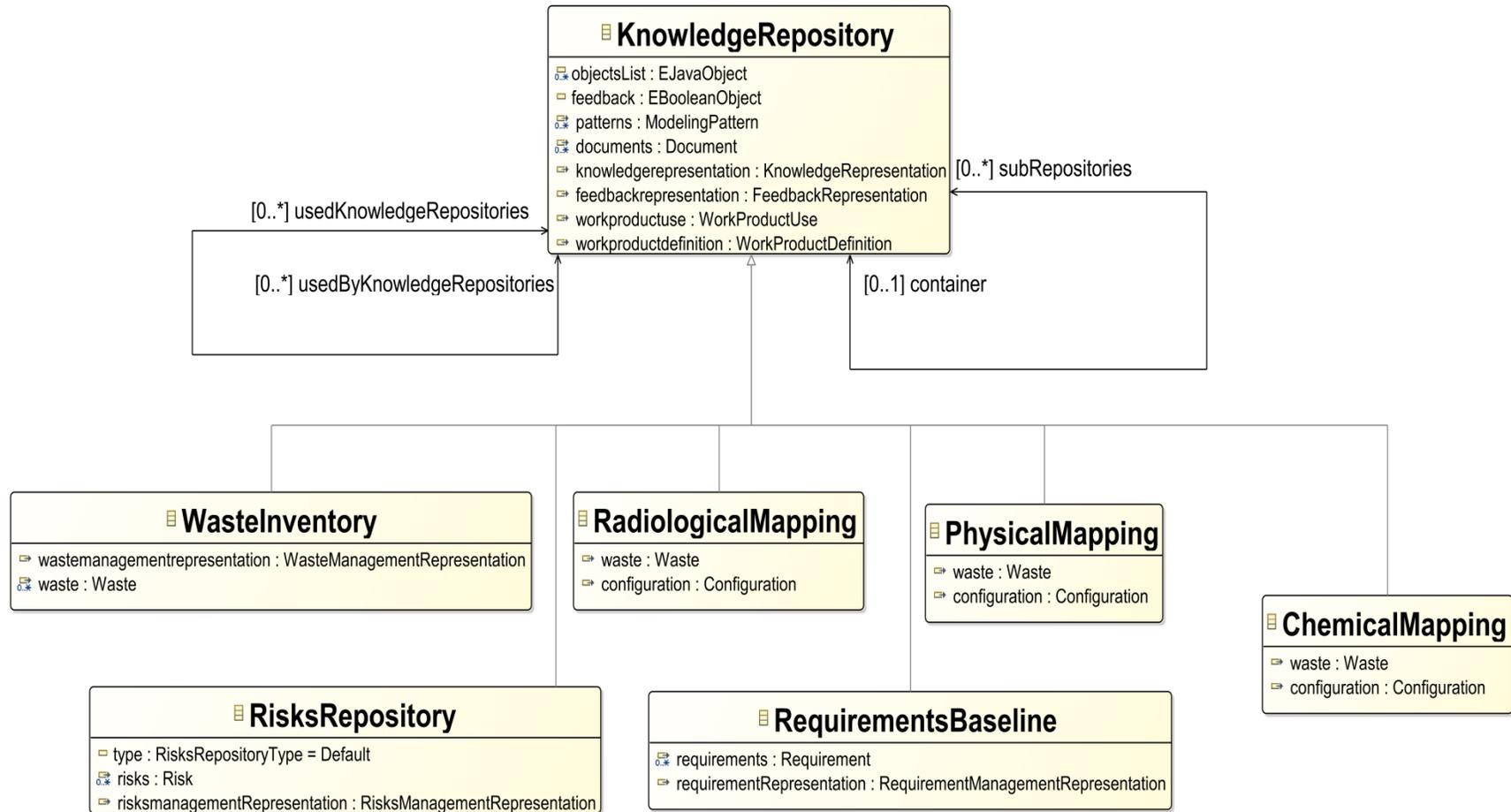


Diagramme « (Detail) Breakdown Elements »

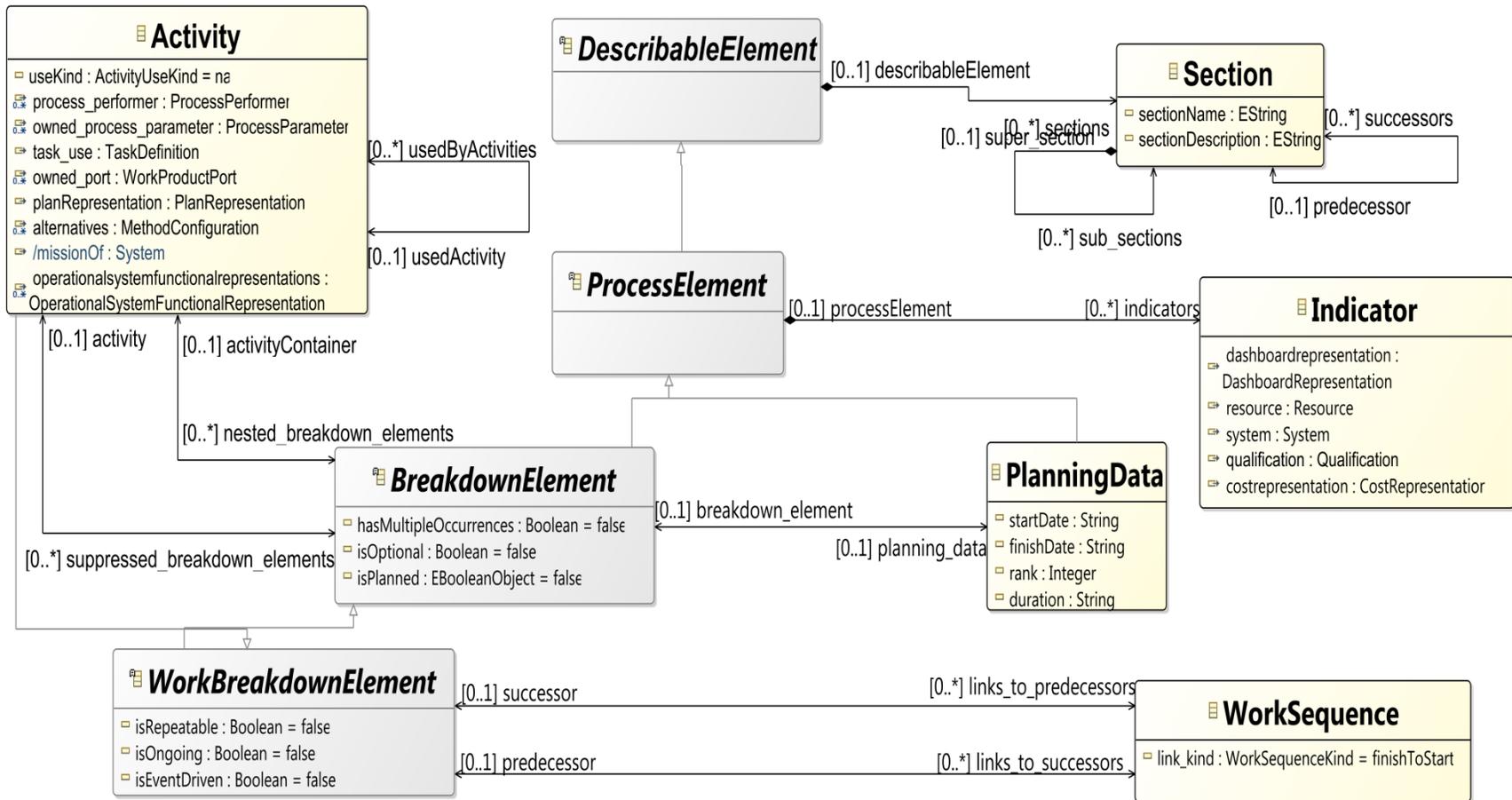


Diagramme « (Detail) Modeling Object Hierarchy »

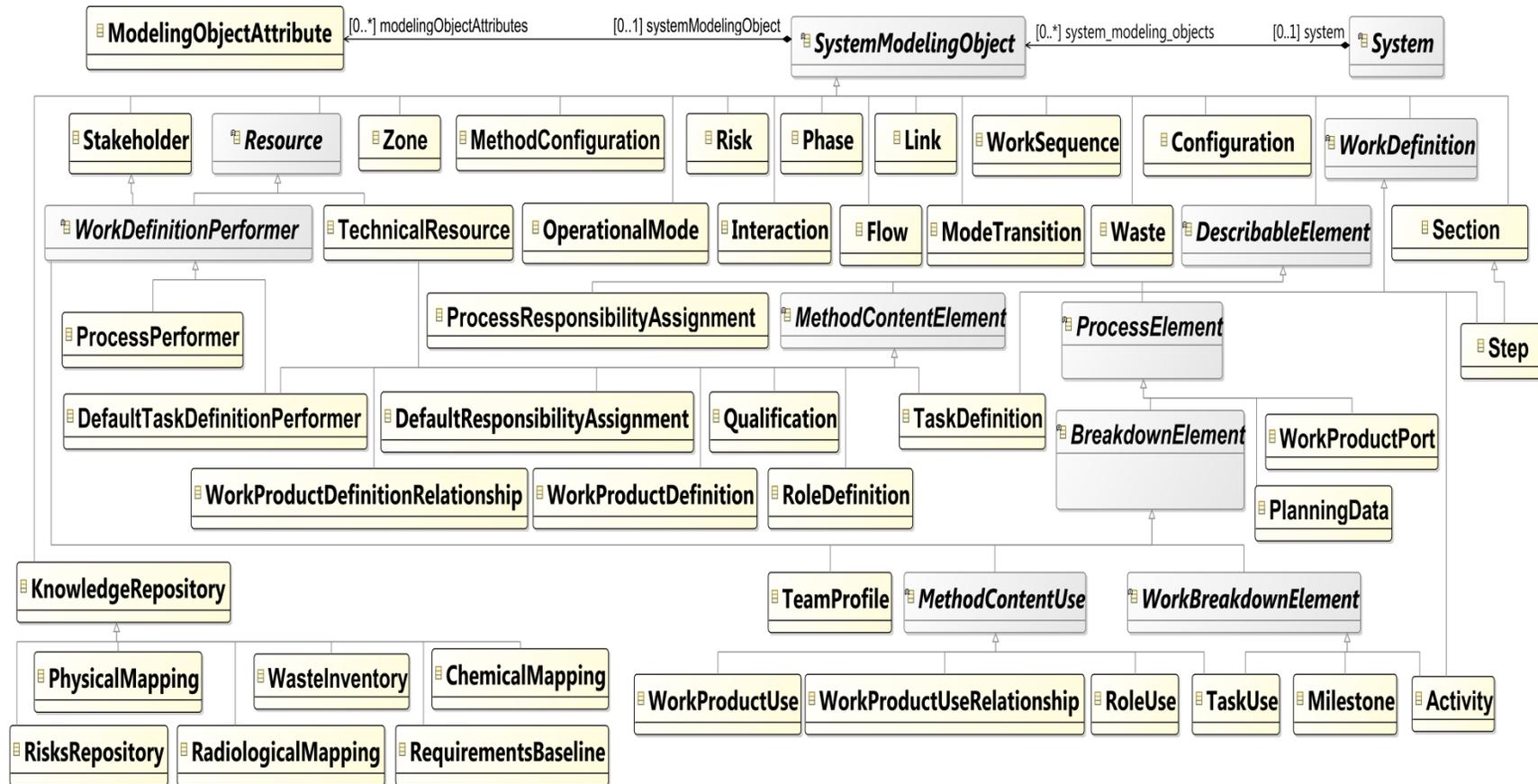


Diagramme « (Detail) Connectible Element & Connexion Interaction Hierachy »

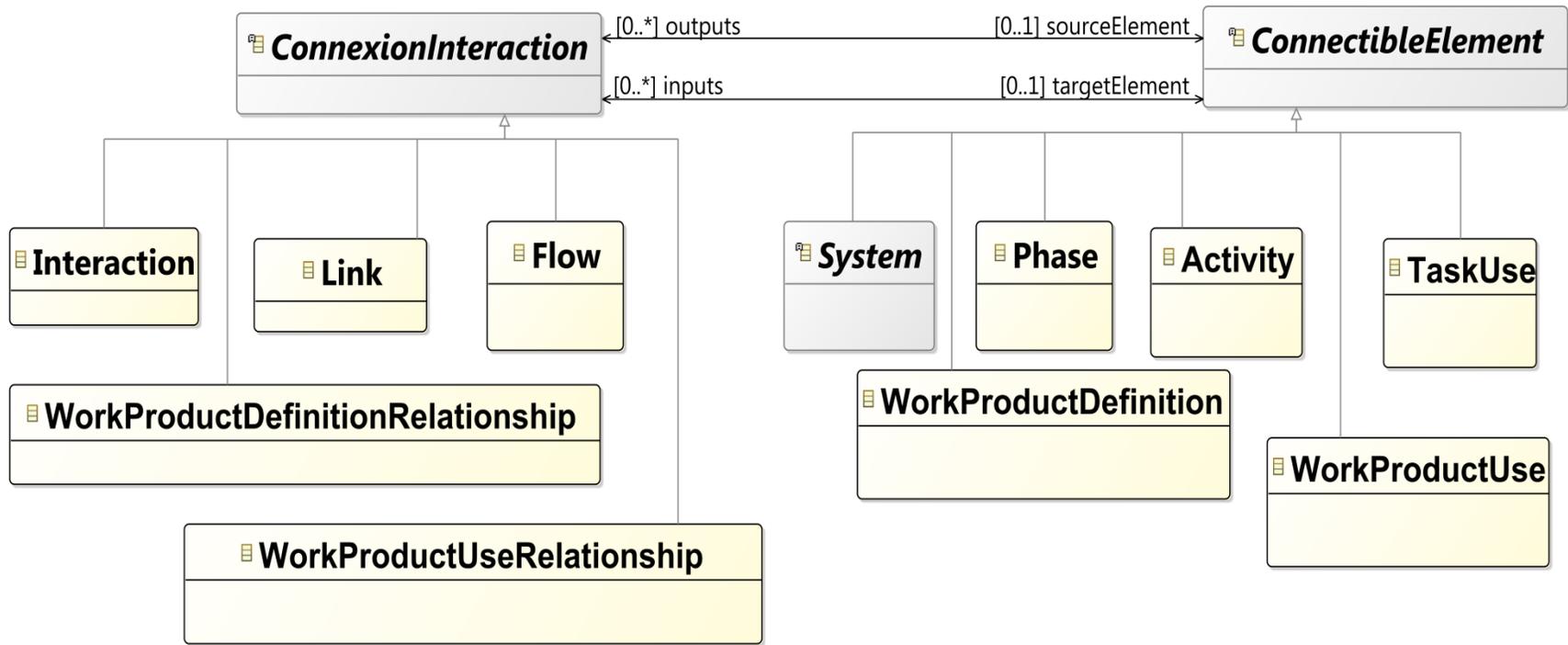


Diagramme « (Detail) System and Object views »

Voir Figure 25

Diagramme « (Detail) Description of Pattern Manager »

Voir Figure 33

Diagramme Point de vue 1) « (View) Operational System Functional »

