



**HAL**  
open science

# Contribution à l'élaboration d'une méthode pour l'organisation, l'ingénierie et le pilotage de projets de dépollution de friches et de sites industriels

Mayssa Chebbi

► **To cite this version:**

Mayssa Chebbi. Contribution à l'élaboration d'une méthode pour l'organisation, l'ingénierie et le pilotage de projets de dépollution de friches et de sites industriels. Automatique. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2023. Français. NNT: 2023EMAL0010 . tel-04482164

**HAL Id: tel-04482164**

**<https://theses.hal.science/tel-04482164v1>**

Submitted on 28 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR  
DE L'INSTITUT MINES-TELECOM (IMT) –  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES D'ALÈS (IMT MINES ALÈS)**

**En Systèmes, Automatique et Micro-électronique**

**École Doctorale I2S – Information, Structures, Systèmes**

**Unité de recherche Laboratoire des Sciences des risques (LSR), IMT Mines Alès**

**Contribution à l'élaboration d'une méthode pour l'organisation,  
l'ingénierie et le pilotage de projets de dépollution de friches et de  
sites industriels**

**Présentée par Mme Mayssa CHEBBI**

**Le 26 Octobre 2023**

**Sous la direction de Vincent CHAPURLAT  
et Philippe GIRONES**

**Devant le jury composé de**

**Abderrahman El Mhamedi, Professeur, Laboratoire QUARTZ, U. Paris 8**

**Frédéric Benaben, Professeur, Centre de Génie Industriel CGI, IMT Mines Albi**

**Mme Stéphanie Tillement, Maitre Assistante, IMT Atlantique**

**Pierre Lauret, Ingénieur, DREAL Aquitaine**

**Laurent Aprin, Professeur, LSR IMT Mines Alès**

**Jean-Samuel Wienin, Maitre Assistant, LSR IMT Mines Alès**

**Philippe Girones, Ingénieur Expert Sénior, CEA Marcoule**

**Vincent Chapurlat, Professeur, LSR IMT Mines Alès**

**Président, Rapporteur**

**Rapporteur**

**Examinatrice**

**Examineur**

**Co-encadrant**

**Co-encadrant**

**Co-directeur de thèse**

**Directeur de thèse**





---

## Remerciements

---

Il est difficile de réaliser que trois années se sont écoulées, marquant la fin de cette étape de ma vie. Ce furent trois années d'intense réflexion dans un domaine riche en complexités à différents niveaux. Il est maintenant temps d'ajouter la touche finale en exprimant ma gratitude à ceux qui m'ont soutenu et aidé à atteindre ce point. Si traduire un tourbillon d'émotions variées en quelques mots s'avère être un défi, j'espère néanmoins que mes mots sauront rendre justice à mes sentiments.

En premier lieu, j'exprime ma profonde gratitude à ceux qui ont bien voulu siéger au sein de mon jury de soutenance.

Ma reconnaissance envers **Frédéric Benaben** et **Abderrahman El Mhamedi** est immense pour avoir consenti à consacrer de leur temps à la lecture approfondie et au rapport de ce manuscrit. Je suis persuadé que leurs retours enrichissants, outre une perspective nouvelle sur ma thèse, sculpteront mes futurs travaux.

Ma sincère gratitude s'étend également à **Mme Stéphanie Tillement** et à **Pierre Lauret**, qui ont accepté d'être examinateurs lors de ma soutenance.

En second lieu, mon cœur déborde de gratitude envers l'équipe sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour.

Je tiens particulièrement à souligner le rôle capital de mon directeur de thèse, **Vincent Chapurlat**. Il a été bien plus qu'un guide : un véritable mentor tout au long de cette épopée doctorale. Vincent m'a enseigné la rigueur, la pertinence du travail acharné. Il m'a initiée aux mystères et à la beauté de la recherche, m'encourageant à allier créativité et rationalité. Sa pédagogie bienveillante m'a été d'un précieux soutien. Je le remercie également pour ces moments de complicité où, en toute amitié, il a su prêter une oreille attentive aux confidences d'une jeune femme émotive. Merci, Vincent.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers **Jean-Samuel Wienin**, un encadrant d'exception. Sa remarquable capacité d'écoute et ses précieux conseils m'ont permis d'adopter une méthodologie de travail efficace. Chaque séance avec lui était à la fois agréable et marquante. C'est cet encadrant qui vous redonne confiance lorsque tout semble perdu. Sa capacité à conjuguer professionnalisme et compassion, tant dans les moments d'émotion que de soutien pratique, en fait un guide inégalé. Du fond du cœur, merci Jean-Sam.

Je tiens à remercier **Laurent Aprin** pour son engagement, son écoute, sa bienveillance et son professionnalisme. Sa force de proposition et ses remarques pertinentes ont enrichi ce projet doctoral. Sa présence a été un véritable phare, éclairant les zones d'ombre et guidant mes réflexions. Avec lui, chaque défi semblait surmontable.

et chaque question trouvait une réponse, ou du moins, une nouvelle direction à explorer. Merci infiniment, Laurent