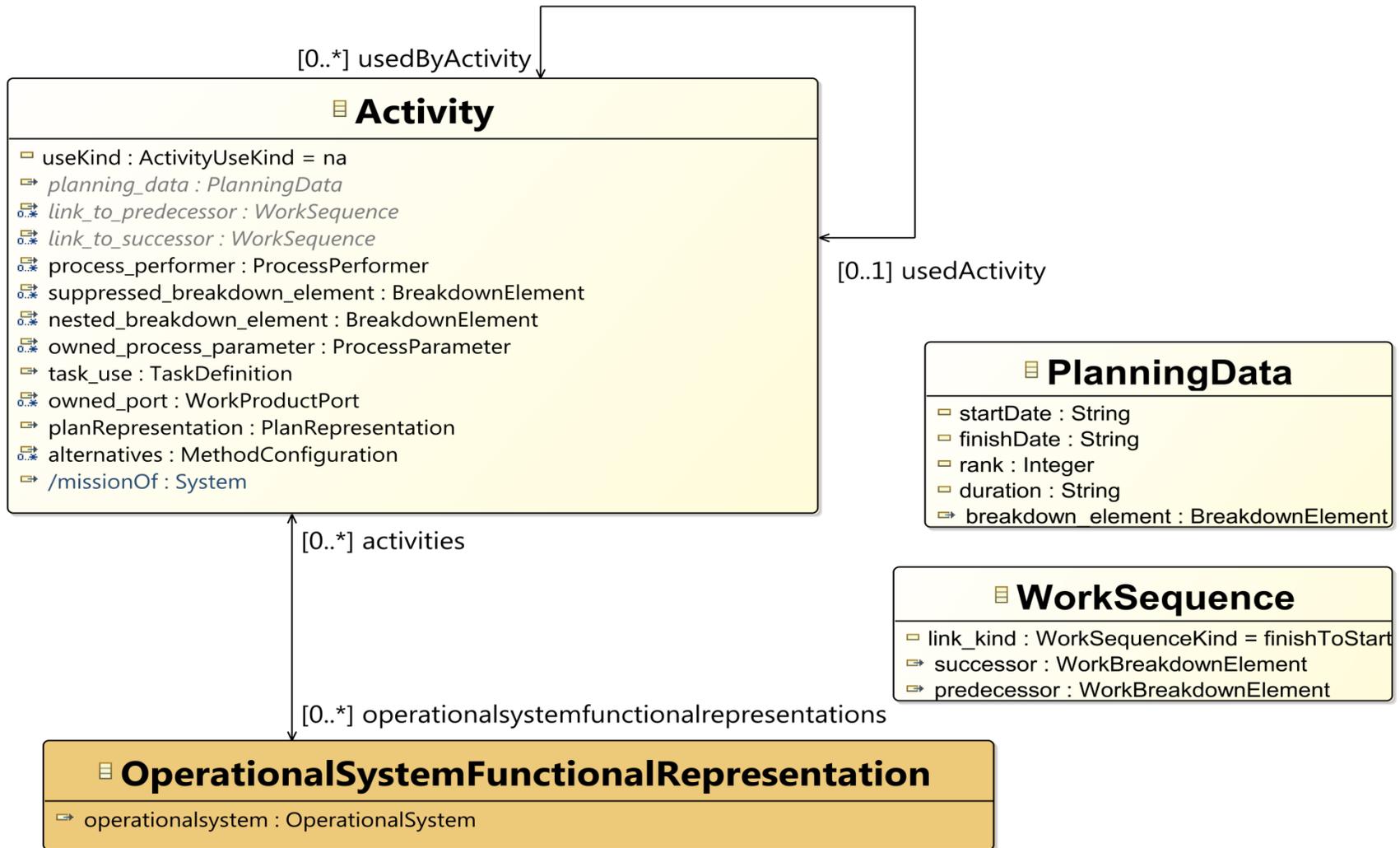


Diagramme Point de vue 2) « (View) Operational System Physical »

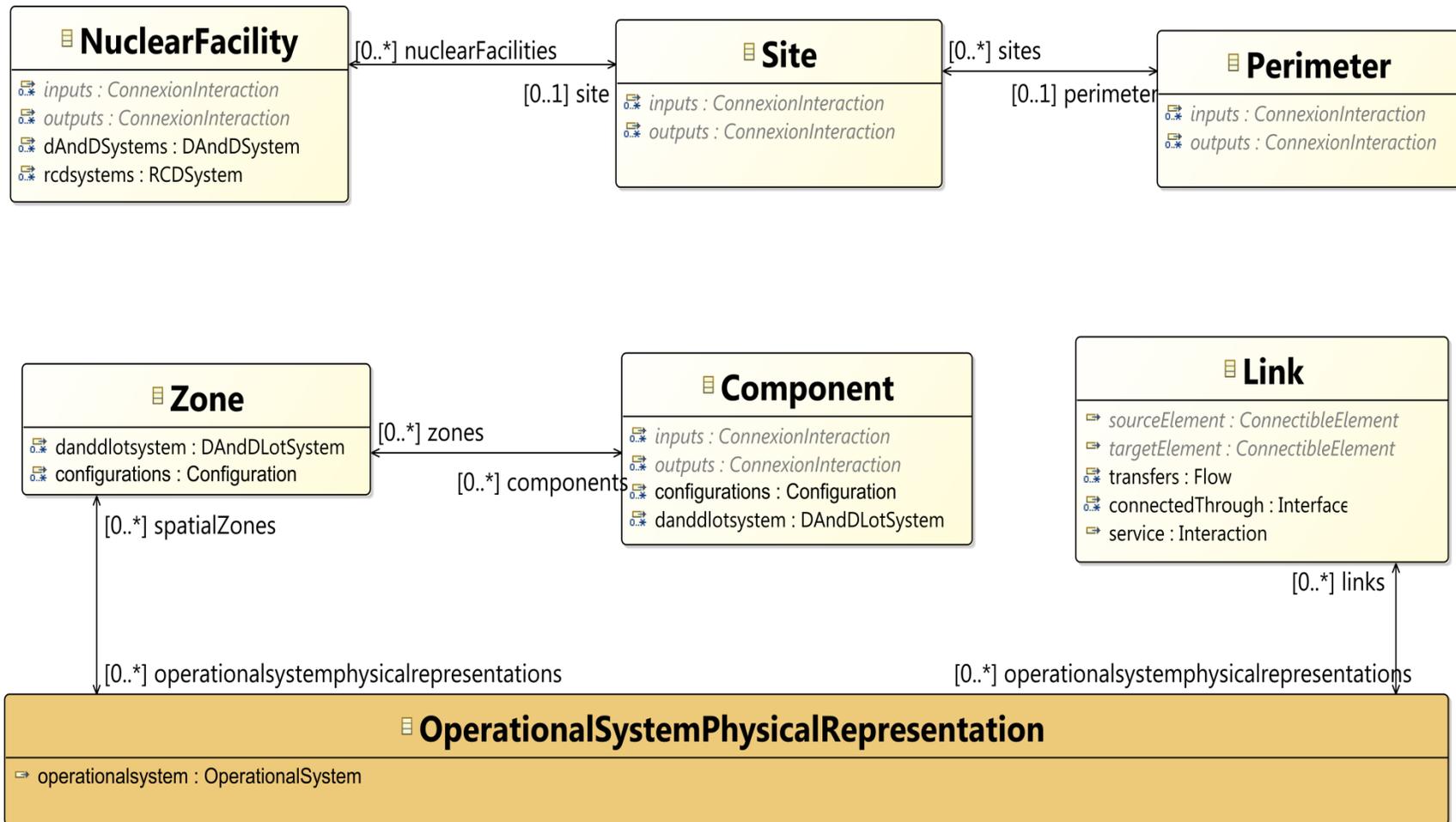


Diagramme Point de vue 3) « (View) Activity Plan »

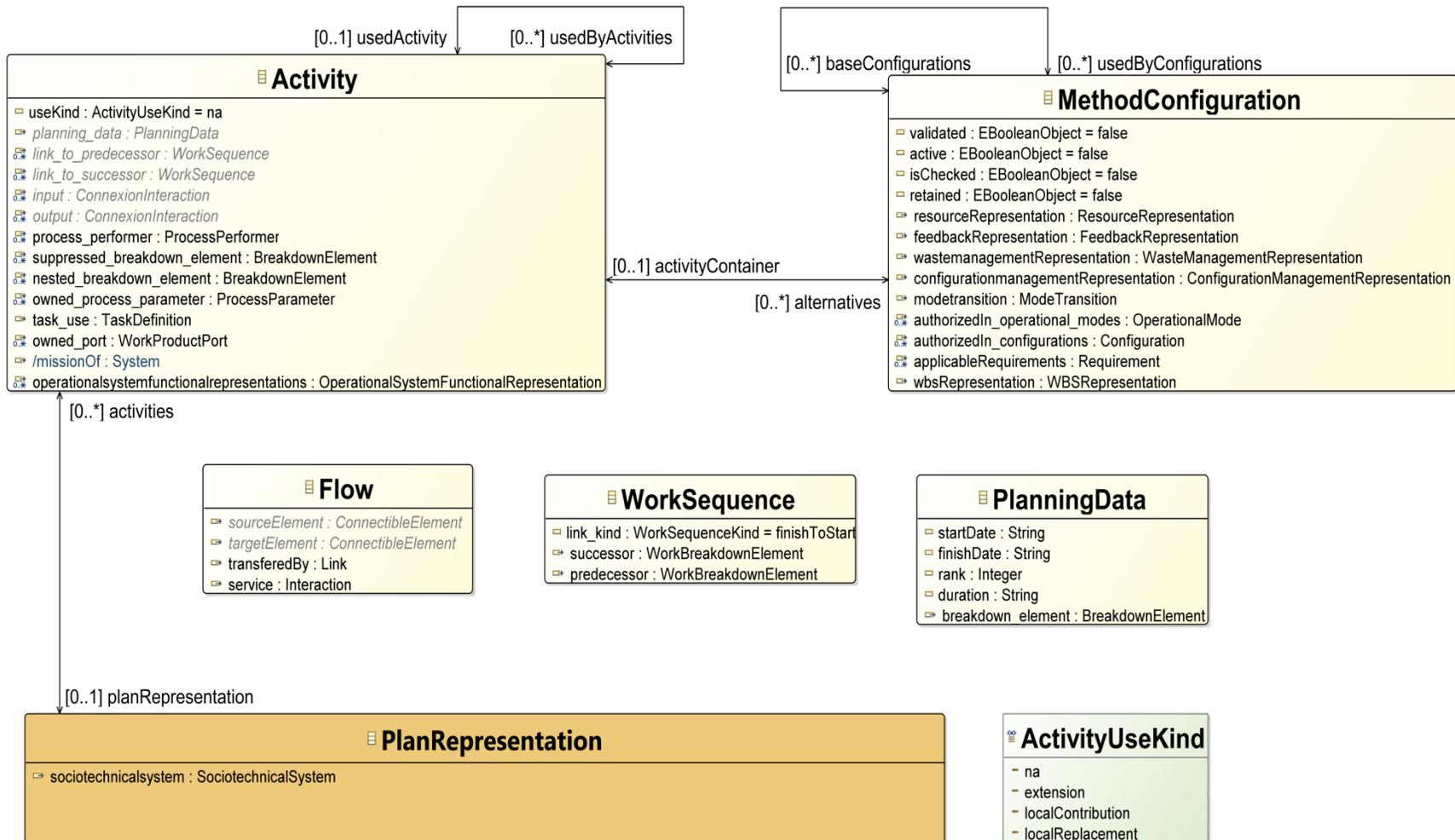


Diagramme Point de vue 4) « (View) Work Breakdown Structure »

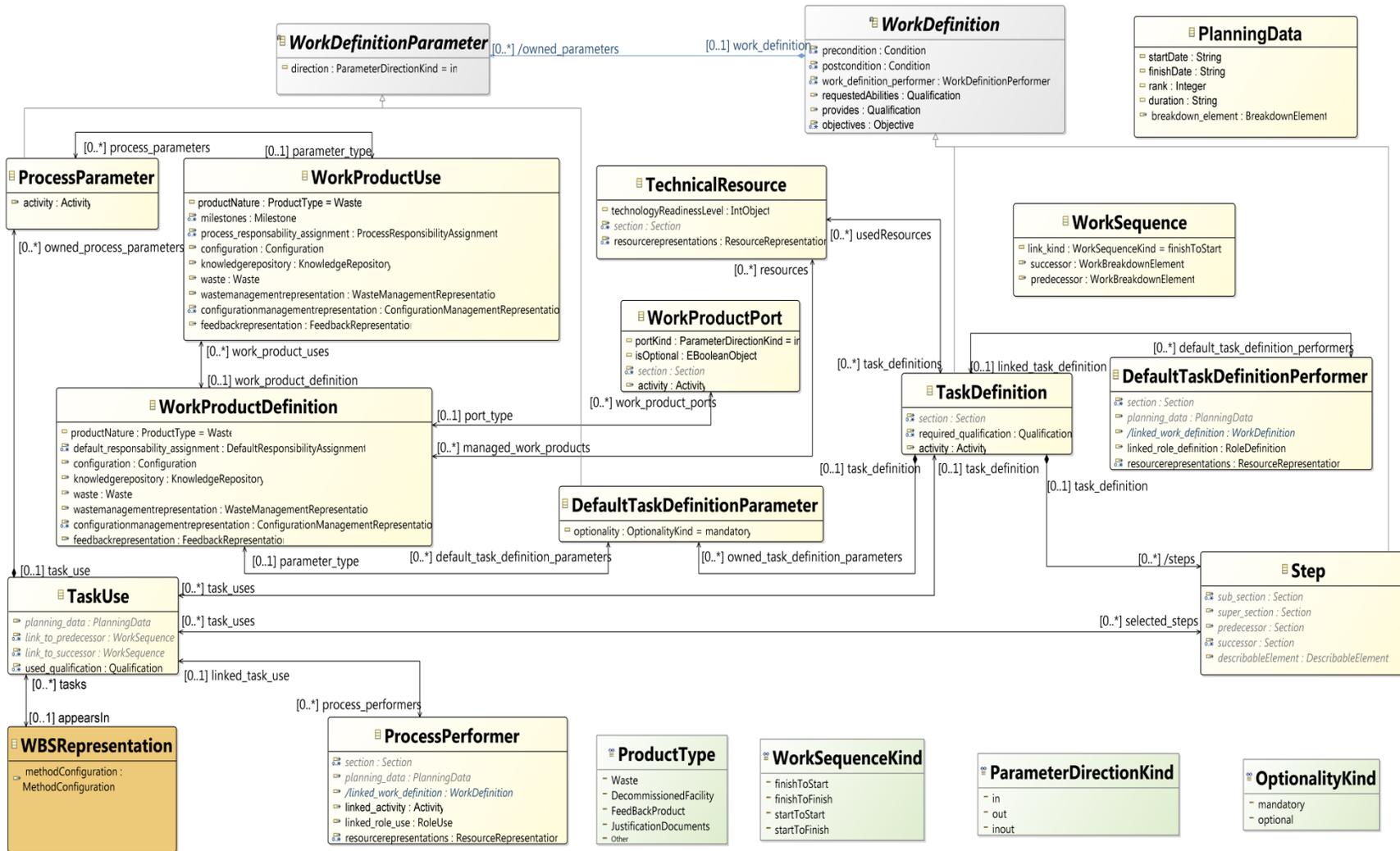


Diagramme Point de vue 5) « (View) Resources »

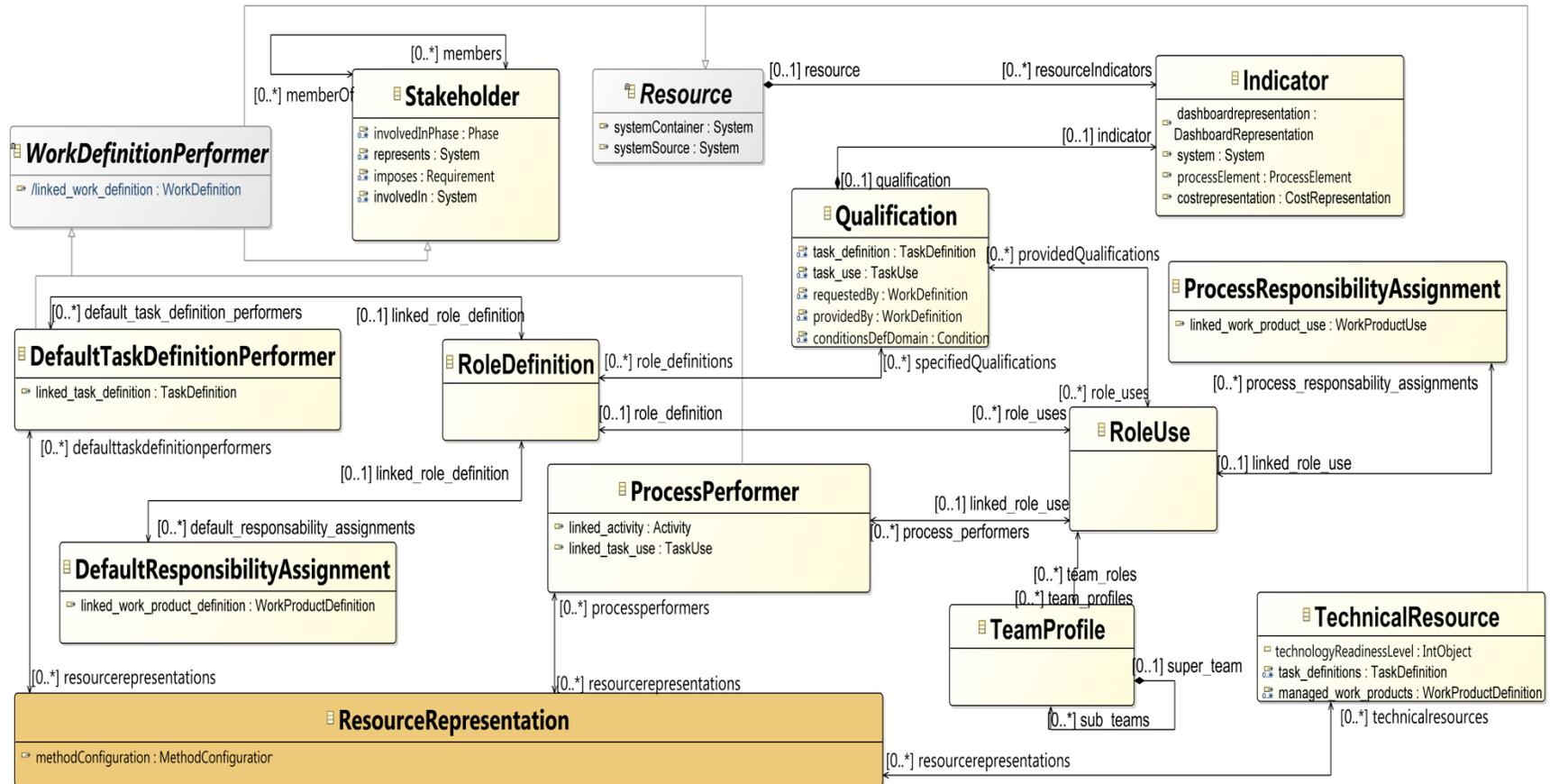


Diagramme Point de vue 6) « (View) Life Cycle »

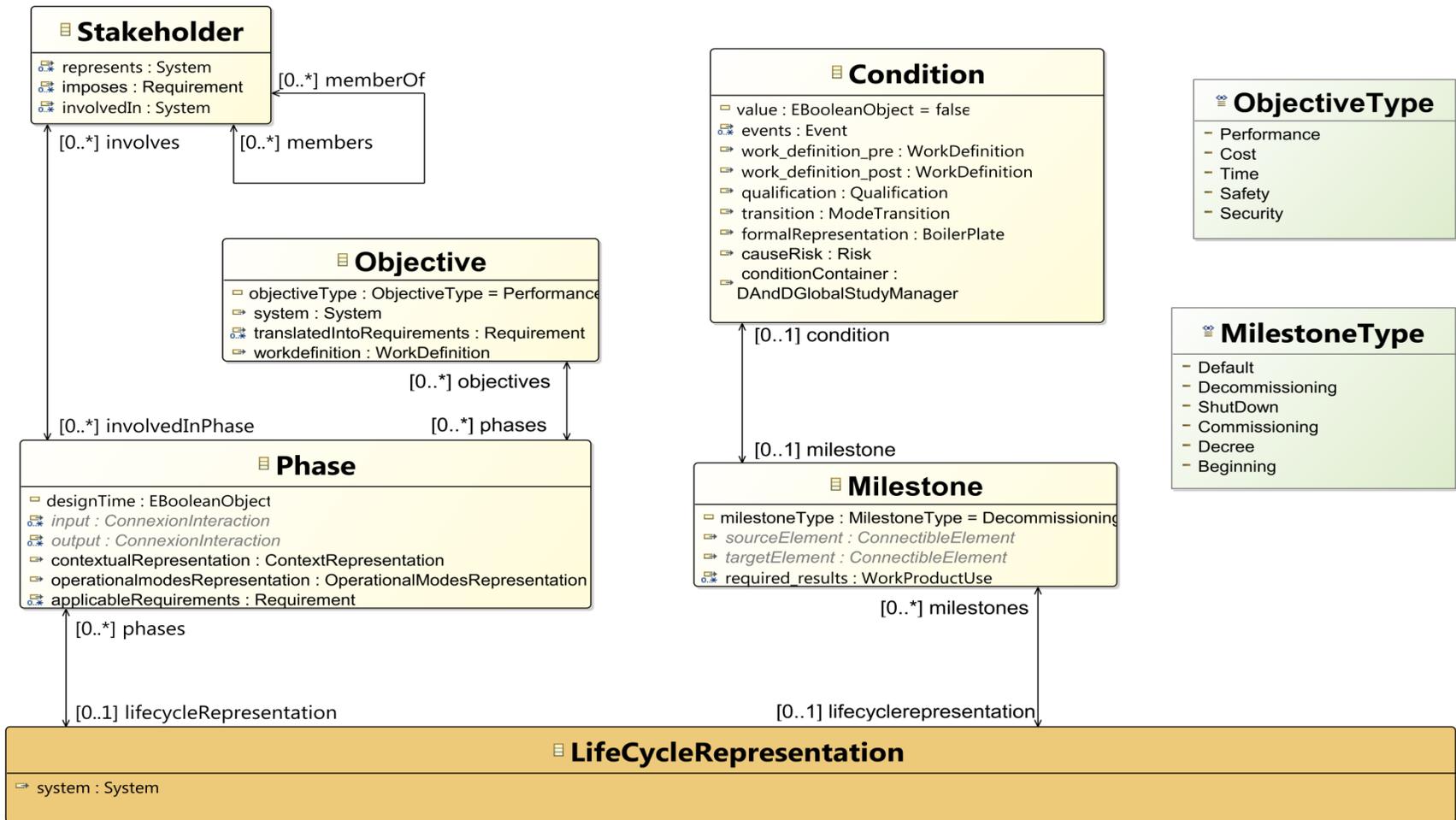


Diagramme Point de vue 7) « (View) Contextual »

Voir Figure 26

Diagramme Point de vue 9) « (View) Costs »

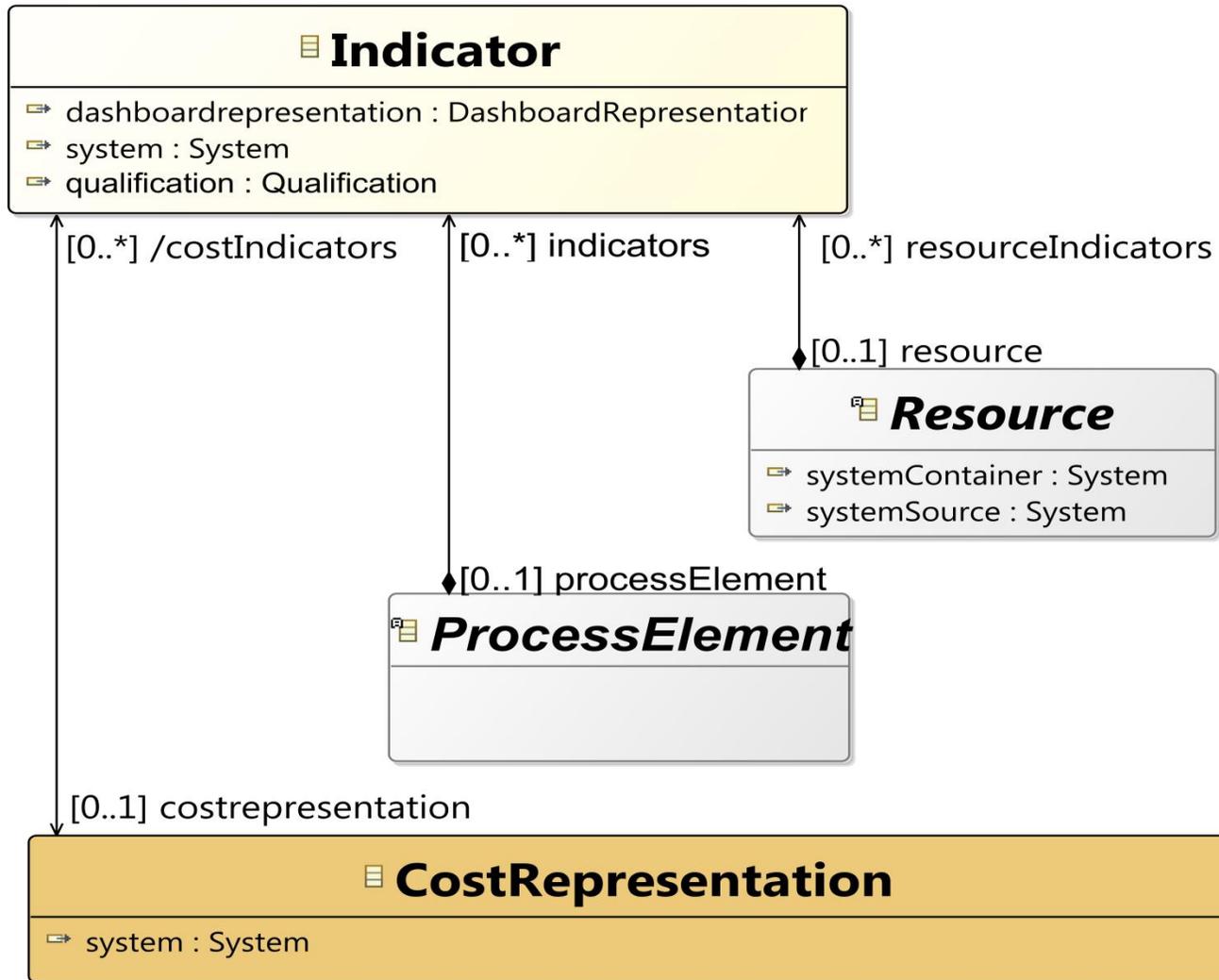


Diagramme Point de vue 10) « (View) Dashboard »

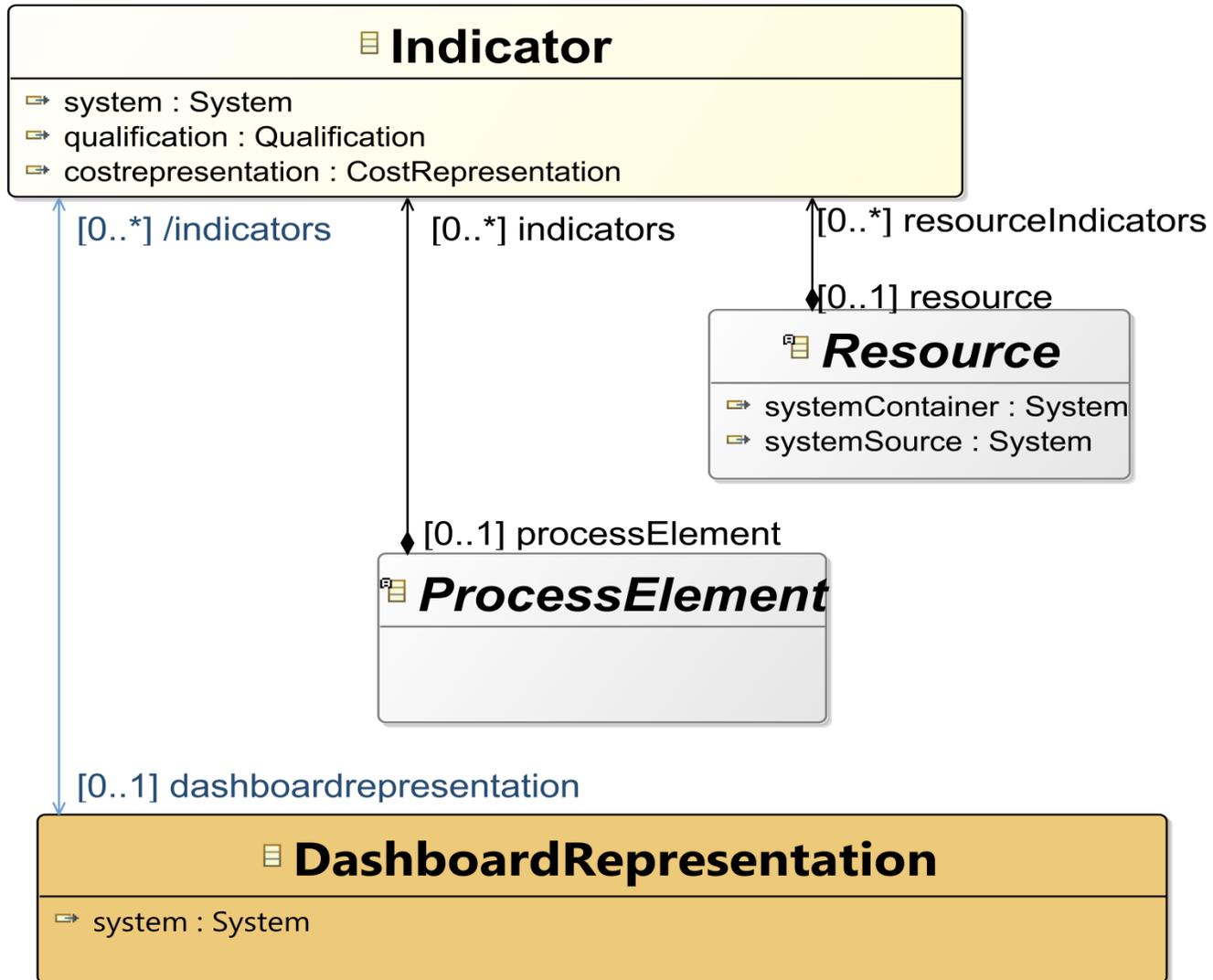


Diagramme Point de vue 11) « (View) Knowledge Management »

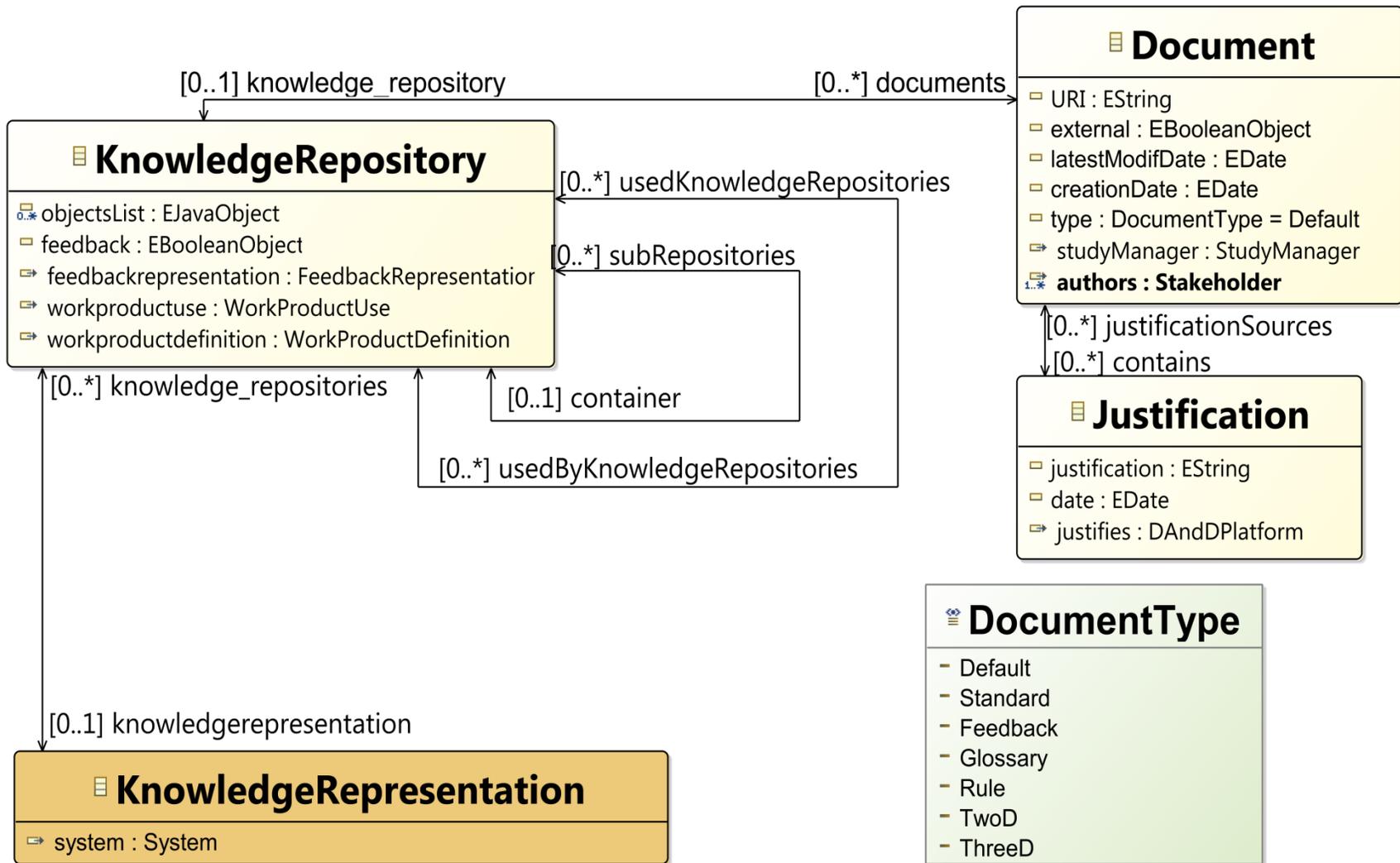


Diagramme Point de vue 12) « (View) Requirement Management »

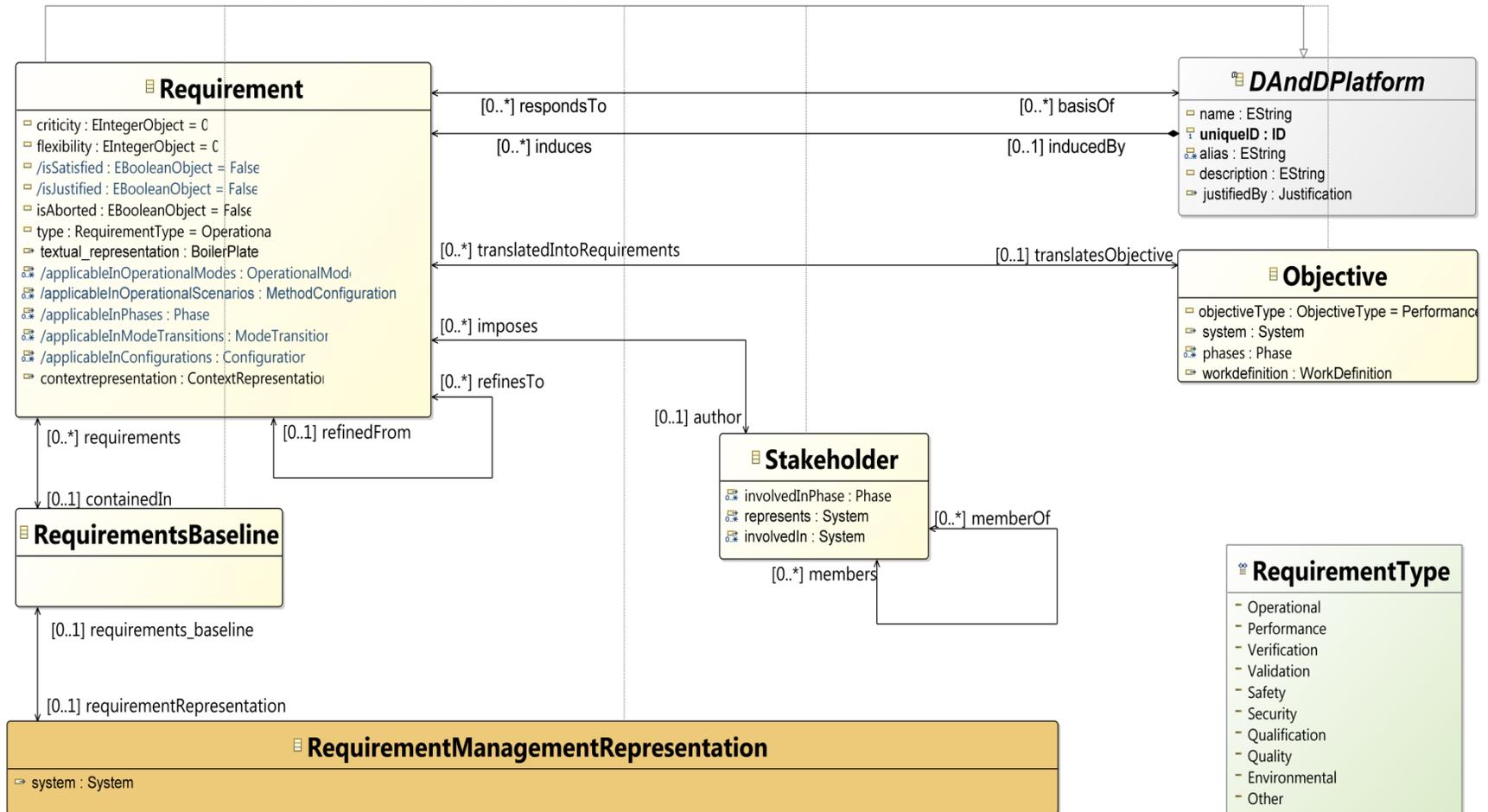


Diagramme Point de vue 13) « (View) Requirement Engineering »

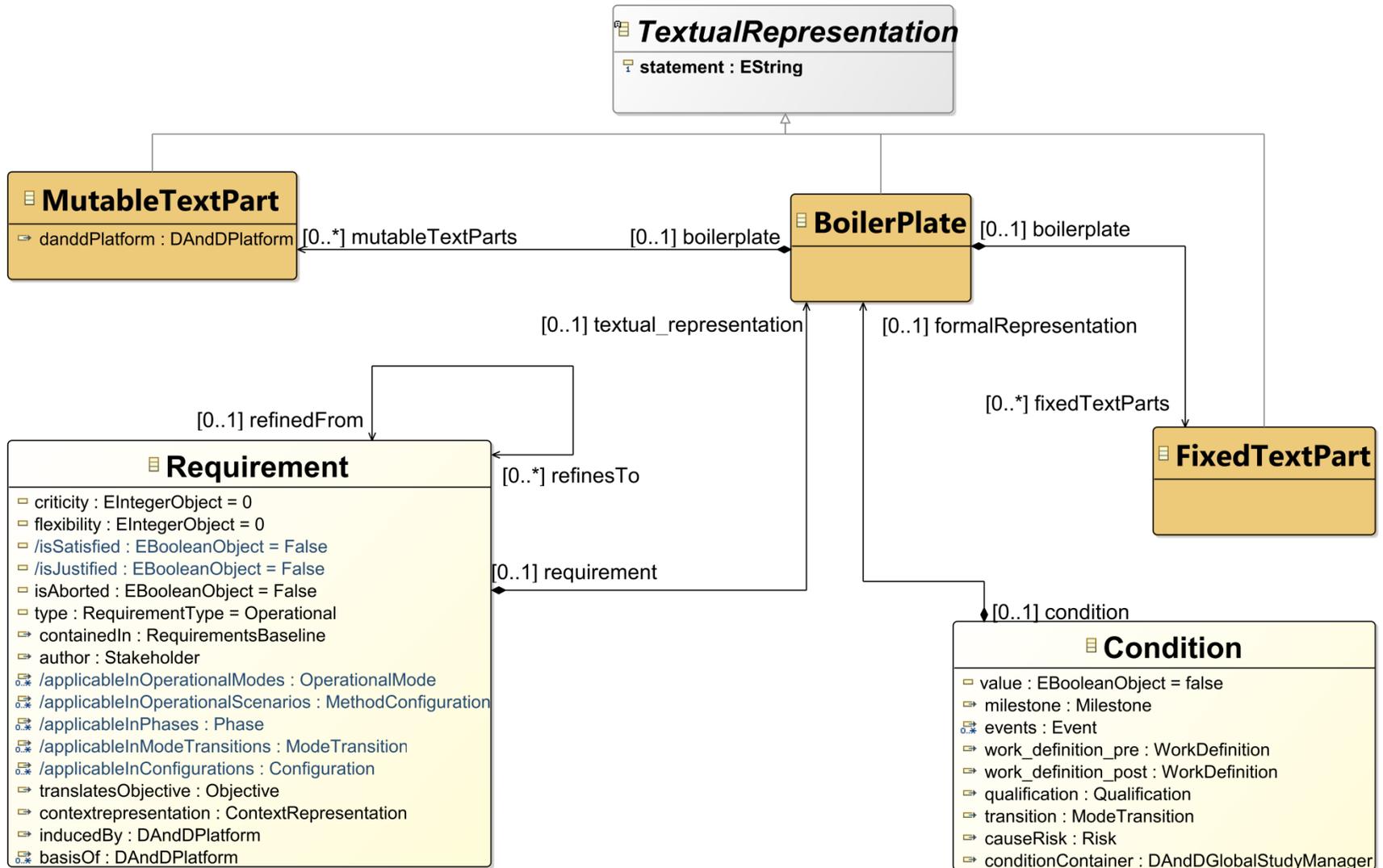


Diagramme Point de vue 14) « (View) Risk Management »

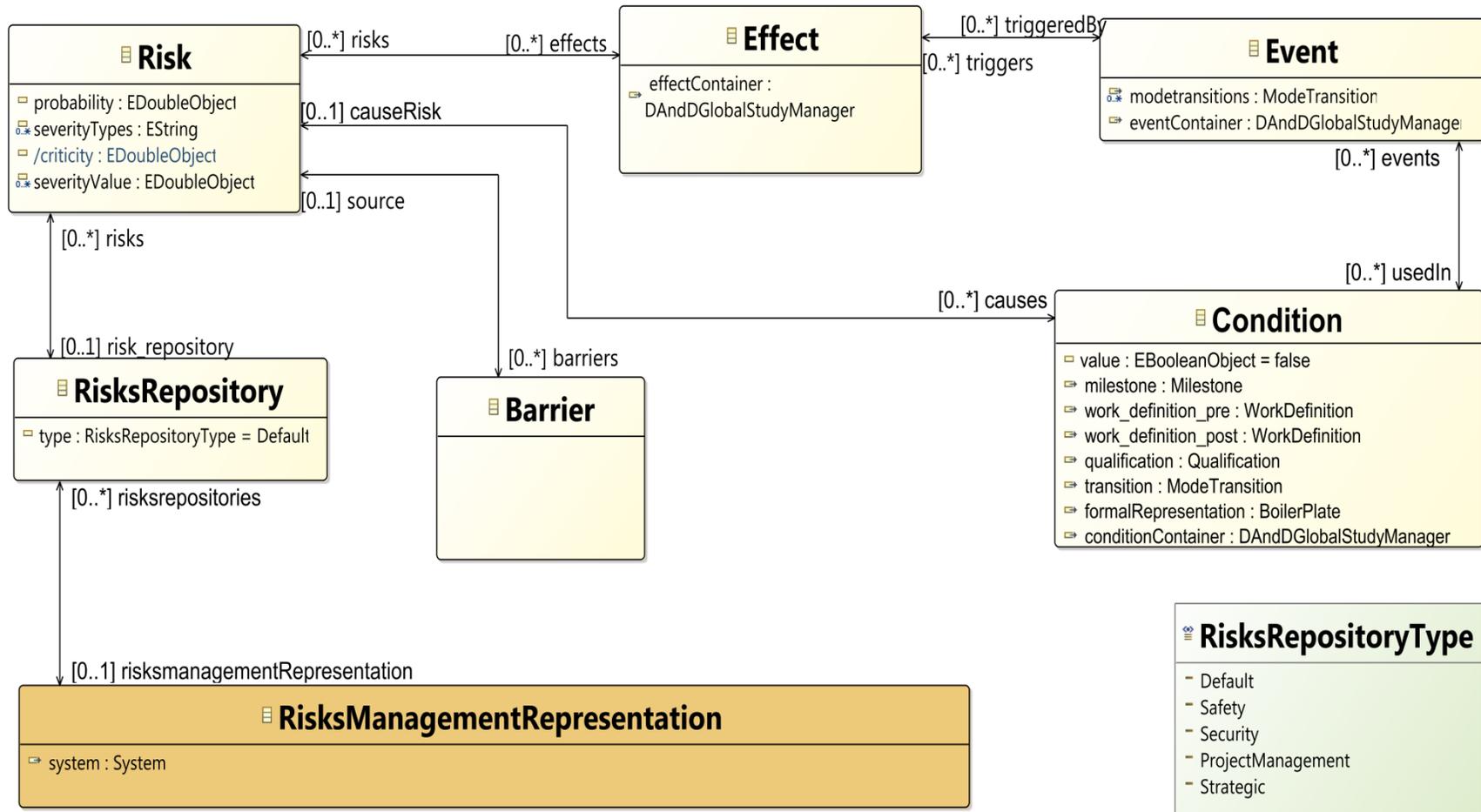


Diagramme Point de vue 15) « (View) Configuration Management »

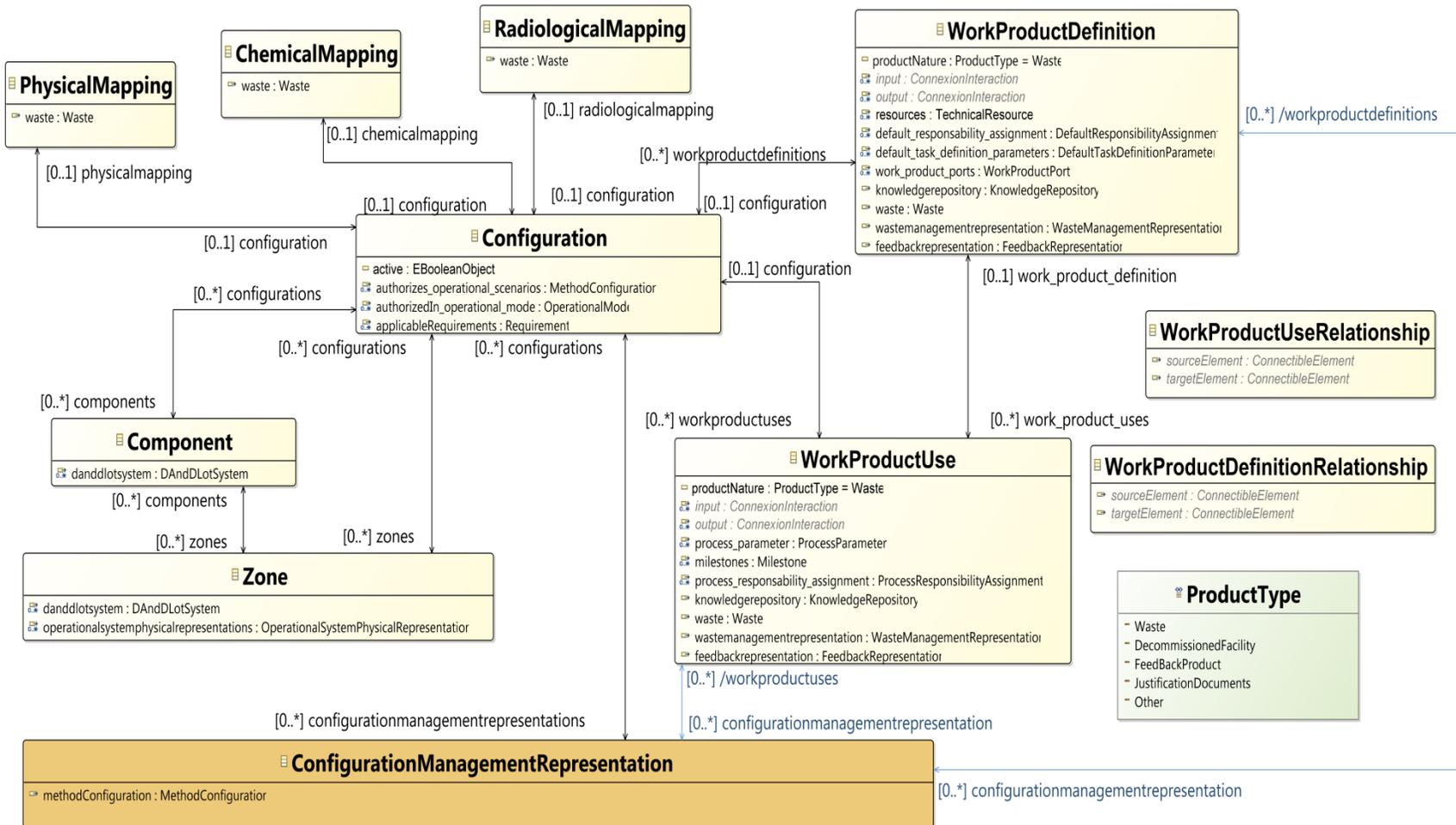
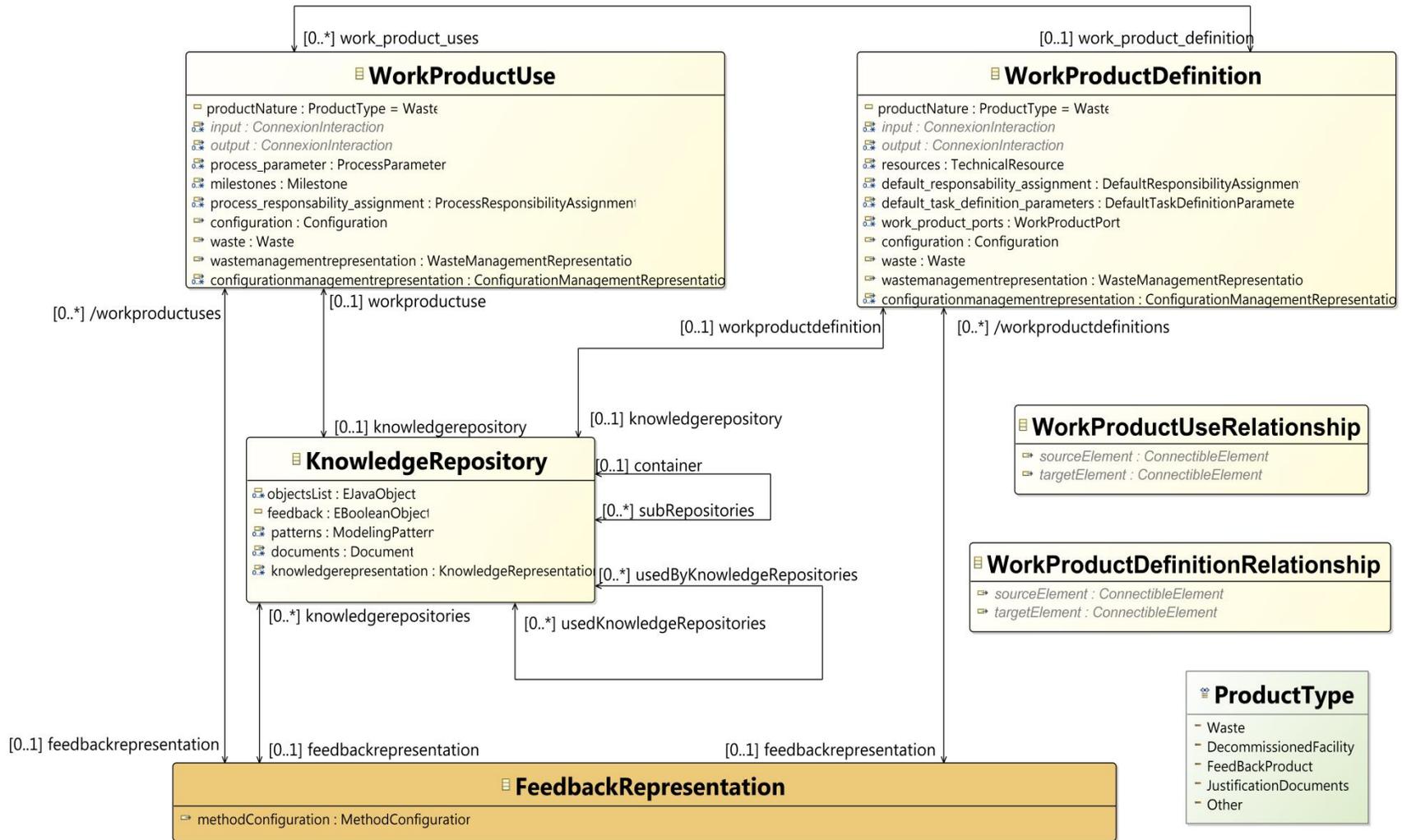


Diagramme Point de vue 17) « (View) Feedback Management »



Annexe III : Points à traiter et détail des activités retenues pour illustrer l'application de la méthode au chantier pilote

Points particuliers à traiter

- Le critère objectif de propreté (niveau d'activité résiduelle à atteindre). Il s'agit de prendre en compte l'apparition d'un événement correspondant à la détection de l'absence de solution industrielle de mesure allouée à 5 ans à l'exigence de performance de ce critère de propreté. Cela induit le non-respect de la capacité à fournir des solutions éprouvées respectant le décret. De plus, la survenue d'incidents d'exploitation a mené à des incertitudes. Après carottages réalisés, il est conclu qu'on ne saura pas montrer, quelles que soient les solutions de mesure existantes, l'atteinte d'un niveau d'assainissement en dessous de l'objectif de propreté. Par conséquent, étant dans l'obligation de détailler malgré cela les prochaines étapes du démantèlement prévues dans le décret, on se retrouve dans une situation impliquant deux exigences incompatibles. Il y a donc nécessité d'adapter les scénarios initiaux, qui consistaient initialement à écouter les bâtiments sur pied (i.e. limité jusqu'au ferrailage), puis prouver l'atteinte du critère objectif de propreté par mesures. L'analyse des solutions a conduit le projet à proposer une solution pour le LPC et une autre pour l'ATPu. Il convient ici de modéliser les processus d'analyse multicritère des solutions envisageables et de décision et de démontrer la capacité de l'outil à tracer, partager aux parties prenantes concernées, puis conserver cette connaissance ;
- Les contraintes d'interface (entre projets CFCa et CRYO, entre installations LPC et ATPu, entre entreprises y compris en interne sur l'historique du projet entre Orano ex-Areva et CEA, etc.) doivent également être prises en compte par le démonstrateur. Ces contraintes d'interface doivent montrer l'avantage de l'approche MBSE (Model-Based Systems Engineering) permettant la modélisation unique (i.e. sans doublons possibles : un modèle pour l'ATPu, un modèle pour le LPC, un modèle pour le projet CFCA, un modèle pour le projet CRYO, mais tous les modèles sont reliés entre eux). Pour aller plus loin, la problématique des contraintes de flux de déchets à plusieurs niveaux (lots, projets, programmes, entreprises, etc.) pourra montrer comment les modèles, uniques et fédérés entre eux, pourraient favoriser le lien entre ces différents niveaux.
- Les ressources et activités pour estimer les écarts entre coûts estimés et coûts réels ;
- Spécifiquement, concernant la modélisation du cas test et des alternatives de scénarios de démantèlement, il conviendra notamment de s'assurer que l'outil démonstrateur puisse intégrer :

- Les justifications associées à chaque choix retenu et non retenu (éventuellement associées à des documents, par exemple l'analyse multicritères) ;
 - Une fonction de pénétration liant profondeur d'écroutage et déchets produits ;
 - La contrainte qui plafonne cette fonction à hauteur de la profondeur du ferrailage (et donc également la fonction vérifiant la possibilité d'écrouter ou non en fonction de cette valeur max) ;
 - Des indicateurs (PCDR) montrant la dérive des nouveaux scénarios proposés par rapport à l'état final proposé initialement ;
 - Des décisions qui justifient la non prise en compte ou les modifications d'exigences lors d'un événement demandant de modifier la conception initiale, par exemple la modification de l'exigence de borne supérieure du critère de déclassement (fixé initialement à 0,1 Bq/gramme) ;
 - Le SENEX dans les systèmes liés au SLI qui montre l'importance en terme de coûts de ces systèmes de SLI dans le cadre du démantèlement et donc l'importance des « coûts des délais » (en moyenne environ 60% des coûts réels) ;
 - La problématique réglementaire de l'ASN concernant ses décisions et ses recommandations (guides) ne fixant pas d'exigences SMART, notamment concernant l'exigence réglementaire liée à l'objectif de propreté pour le déclassement (impact de dose inférieur à 300 microSv pour l'AIEA) ;
 - La problématique de l'atelier de cryotraitement : la fin des étapes planifiées pour le démantèlement de l'atelier de cryotraitement est une condition d'entrée pour le lancement des opérations de démolition du LPC.
- Des contraintes particulières de modélisation :
 - Le R2MP, en cours de révision, est le document de référence au sein du CEA, et notamment il impose certaines activités, comme la réalisation d'une esquisse, d'une étude d'opportunité, etc. ; le suivi de ce référentiel doit être clairement visible dans l'outil démonstrateur, notamment dans la réalisation des vues concrètes i.e. sur l'interface utilisateurs ;
 - Le respect continu du décret est indispensable : les exigences induites sont donc également à prioriser de manière absolue. Les dispositions associées à ce décret (et notamment les décisions ASN détaillant les modalités du démantèlement) peuvent néanmoins être modifiées en ultime recours et en suivant les procédures règlementaires (Articles 31 ou 32 du décret dit « procédure ») ;
 - Le berlingot PCDR doit absolument ressortir dans les points de vue ;
 - Les indicateurs de performance doivent pouvoir être reportés, notamment ceux liés à l'avancement physique (configuration, activité, TSM Terme Source Mobilisable, etc.). Mais également ceux de coûts, de délais (diagrammes temps-

temps très utilisés), et de sûreté-risques (nombre d'événements i.e. accidents de travail ou incidents sûreté très utilisés), sachant qu'une revue technique de projet est réalisée régulièrement ;

- Concernant la typologie des exigences, les exigences de sûreté, puis contractuelles (marchés) et réglementaires, puis les autres, doivent être clairement identifiables, séparées et priorisées dans cet ordre dans l'outil démonstrateur. À aucun moment les opérations ne peuvent continuer si à un instant t toutes les exigences de sûreté ne sont pas allouées à des solutions éprouvées, ce qui peut également être le cas pour les exigences contractuelles, mais pas forcément pour les autres exigences. En effet, le référentiel sûreté est primordial ;
- Certaines exigences émises ne sont pas valides ni allouées à des solutions dès le début du « *Run Time* » global du projet (i.e. décret de démantèlement). À ce moment-là, seule une partie du projet étant au stade du détail (actuellement cela est imposé pour les 5 prochaines années *a minima*¹³), est validé dans sa globalité mais pour le reste des éléments du SA&D, la validation peut se faire par la suite notamment par lots. Il arrive donc parfois :
 - De ne pas raffiner une exigence, processus qui pourtant peut faire apparaître de nouvelles exigences ;
 - De ne pas avoir associé de solution à une exigence en amont (ou une solution non encore mature), or une solution peut elle-même induire de nouvelles exigences à laquelle on ne pourra pas forcément y associer des solutions existantes.

¹³ La décomposition en étapes est obligatoire pour l'établissement d'un dossier de démantèlement et la publication d'un décret de démantèlement, mais ces étapes n'ont pas besoin d'être toutes détaillées au même niveau : le niveau APS peut suffire pour les étapes temporellement lointaines, et le niveau APD doit être par contre en permanence atteint *a minima* pour les 5 années à venir. Par conséquent, il est normal d'avoir des écarts entre les indicateurs réels longs termes et les indicateurs estimés (par exemple les coûts). Les travaux de thèse ici doivent en revanche être en mesure de proposer une traçabilité et de pouvoir indiquer à chaque instant les exigences allouées à aucune solution existante et les exigences allouées à des solutions existantes mais non industriellement éprouvées (Technology Readiness Level, TRL < 9). Pour exemple, lors de la publication du décret de démantèlement de l'ATPu et du LPC, les solutions de mesures permettant de vérifier l'atteinte du critère de propreté n'étaient pas validées.

Activités de modélisation retenues

« Design Time » du SA&D CFCa

1. **Modéliser l'installation nucléaire en exploitation et simuler la cause de l'arrêt définitif (tenue au séisme) :**

- Créer en amont les patrons nécessaires, par exemple les installations types, ou les Metric Echelle de Richter, Contamination surfacique Bq/m² et massique Bq/g.
- Créer la DSIN (organisme antérieur à la création de l'ASN), et ajouter l'exigence de défense en profondeur impactant les risques par exemple en lien avec les séismes. De fait, les référentiels d'analyse de risques du CEA imposent donc une tenue aux séismes (importée ensuite dès la création d'une installation) en respectant les normes antisismiques.
- Créer le LPC et l'ATPu. Pour se faire, montrer l'import automatique de certains éléments dès lors qu'on utilise un patron NuclearFacility, notamment la présence dans son contexte de son interaction systématique avec la DSIN (qui est un modèle et non un patron), et l'exigence systématique de tenue au séisme (sans valeur mais dont la valeur pourrait se mettre automatiquement à jour si on avait un patron « installation nucléaire à Saint Paul lès Durance »). Montrer ici aussi la capacité à aller de plus en plus dans le détail en guidant la modélisation de l'installation par des patrons successifs et des patrons reliés (patron de cycle de vie par exemple) : voir typologie et catégorie ASN.
- Définir grossièrement leurs attributs une fois les patrons importés et montrer le lien de traçabilité avec le patron (perspective en cas de modification du patron).
- Créer le système pour l'exploitation et définir succinctement ses attributs (en intégrant la cession en 1991 de l'exploitation technique à Areva NC).
- Ajouter les différents documents associés à ses attributs (exemple document de cession ?).
- Ajouter une valeur de tenue au séisme.
- Réaliser une modification de la valeur de tenue au séisme de l'exigence, induisant un affichage automatique d'alerte car l'exigence étant une exigence de sûreté, les opérations doivent cesser (réaliser plusieurs types d'alertes selon les types d'exigences).
- Montrer les parties prenantes et les exigences contradictoires.
- Modifier la date du jalon de l'arrêt définitif des installations.

2. **Modéliser le projet de démantèlement CFCA.** Nous nous concentrons ici sur l'objectif de propreté pour le déclassement, les fonctions d'écroutage et de mesure (étape 4 des décrets des INB 32 et 54) tout en décrivant les interdépendances avec les autres éléments du projet et éléments externes (exigences, parties prenantes, activités, ressources, etc.) ainsi que l'état final attendu (configuration, indicateurs PCDR, etc.).
- Créer les systèmes de démantèlement CFCA et CRYO.
 - Créer l'ASN et la MSNR (qui autorise aux yeux du public avant de transmettre à l'ASN) et modifier le lien précédent avec la DSIN (pour ce faire déclarer en fin de vie la DSIN et montrer que les installations sont automatiquement informées que toutes les exigences avec la DSIN deviennent avortées).
 - Ajouter les exigences de l'ASN portant sur les délais pour déclarer l'arrêt définitif et déposer le dossier de démantèlement et rajouter le document Guide de l'ASN en relation à ces exigences.
 - Ajouter une exigence de l'ASN obligeant un scénario d'Activité (quel que soit le niveau) d'être valide au moins 5 ans avant le début de sa réalisation. Montrer que celle-ci n'est ainsi pas respectée si on se place en 2003 par exemple et qu'on suppose le décret avant 2008 sans avoir validé le scénario du DEM. Cet exemple permet aussi de montrer à quel point même si c'est le cas, le non-respect de l'exigence à ce niveau-là n'aura aucun impact sur le projet et le responsable projet peut l'ignorer. Cet exemple va en effet être utile dès lors que l'activité « DEM » sera validée sur un découpage en 6 sous-activités (6 étapes du décret), qui elles devront absolument être prévues à l'avance. A ce moment-là, il suffira en fait de considérer cette exigence valide uniquement lorsque les installations sont en phase de DEM (cela montre la relative importance de bien définir le domaine de validité d'une exigence, par défaut valide tout le temps dès lors que le système existe).
 - Ajouter la directive européenne (voir questions plus bas) et l'exigence de contamination massique à 0.1 Bq/g en alpha (qui devra forcément être allouée pour que le dossier de démantèlement soit validé). A noter ici qu'on se centre sur quelques exigences réglementaires mais que rien ne nous empêcherait de modéliser des milliers d'exigences réglementaires existantes à allouer. Pour se faire, le mécanisme des patrons de modélisation important directement les éléments relatifs à ce qui est créé permet de réduire considérablement les éventuels oublis.
 - Réaliser un travail sur le cycle de vie, les différentes phases, et insister fortement sur les contextes en choisissant et créant alors des éléments de modélisation pouvant l'objet de Patron de Modélisation).

- Ajouter les 6 étapes, et le dépôt de dossier de DEM.
- Ajouter l'ANDRA, le projet MATSE, et une contrainte externe.
- Intégrer des documents de REX et des études concluant sur des exigences de flux de déchets.
- Détailler les activités d'esquisse, d'APS, et d'APD dans la phase de conception en suivant les règles du R2MP. Il est important de noter que l'approche de modélisation se fait en amont même des études (on modélise l'APS, bien que concrètement dès lors qu'on entre dans l'analyse de mission puis la modélisation on attaque finalement la phase de conception du cycle de vie de DEM). Montrer le fait que la modélisation ne remplace pas le travail des experts et des responsables en charge des études, mais qu'elle vise à assister et guider. 1) Montrer qu'elle permet une meilleure accessibilité globale des parties prenantes aux informations contenus dans ou associés aux différents modèles : notamment, structurer des documents associés à chaque modèle, et simuler une démarche collaborative et itérative nécessitant la validation de toutes les parties prenantes. 2) Montrer l'amélioration de la traçabilité, et montrer des alertes.
- Détailler l'étape 4 comme elle a été validée initialement en restant centré sur l'activité d'écroutage, en rajoutant une exigence de profondeur max liée à la tenue du génie civil et donc à la tenue au séisme, et une profondeur d'écroutage pour l'activité. Pour ce faire, décrire la configuration de l'installation grossièrement (en créant quelques locaux et équipements). Rajouter des exigences liées à cette étude et considérer un travail itératif à réaliser.
- Ajouter pour l'activité d'écroutage, les produits en matière de déchets en fonction de la profondeur d'écroutage. Ces déchets ne sont pas contraints en premier lieu par une contrainte de volumétrie ni flux de déchets.
- Ajouter au projet et plus particulièrement à la fonction d'écroutage les documents des parties prenantes datant de 2006 justifiant le choix de l'écroutage.
- Ajouter les activité/tâches de mesures mais sans ressources alloués.
- Ajouter le décret (comme étant la condition associée au jalon de passage au dem), et lors de la validation du décret, ajouter une exigence bloquant toute modification des éléments validés du projet, hors procédures Articles 26 et 31.
- Ajouter une exigence de début d'étape 4 à une date donnée.
- Ajouter aux fonctions des indicateurs de coûts, délais, risques, performances.

« Run Time » du SA&D CFCa

3. **Simuler la réalisation des premières étapes.** Le but est ici de définir et prendre en compte les différents événements et leurs implications sur cette étape 4 (identification d'incidents d'exploitation par exemple ?) ; simuler la réalisation des premières étapes jusqu'au jalon de validation de la conception de l'étape 4 (5 ans avant le début), et donc le blocage du projet évoqué.
 - Simuler uniquement la fonction de dépose des équipement boîte à gants, modélisé par simplification par un unique équipement. Associer à cette activité des ressources, et montrer que le produit de l'activité est ici une configuration de l'installation (en entrée avec l'équipement, en sortie sans l'équipement).
 - Montrer qu'en déplaçant la date actuelle, l'exigence de détail de l'étape 4 entre en vigueur (l'exigence des 5 ans est mise sous la forme « Toute tâche débutant dans moins de 5 ans doit être allouée à des ressources de niveau TRL 9 ») et donc l'exigence n'est plus respectée, qu'il y ait des ressources allouées (mais à TRL<9) ou non.
 - On mettra également l'accent ici sur le fait qu'on peut associer des documents à n'importe quoi et donc à des ressources et des tâches des documents justifiant que l'exigence de 0,1 Bq/g peut bien être atteindre (par exemple des documents de REX d'utilisation de la ressource ou la technique de DEM, d'évaluation multi-critères, etc. ; cela permet de fiabiliser un choix et rassurer les parties prenantes). En effet, on aura au préalable alloué cette exigence réglementaire à cette tâche avant même d'y associer les ressources.
4. **Simuler l'étude et l'évaluation d'alternatives** en insistant sur la problématique de tenue des bâtiments et sur les déchets produits (plusieurs critères), puis simuler les décisions prises pour les deux installations (avec traçabilité complète des décisions, des auteurs dates et justifications, conservation des alternatives rejetées, etc.).
 - Ajouter les études d'opportunités qui ont mené à conclure que même la solution d'écroutage, en dehors de l'incapacité à prouver le niveau de mesures, ne suffirait pas à supprimer la contamination en profondeur désormais mieux connue sur le LPC.
 - Montrer donc que sur le LPC, le conflit entre l'exigence de profondeur max liée à la tenue au séisme et la nouvelle exigence imposant un écroutage \geq à x cm (profondeur de contamination). La mise en évidence de ce conflit d'exigence, dans ce genre de situation lors d'une modélisation système, amène à une médiation, qui ajoute plusieurs scénarios : supprimer l'une ou l'autre exigence, ou bien rendre flexible l'une ou l'autre. Les deux étant de type sûreté, les deux sont *a priori* non flexibles. Il faut donc supprimer l'une ou l'autre.

- Modéliser les différents scénarios possibles.
 - Intégrer les documents de REX de Grenoble au volume proposé (volumétrie 3000 m³ de déchets TFA) dans la tâche de transport déchets TFA, et le REX sur la tâche de conditionnement (bulle TFA), pour justifier la faisabilité du scénario démolition.
5. **Simuler la capture d'éléments de suivi global du projet en exécution** (hausse des coûts par exemple, mais également tous les autres indicateurs) et les implications sur le projet (rédaction de notes de REX etc.) et sur les interdépendances (autres projets, systèmes à l'interface, etc.)
- Repasser sur le diagramme de contexte, et montrer les différentes interactions. Montrer que d'un côté ou de l'autre, il est possible de rajouter un événement impactant l'interaction, modifiant les exigences induites par cette interaction et donc le projet.
 - Ajouter l'interaction avec CRYO, et notamment l'exigence qu'elle impose sur le projet CFCa qui est que les activités de démolition ne peuvent pas commencer tant que l'activité de sortie des équipements de l'atelier de cryotraitement n'est pas terminée.
 - Montrer pour cette dernière que la survenue d'un risque sûreté du côté de CRYO (proposer un risque classique comme contamination) va modifier la date de fin de l'activité de sortie des équipements de l'atelier de cryotraitement, et donc bloquer le début de la tâche du CFCa de gratter les points chauds sur le génie civil.
 - Ajouter les contraintes d'interface avec MATSE, qui impose par exemple la réalisation de l'échantillonnage.
 - Ajouter une nouvelle exigence, par exemple induite par l'interaction consistant à « respecter le code de l'environnement élaboré par le gouvernement », suite à l'ajout d'un article dans le code de l'environnement. Prendre l'exemple de la modification de l'exigence procédure Article 26 et Article 31 qui se basent désormais sur le code de l'environnement (Art. R. 593-47 pour l'article 31) et voir s'il y a une modification sur les exigences. Bien entendu ici on ne peut pas considérer un automatisme car il va falloir interpréter les textes de lois pour en faire ressortir des contraintes. En revanche, une notification peut être faite, et cet exemple montre la capacité à prévenir en temps réel l'ensemble des parties prenantes concernées par quelque chose (en l'occurrence ici tous ceux susceptibles d'être impactés par la modification du code de l'environnement).
 - Simuler en direct plusieurs risques (e.g. risque de points chauds identifiés en « *Run Time* » qui modifieraient le scénario) et événements qui impacteraient le projet, non précédemment évoqués, sur des points importants sur lesquels une démarche de traçabilité, d'adaptation rapide, etc. serait très utile.

Annexe IV : Premières exigences non exhaustives perçues de l'outil, à respecter, et pouvant alimenter l'élaboration des règles de modélisation et de la sémantique opérationnelle

Contraintes d'exclusion / filtres lors de la création d'instances de modèles

- À partir de n'importe quelle instance de classe héritant de *StudyManager*, le méta-modèle permet de créer n'importe quel système, ce qui ne doit pas être le cas (e.g. les *DAndSystem* sont connus du *DAndDGlobalStudyManager*, mais ne doivent pas être contenus dans celui-ci : ils doivent être contenus dans le *DAndDProjectStudyManager*) :
 - La *DAndDGlobalStudyManager* contient les *NuclearFacility*, les *Site*, les *Perimeter*, les autres systèmes à l'interface *ContextSystem*, le *DAndDStrategicSystem* et le *DAndDGlobalSystem* ;
 - Les *DAndDProgramStudyManager* contiennent les *Program* ;
 - Les *DAndDProjectStudyManager* contiennent les *DAndDSystem* (autres que les *DAndDLotSystem*, ces derniers étant eux-mêmes des *DAndDSystem*) ;
 - Les *RCDStudyManager* contiennent les *RCDSYSTEM* ;
 - Les *DAndDLotStudyManager* contiennent les *DAndDLotSystem* ;
- On ne peut pas créer de *DAndDStrategicSystem* si on n'a pas de *DAndDGlobalSystem* ;
- La valeur du TRL est bornée (attribut *technologyReadinessLevel* de *TechnicalResource*) entre 0 et 9 ;
- Une *Configuration* ne peut être associée à un *WorkProductDefinition* et/ou *WorkProductUse* que de *productNature* « *DecommissionedFacility* » ;
- Un *Waste* ne peut être associé à un *WorkProductDefinition* et/ou *WorkProductUse* que de *productNature* « *Waste* » ;
- Un *KnowledgeRepository* de type *feedback* ne peut être associé à un *WorkProductDefinition* et/ou *WorkProductUse* que de *productNature* « *Feedback* » ;
- Une *Configuration* ne peut être créée que pour un *OperationalSystem* ;
- Il est impossible de connecter n'importe comment deux *WorkProductPort* entre eux, cela dépend des *portKind* respectifs de ces derniers ;
- Il est interdit pour les programmes de se référencer eux-mêmes comme systèmes d'intérêt et comme *consideredInPrograms* ;
- Il est interdit pour une exigence (*Requirement*) de se référencer elle-même (par exemple, d'être *basisOf* d'elle-même) ;
- Il est interdit plus généralement, pour toutes les relations entre une classe fille et une classe mère dont elles héritent, l'auto-référencement.

Fonctions automatiques lors de la création ou la modification d'instances de modèles

- Associer les instances de *ModelingObject* créées automatiquement aux instances de classes héritant de *DSMLPlatform* (car ce ne sont pas ces dernières qui contiennent les *ModelingObject*, mais des instances de type *System*) ;
- Vérifier l'ensemble des liens automatiques entre lots et projet : par exemple vérifier que l'ensemble des parties prenantes des lots soit inclus dans l'ensemble des parties prenantes du projet, ou encore que la somme des indicateurs des différents lots lors de la validation des « *Design Time* » de lots (qui peuvent être faites séparément temporellement pour chaque lot ?) correspondent aux objectifs d'indicateurs du « *Design Time* » du projet validé en amont ;
- Automatiser l'ensemble des relations de type *subsets* (signifiant que l'allocation d'une relation alloue également la relation qui est *subsets*) et *ordered* ;
- Lors de la création d'un *DAndDGlobalStudyManager*, créer automatiquement un *DAndDGlobalSystem* et l'associer directement comme étant le système global ;
- De la même façon, lors de la création d'un *DAndDProjectStudyManager*, créer automatiquement un *DAndDSystem* et une *NuclearFacility* (que l'on pourra éventuellement « réinitialiser » lors de l'import de patterns ou de modèles déjà existants) ;
- Associer automatiquement lors de la création d'un *Program* ce dernier avec le *DAndDStrategicSystem* ;
- Associer automatiquement l'ensemble des *builtIn/builtFrom* lors de la création de *System* (exemple *Program* ou *DAndDStrategicSystem* sont *builtFrom* le *DAndDGlobalSystem* qui est leur sur-système) ;
- Créer plus généralement toutes les relations pertinentes automatiquement lors de la création de n'importe quelle instance, entre cette dernière et son contenant ;
- Lors de la création d'un modèle, proposer des patrons de modélisation associés (N.B. : on pourrait par exemple remplacer toutes les classes actuelles d'Enumeration par des patrons (exemple *requirementType*, *documentType*, *objectiveType*, etc.))
- Lors d'un ajout de *relatedPatterns*, *antiPatterns*, *equivalentPatterns* ou toute autre relation n'ayant pas de relation inverse, associer pour le modèle cible la relation vers le modèle source ;
- Lors de la création d'un *StudyManager* quelconque et d'un objet particulier à l'intérieur de celui-ci, automatiser la proposition des patterns associés et la mise à jour de « *usedBy* » du pattern dans la BDD ;
- Définir l'attribut *isPlanned* d'un *BreakdownElement* en fonction de l'existence ou non d'un *PlanningData* complété

- Lors de la création d'une *Phase*, créer une *Activity* de décision indépendante de toutes les activités dans cette *Phase*, dont les *input* correspondent à ce que réalise l'ensemble des activités de la *Phase*, et dont l'*output* étant le *Milestone* de sortie de celui de la *Phase*): pour exemple, les étapes du démantèlement validées par un décret de démantèlement sont modélisées sous forme de *Phase* et d'*Activity* ;
- Associer automatiquement l'attribut « *transverse* » de *Program* selon la présence de *DAndDSystem* associés ou non ;
- Mettre à jour la version de chaque élément de plus haut niveau (containers) pour le suivi des modifications ;
- Automatiser le lien entre chaque *mainActivities* qui est également une *mission* du *System* : lien à automatiser ;
- Automatiser les relations entre *Zone* et *Component* : e.g. un *Component* dans une *Zone* est forcément dans toutes les *Zone* de niveau supérieur ;
- Automatiser les liens entre relations entre *System* : e.g. si un *System* à l'interface appartient au systèmes de soutien logistique intégré (*ilsSystemOf*) d'un autre *System* alors il est contributeur (*enablingSystems*) ;
- Lors de la modification d'un patron, modifier automatiquement sa version.

Contraintes lors de la suppression d'instances de modèles :

- Une suppression reste une modification, donc un certain nombre de fonctions précédemment évoquées restent pertinentes dans le cas d'une suppression de parties de modèles ;
- Lors de la suppression d'un *DAndDGlobalSystem*, d'une *NuclearFacility*, d'un *DAndDSystem*, etc. : message d'erreur ou archivage à la place de la suppression : les modèles ne doivent pas être détruits par erreur au risque de perdre la traçabilité et la cohérence globale.

Fonctions informatives et d'affichage :

- Informer de la présence ou non de scénario (*MethodConfiguration*) d'*OPDem* pour un *DAndDSystem* ;
- Mettre en avant les scénarios validés d'un système avec leurs types (*MethodConfigurationKind*) respectifs ;
- Créer un raccourci depuis la vue du *DAndDSystem* vers les scénarios validés ;
- Accéder au coût de SENEX (coûts liés au maintien en conditions opérationnelles de l'installation nucléaire pour un projet de démantèlement).

Contraintes d'import de modèles (patrons et modèles) :

- Pour un élément sélectionné, seuls les patrons du même type que cet élément peuvent être importés (du même type ou de types related/requested) ;
- Les relations entre patrons doivent être minutieusement conservées.

Fonctions de calcul :

- Calculer les attributs « *derived* » automatiquement, par exemple la « *criticity* » du *Risk* en fonction de ses *severityValue* et de sa *probability*.

Éléments et fonctions de vérification de modèles :

- À chaque *ProcessElement*, les *Resource* allouées ont la *Qualification* de réaliser ce *ProcessElement* à tout instant ;
- À chaque *Requirement* est associée une *Justification* cohérente (quand quantifiée on pourra viser l'implémentation d'une vérification automatique sinon vérification manuelle) et valide ;
- À chaque projet est associé un avancement calculé en fonction de la *Phase/Activity/TaskUse* active et recalculé à chaque modification de *Phase/Activity/TaskUse* etc. ;
- L'ensemble des produits prescrits doit être allouée à une tâche en « *Run Time* » ;
- Les données sont justifiées et/ou validées ;
- Pour répondre aux contraintes réglementaires du cas test, à chaque instant, les exigences des 5 prochaines années ont toutes une solution mature (TRL 9) allouée ; pour les autres, alerter de la présence, ou non, de solution, et, s'il y a une solution, alerter du niveau de TRL associé ;
- Vérifier que pour tous les *DAndDSystem* les risques de criticité forte ont bien absolument une *Barrier* et que si la *probability* du *Risk* est supérieur à 0,8 alors que le *Risk* et ses *Effect* sont considérés avérés et font partie intégrante du *DAndDSystem* notamment en matière de coûts ;
- Vérifier que chaque *MethodConfiguration* est bien allouée à une *Activity* ;
- Vérifier qu'à chaque élément du modèle on ne trouve pas un antipattern dans le modèle, sinon alerter l'utilisateur ;
- L'ensemble des *Objective* des instances de *WorkDefinition* correspondent et équivalent à l'ensemble des *Objective* du *System* ;
- L'ensemble des services fournis via des *Interaction* par un *System* permettent de définir sa ou ses *missions* ;
- L'ensemble des *NuclearFacility* est associé a minima à un *DAndDSystem*, et réciproquement, tout au long de leurs cycles de vie respectifs ;

- L'ensemble des produits prescrits est bien alloué à des tâches et activités ;
- Les architectures choisies sont optimales au regard d'indicateurs de performances, coûts, délais, sûreté, sécurité, etc. ;
- Chaque *BreakdownElement* intégré au projet et au scénario de démantèlement retenu est bien planifié lors du « *Run Time* » ;
- Vérifier la cohérence entre les **Definition* (* : *Task*, *WorkProduct*, *Role*) et les **Use* associés : par exemple que les *Qualification* demandées pour un *RoleDefinition* sont bien toutes possédées par les *RoleUse* des *Resource* (*ProcessPerformer*) choisies ;
- Vérifier que les *Resource* choisies sont associées à des *Indicator* (de coût notamment), respectant les *Objective* (de coût donc dans le même exemple) d'un *WorkDefinition* (que ce soit au niveau d'une *TaskDefinition* s'il y a des contraintes spécifiques à chaque tâche, ou à un plus haut niveau i.e. *Activity*) ;
- Vérifier que la cardinalité correspond bien à ce qui est attendu pour les relations (notamment pour les cardinalités 1..1 spécifiées en 0..1 pour des raisons pratiques de développement informatique ; mais également éventuellement d'autres règles spécifiques à des relations) : exemple « attention le système n'a pas de finalité » ;
- Vérifier que les *WasteType* sont cohérents avec la dose et la demi-vie calculées du *Waste* en question ;
- Vérifier que chaque *Risk* a bien au moins une cause et un effet.

Bibliographie

- Académie des sciences, 2015. *Sciences du démantèlement des installations nucléaires*. Les Ulis, France: EDP Sciences.
- Adams, M., ter Hofstede, A., Edmond, D. & van der Aalst, W., 2006. A Service-Oriented Implementation of Dynamic Flexibility in Workflows. *Fourteenth International Conference on Cooperative Information System*.
- Al Hadidi, F. & Baghdadi, Y., 2019. Ontology for Enterprise Interactions: Extended and Virtual Enterprises. *ICT for a Better Life and a Better World - The Impact of Information and Communication Technologies on Organizations and Society*, pp. 365-379.
- Amokrane, N., 2016. *De l'Ingénierie des Besoins à l'Ingénierie des Exigences : Vers une Démarche Méthodologique d'Ingénierie de Systèmes Complexes, de Vérification et de Validation Appliquée à l'Informatisation des PME*. PhD éd. Montpellier, France: Université de Montpellier.
- ASN, ASND, 2015. *Stratégie de démantèlement des installations du CEA et mise à jour de la stratégie de gestion des matières et déchets radioactifs*. [En ligne] Available at: <https://www.asn.fr/Media/Files/courrier ASN ASND DEM CEA 2015-021619?> [Accès le 31 07 2019].
- ASN, 2009. *La politique de l'ASN en matière de démantèlement et de déclasséement des installations nucléaires de base en France*.
- ASN, 2013. *Guide de l'ASN n°9 : Déterminer le périmètre d'une INB*.
- ASN, 2014. La sûreté du démantèlement des Installations Nucléaires de Base. *Rapport de l'ASN du l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2014*, pp. 468-491.
- ASN, 2015. *Décision n°2015-DC-0523 du 29 septembre 2015 établissant une classification des installations nucléaires de base au regard des risques et inconvénients qu'elles présentent pour les intérêts mentionnés à l'article L. 593-1 du code de l'environnement*.
- ASN, 2016a. *Guide de l'ASN n°6 : Arrêt définitif, démantèlement et déclasséement des installations nucléaires de base*.
- ASN, 2016b. *Guide de l'ASN n°14 : Assainissement des structures dans les installations nucléaires de base*.
- Barboux, A., 2018. *Quand les poubelles du nucléaire font débat*. [En ligne] Available at: <https://www.usinenouvelle.com/article/les-poubelles-du-nucleaire-font-debat.N736359> [Accès le 07 31 2019].

- Barthe-Delanoë, A.-M., Montarnal, A., Truptil, S. & Bénaben, F., 2018. Towards the agility of collaborative workflows through an event driven approach - Application to crisis management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 28, pp. 214-224.
- Bataille, C., 1997. Les niveaux de démantèlement. *Rapport sur l'évolution de la recherche sur la gestion des déchets nucléaires à haute activité*, pp. 38-40.
- Bataille, C. & Birraux, C., 2003. Tableau - Âge moyen des parcs électronucléaires. *Rapport sur la durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs*, p. 15.
- Bernus, P., Noran, O. & Molina, A., 2015. Enterprise Architecture: Twenty Years of the GERAM Framework. *Annual Reviews in Control*, Volume 39, pp. 83-93.
- Billaud, S., 2015. *Contribution à l'Ingénierie de Système de Systèmes : modélisation multi points de vue et analyse de l'impact de l'exigence d'interopérabilité*. PhD éd. Montpellier, France: Université de Montpellier.
- BKCASE Editorial Board, 2019. *The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK), v.2.0.* [En ligne] Available at: <https://sebokwiki.org> [Accès le 31 07 2019].
- BNAE, 2012. *RG.AERO 000 77-A : Programme Management : Guide for the management of Systems Engineering*. Issy-les-Moulineaux, France: Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace.
- Bourdon, J., 2018. *Formalisation et développement d'outils de modélisation*.
- CEA, 1999. *Méthode SAGACE : le systémographe*.
- CEA, 2016. *MAESTRO : La robotique au service du démantèlement nucléaire*. [En ligne] Available at: http://www.cea.fr/presse/Documents/DP/2016/DP_Maestro.pdf [Accès le 31 07 2019].
- CEA, 2018. *L'assainissement-démantèlement des installations nucléaires*. e-den : Une monographie de la Direction de l'énergie nucléaire éd. Paris, France: Editions Le Moniteur.
- Chabal, C., Perrot, V. & Soulabaille, Y., 2018. *Virtual Reality Simulation Improves Decommissioning Scenarios*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].
- Chabal, C. & Soulabaille, Y., 2016. *Virtual Reality: a way to prepare and optimize operations in decommissioning projects*. Lyon, France, International Symposium on PREparation for DECommissioning.
- Chapurlat, V. et al., 2013. *Proposition d'un Guide d'Etude des Modes Opérationnels des Systèmes (GEMOS) pour l'Ingénierie Système*. La Rochelle, France, Conférence Internationale de Génie Industriel (CIGI 2013).

- Chapurlat, V., Lafon, M. & Nastov, B., 2018. *Revisiting Digital Mock-Up for SME Involved in Systems Engineering Deployment*. Toulouse, France, 12th International Conference on Modeling, Optimization and SIMulation.
- Cheutet, V., 2018. *A PLM approach to support nuclear decommissioning process*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].
- Clere Andre, B. et al., 2018. *Optimized Decommissioning Management by an Innovative Decision-Making Tool*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- Collectif AFIS, 2012. *Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système*. Collection AFIS éd. Toulouse, France: Cépaduès Editions.
- Conte, D. & Cloître, V., 2018. *Legal and technical framework for a safe decommissioning in France*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- Cornu, C., 2013. *Contribution à la prise en compte de l'intéropérabilité pour le déploiement de processus complexes dans une grande entreprise : proposition d'un guide méthodologique pour les processus d'Ingénierie Système*. PhD éd. Paris, France: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Crampon, C., 2019. *Signature du contrat stratégique de la filière nucléaire*. [En ligne] Available at: http://www.sfen.org/rgn/signature-contrat-strategique-filiere-nucleaire?utm_source=RGH_Hebdo&utm_medium=email&utm_campaign=Hebdo [Accès le 31 07 2019].
- Dauphin, S., 2019. *Faut-il recycler les déchets nucléaires très faiblement radioactifs ?*. [En ligne] Available at: <https://www.franceinter.fr/environnement/faut-il-recycler-les-dechets-nucleaires-tres-faiblement-radioactifs> [Accès le 31 07 2019].
- Defay, A.-S. & Ben Aoun, H., 2018. *GIFEN - le Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire de la 3e filière industrielle française*. [En ligne] Available at: https://www.nuclearvalley.com/wp-content/uploads/2018/01/Nuclear_Valley_Atelier_4_GIFEN_RDV_NV_2018.pdf [Accès le 31 07 2019].
- Department of Transportation, 2007. *Systems Engineering for Intelligent Transportation Systems*. Washington, DC, USA: U.S. Department of Transportation.
- Depauw, D. et al., 2018. *3D Digital Simulation Tools Used to Support Nuclear Facilities Decommissioning - Benefits for the Projects Progress and their Safety*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].

- Divitini, M., Hanachi, C. & Sibertin-Blanc, C., 2001. Inter-organizational Workflows for Enterprise Coordination. *Coordination of Internet Agents*, pp. 369-398.
- Dory, F., 2018. *Equipment localization thanks to a digital mock-up and deep learning techniques for the preparation of operations*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- Dupré, C. & Aabadi, K., 2019. *Deployment of Systems Engineering and PLM-based digitalization of plant design activities - Experience of EPR2 Basic Design Project*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].
- Estefan, J. A., 2008. *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Technologies, Rev.B*, Pasadena, CA, USA: INCOSE MBSE Initiative.
- État Français, 2006. Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. *Journal Officiel de la République Française*.
- État Français, 2007. Décret n° 2007-1557 du 2 novembre 2007 relatif aux installations nucléaires de base et au contrôle, en matière de sûreté nucléaire, du transport de substances radioactives. *Journal Officiel de la République Française*.
- État Français, 2012. Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base. *Journal Officiel de la République Française*.
- État Français, 2015. LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1). *Journal Officiel de la République Française*.
- État Français, 2016. Décret n° 2016-283 du 10 mars 2016 relatif à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. *Journal Officiel de la République Française*.
- État Français, 2019. Décret n° 2019-190 du 14 mars 2019 codifiant les dispositions applicables aux installations nucléaires de base, au transport de substances radioactives et à la transparence en matière nucléaire. *Journal Officiel de la République Française*.
- European Council, 2011. Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste. *Official Journal of the European Union*, Volume L.199, pp. 48-56.
- European Council, 2014. Council Directive 2014/87/Euratom of 8 July 2014 amending Directive 2009/71/Euratom establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations. *Official Journal of the European Union*, Volume L. 219, pp. 42-52.
- Fadel, F. G., 1994. *A Resource Ontology for Enterprise Modelling*. Toronto, Canada: Enterprise Integration Laboratory, University of Toronto.
- Félot, C., 2007. *Toward a formal theory of systems*. Paris, France, CAL07 International Workshop - Complex Industrial Systems: Modelling, Verification and Optimization.

Available at: <http://www.lix.polytechnique.fr/~liberti/cal07/presentations/feliot-cal07.pdf>
[Accès 31 07 2019].

Gauché, F., 2018. *Fukushima : Feedback and Operations in Progress*. [En ligne]
Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].

Georges, C., Boucher, L., Charton, F. & Soulabaille, Y., 2016. *Benefits From R&D For D&D Projects Preparation*. Lyon, France, International Symposium on PREparation for DECommissioning.

Giraud, J., 2018. Annexe - Évolution des autorisations d'engagement de la mission recherche depuis 2016. *Rapport fait au nom de la commission des finances, de l'économie générale et du contrôle budgétaire sur le projet de loi de finances pour 2019 (n° 1255)*.

Gransier, T. A., 1995. *Computer Integrated Manufacturing Open Systems Architecture (CIMOSA): an industrial perspective!?*. PhD éd. Eindhoven, Netherlands: Eindhoven University of Technology.

Hart, L. E., 2015. *Introduction To Model-Based Systems Engineering (MBSE) and SysML*. [En ligne]
Available at: <https://www.incose.org/docs/default-source/delaware-valley/mbse-overview-incose-30-july-2015.pdf> [Accès le 31 07 2019].

Henry, S., 2018. *Decision support for ALARA approach thanks to a 3D digital repository and a global assessment method*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].

Hollnagel, E., Paries, J. & Wreathall, J., 2013. *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook (Ashgate Studies in Resilience Engineering)*. Boca Raton, FL, USA: Crc Press.

Honour, E. C., 2013. *Systems engineering return on investment*. PhD éd. Sydney, Australia: School of Electrical and Information Engineering.

Hubert, F., 2018. *Strategy in rehabilitation of polluted & abandoned industrial sites from the first half of the 20th century in France*. [En ligne]
Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].

IAEA, 2005. *Selection of decommissioning strategies: Issues and factors*, Vienna, Austria: IAEA.

IAEA, 2007. *Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Material*. Vienna, Austria: IAEA.

IAEA, 2013. *Cost Estimation for Research Reactor Decommissioning*. No. NW-T-2.4 ed. Vienna, Austria: IAEA.

IAEA, 2014. *Decommissioning of Facilities*. IAEA Safety Standards Series, Volume GSR Part 6.

- IAEA, 2018. *Lessons Learned from the Deferred Dismantling of Nuclear Facilities*. Vienna, Austria: IAEA.
- IFIC, IFAC, 1999. *Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology*.
- Iguchi, Y. et al., 2017. *Experiences of development of IT support systems for decommissioning of Fugen NPS*. Sarpsborg, Norway, Workshop on "Current and Emerging Methods for Optimising Safety and Efficiency in Nuclear Decommissioning".
- INCOSE, 2015. *INCOSE Systems Engineering Handbook*. Version 4 éd. San Diego, CA, USA: INCOSE.
- IRSN, 2013. Tome 1 - Programme Industriel de Gestion des Déchets - Projet CIGEO - Examen des études remises depuis 2009. *Rapport IRSN n° 2013-00001*.
- IRSN, 2016. *Déchets radioactifs de très faible activité : La doctrine doit-elle évoluer?*. [En ligne] Available at: https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRS_N-DG-2016-00002_Dechets-TFA-Doctrine.pdf [Accès le 31 07 2019].
- ISO, IEC, IEEE, 2015. *ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering - System life cycle processes*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC)/Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- ISO, IEC, 2014. *ISO/IEC 19508:2014(E) Information technology - Object Management Group - Meta Object Facility (MOF) Core*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC).
- ISO, IEC, 2016. *ISO/IEC 29110:2016 Systems and software engineering - Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC).
- ISO, 2006. *ISO 19439:2006 Enterprise integration - Framework for enterprise modelling*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO).
- ISO, 2017. *ISO 18557:2017 Characterisation principles for soils, buildings and infrastructures contaminated by radionuclides for remediation purposes*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization (ISO).
- ISO, 2018. *ISO 16647:2018 Nuclear facilities - Criteria for design and operation of confinement systems for nuclear worksite and for nuclear installations under decommissioning*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization (ISO).
- Kopach-Konrad, R. et al., 2007. Applying systems engineering principles in improving health care delivery. *Journal of General Internal Medicine*, Volume 22, pp. 431-437.

- Lafon, M., Chapurlat, V., Milot, J.-F. & Moitrier, C., 2018. *The D&D of Nuclear Facilities: a Systemic Approach for Project Organization and Monitoring*. Phoenix, AZ, USA, Waste Management Symposia 2018.
- Laporte, C.-Y. & Palza Vargas, E., 2012. The Development of International Standards to facilitate Process Improvements for Very Small Enterprises. *Software Process Improvement and Management: Approaches and Tools for Practical Development*, IGI Global Publisher, pp. 34-61.
- Le Moigne, J.-L., 1977. *La théorie du système général : Théorie de la modélisation*. collection «Systèmes-Décisions» éd. Paris, France: Presses Universitaires de France.
- Léger, M., 2019. *Un nouveau décret pour la filière nucléaire*. [En ligne] Available at: http://www.sfen.org/rgn/decret-filiere-nucleaire?utm_source=RGH_Hebdo&utm_medium=email&utm_campaign=Hebdo [Accès le 31 07 2019].
- Lemazurier, L., 2018. *Conception d'un Système Avancé de Réacteur PWR Flexible par les Apports Conjointes de l'Ingénierie Système et de l'Automatique*. PhD éd. Nantes, France: Université Bretagne Loire & IMT Atlantique.
- Lemazurier, L., Chapurlat, V. & Grossetête, A., 2017. *An MBSE Approach to Pass from Requirements to Functional Architecture*. Toulouse, France, International World Congress IFAC.
- Lô, M., 2013. *Contribution à l'évaluation d'architectures en Ingénierie Système : application à la conception de systèmes mécatroniques*. PhD éd. Montpellier, France: Université Montpellier II.
- Louka, M. N., Braseth, A. O., Szóke, I. & Toppe, A. L., 2018. *Using VR and AR Technologies to Enhance Safety, Security, and Efficiency in Smart Digital Systems for Optimising Dismantling and Waste Management*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].
- Macpherson, I. & Dunlop, A., 2016. *Development of a Systematic Approach to Post-Operation Clean Out at Sellafield*. Lyon, France, International Symposium on PREparation for DECommissioning.
- Magwood, W. D., 2018. *Decommission and Dismantling: Issues for Consideration*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- Maier, M. W., 1998. Architecting principles for system-of-systems. *Systems Engineering* 1(4), pp. 267-284.
- Malaval, L., 2017. *Alignement stratégique des systèmes d'informations des projets de démantèlement*. Montpellier, France: IAE Montpellier École Universitaire de Management.

- Micouin, P., 2014. *Model-Based Systems Engineering: Fundamentals and Methods*. Control, Systems and Industrial Engineering Series éd. Hoboken, NJ, USA & London, UK: Wiley & ISTE.
- Modelica, 2017. *Modelica® - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling*. [En ligne] Available at: <https://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec34.pdf> [Accès le 31 07 2019].
- NASA, 2016. *NASA Systems Engineering Handbook*. Revision 2 éd. Washington, DC, USA: NASA.
- Nastov, B., 2016. *Contribution à une méthode outillée pour la conception de langages de modélisation métier interopérables, analysables et prouvables pour l'Ingénierie Système basée sur des Modèles*. PhD éd. Montpellier, France: Université de Montpellier.
- Nastov, B., Chapurlat, V., Pfister, F. & Dony, C., 2017. *MBSE and V&V: a tool-equipped method for combining various V&V strategies*. Toulouse, France, International Federation of Automatic Control World Congress (IFAC WC 2017).
- Noda, K., 2018. *Overview of R&D for Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- OECD-NEA, 2012. *International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations*. Paris, France: OECD-NEA.
- OMG, 2008. *Software & Systems Process Engineering Meta-Model Specification Version 2.0*. [En ligne] Available at: <https://www.omg.org/spec/SPEM/2.0/PDF> [Accès le 31 07 2019].
- OMG, 2014. *Business Process Model and Notation BPMN version 2.0.2*. [En ligne] Available at: <https://www.omg.org/spec/BPMN> [Accès le 31 07 2019].
- OMG, 2016. *OMG Meta Object Facility (MOF) Core Specification, Version 2.5.1*. [En ligne] Available at: <https://www.omg.org/spec/MOF/2.5.1/PDF> [Accès le 31 07 2019].
- OMG, 2019. *System Modeling Language*. [En ligne] Available at: <https://www.omg.org/spec/SysML/About-SysML/> [Accès le 31 07 2019].
- Plana, R. et al., 2018. *Text mining and machine learning applied to dismantling operations documents: a practical business case*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com> [Accès le 31 07 2019].
- Pradoura, F., 2009. *Setting Up A Decontamination and Dismantling (D&D) Scenario – Methodology And Tools Developed*. Phoenix, AZ, USA, WM 2009 Conference.
- Project Management Institute, 2017. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) - Sixth Edition*. [En ligne] Available at: <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/pmbok> [Accès le 31 07 2019].

- Roques, P., 2016. *MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool*. Toulouse, France, 8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems.
- Samah, S. F., Rodhain, F. & Fallery, B., 2016. *Gouvernance de données dans le Démantèlement Nucléaire : confidentialité, partage et valorisation des données et informations stratégiques entre acteurs*. Nantes, France, Journées du Risque : "Nucléaire, Hommes et Sociétés".
- Samiri, M. Y., Najib, M., El Fazziki, A. & Boukachour, J., 2017. Toward a Self-Adaptive Workflow Management System Through Learning and Prediction Models. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 897-912.
- SFEN, 2019. *Recycler les bétons TFA avec le projet CYBER*. [En ligne] Available at: <http://www.sfen.org/rgn/recycler-betons-tfa-projet-cyber> [Accès le 31 07 2019].
- Szöke, I., 2018. *Decommissioning of legacy nuclear sites through a digital experience*. [En ligne] Available at: <https://sfen-events-media-library.cyim.com/> [Accès le 31 07 2019].
- Thierfeldt, S., 2012. Safe enclosure and entombment strategies in nuclear decommissioning projects. *Woodhead Publishing Series in Energy*, Volume Nuclear Decommissioning, pp. 245-292.
- Tocqueville, N., 2016. Une stabilisation des crédits destinés aux charges nucléaires de long terme des installations du CEA. *Avis présenté au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable (1) sur le projet de loi de finances pour 2017, adopté par l'Assemblée nationale, Tome VIII*, p. 12.
- van der Aalst, W. & van Hee, K., 2004. *Workflow Management: Models, Methods, and Systems*.
- Vernadat, F., 1999. *Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels*. Paris, France: Economica.
- Vernadat, F., 2002. *UEML: Towards a Unified Enterprise Modelling Language*. Troyes, France, 3e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation «Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels».
- Vitech Corp., 2017. *System Definition Guide*. [En ligne] Available at: <http://www.vitechcorp.com/support/documentation/genesys/500/systemdefinitionguide.pdf> [Accès le 31 07 2019].
- Ytournal, B., Macpherson, I., Clément, G. & Dunlop, A., 2016. *Applicability of Learning From Experience to Sellafield Post-Operation Clean Out and Decommissioning Programmes*. Lyon, France, International Symposium on PREparation for DECommissioning.

Résumé & Abstract

Résumé : En fin de vie, les installations nucléaires font l'objet d'opérations complexes dites d'assainissement et de démantèlement (A&D), nécessitant la collaboration d'un grand nombre d'acteurs de domaines d'activité variés. Ces opérations sont réalisées dans un contexte réglementaire et économique contraint, impliquant de nombreuses exigences nécessitant démonstrations et justifications avant comme pendant leur exécution, afin de démontrer et s'assurer de leur efficacité et de la sûreté et la sécurité des personnes comme des installations. Certaines problématiques persistent pour parvenir à une vision globale d'un projet lorsqu'il est en préparation puis en exécution, en tenant compte à la fois des référentiels d'exigences et des contraintes fortes, et des échelles temporelles très distendues. Deux ont été particulièrement considérées. Premièrement, la reproductibilité pour l'instant limitée des éléments des projets d'A&D, des usages et des pratiques, malgré l'existence de nombreux référentiels, normes, et retours d'expériences valorisés. Celle-ci est pourtant indispensable pour aller vers une vision opérationnelle plus industrielle de l'A&D. Deuxièmement, l'interopérabilité est une problématique majeure tant au niveau de l'organisation qu'aux niveaux des processus et des données, informations et connaissances, recueillies et manipulées tout au long de la vie de l'installation. De fait, les modèles ne sont pas toujours aptes à fournir, au regard des besoins de toutes les parties prenantes, une représentation suffisante, globale, et transversale, des projets. Leur fédération ou leur composition reste problématique pour donner à chaque instant une vision d'ensemble cohérente, et pour justifier avec un niveau de traçabilité élevé les opérations d'A&D.

Cette thèse propose une méthode outillée et opérationnelle, pour la description, l'analyse et l'aide au pilotage de projets d'A&D. Elle vise une finalité de développement de progiciel support de cette méthode. Deux notions importantes ont guidé ces travaux. Durant sa conception, comme son exécution, un projet d'A&D est vu et doit donc être modélisé comme un système de systèmes, afin de tenir compte des différents facteurs de complexité qui le caractérisent. Durant son exécution, les responsables doivent gérer le projet et les incertitudes et aléas, qui en sont inhérents et peuvent impacter sa planification et son organisation. La notion de workflow adaptatif apparaît comme pertinente pour aider à ce pilotage, qui doit rester totalement maîtrisé, justifié, tracé, et être lui-même source de retours d'expérience pour en assurer la reproductibilité future. Les travaux menés ont donc consisté à élaborer et tester *in situ* la méthode souhaitée, en croisant les principes de la systémique, de l'ingénierie système basée sur des modèles, de l'ingénierie de projets, et de la modélisation d'entreprise. Cette méthode propose d'abord une formalisation des concepts de l'A&D, puis un ensemble logique, ouvert et interopérable de langages de modélisation, et enfin une démarche opératoire à suivre pour disposer d'une vision globale et holistique des projets d'A&D. Un outil démonstrateur a été développé et expérimenté sur un chantier pilote du CEA afin de vérifier la pertinence, l'exhaustivité, l'efficacité, et le caractère transposable de la méthode élaborée. Cet outil se base sur un modèle générique et structurant pour les projets d'A&D, proposé par ces travaux, et permet de réutiliser des modèles, en adaptant le concept de patron de conception à la modélisation de l'A&D.

Abstract: *At the end of their life, nuclear facilities are subject to complex dismantling and decommissioning (D&D) operations, which require the collaboration of a large number of stakeholders from various businesses. These operations are carried out in a constrained regulatory and economic context, involving numerous requirements. This requires demonstrations and justifications before and during the execution of operations, in order to attest and ensure their efficiency and the safety of both people and facilities. Some issues remain problematic to reach a global vision of a project when it is in preparation and then in execution, taking into account at the same time the numerous requirements, the severe constraints, and the very long time scales. Two have been particularly considered. Firstly, the reproducibility currently limited of D&D projects elements, uses and practices, despite the presence of many references, standards, and valued feedback. This is essential to head for a more industrial vision of D&D. Secondly, interoperability is a major issue at the organizational level as well as at the process or data, information and knowledge levels. The models do not always enable to provide, regarding the needs of all the stakeholders, a sufficient, global and transversal representation of the projects. Their federation or their composition remains difficult to give at each moment a coherent holistic view, and to justify with a high level of traceability the D&D operations.*

This thesis proposes an equipped and operational method, for the description, the analysis and the management support of D&D projects. Its final purpose is the development of enterprise software supporting this method. Two important notions have guided this work. During its design and its execution, a D&D project is seen and must therefore be modeled as a system of systems, in order to take into account its various complexity factors. During its execution, managers must pilot the project and the inherent uncertainties and hazards that may affect its planning and its organization. The notion of adaptive workflow appears relevant to help this project management, which shall remain fully controlled, justified, and traced. This shall also be a source of feedback to ensure future reproducibility. This work involved developing and testing the desired method in situ, combining the principles of systemics, model-based systems engineering, project engineering, and enterprise modeling. This method first proposes a formalization of the D&D concepts, then a logical, open and interoperable set of modeling languages, and finally an operating procedure that must be followed to establish a global and holistic vision of D&D projects. A demonstrator tool has been developed and tested on a CEA project to verify the relevance, completeness, efficiency and transposability of the developed method. This tool is based on a generic and structuring model for D&D projects, proposed by this work. It enables to reuse models by adapting the concept of design pattern to the modeling of D&D.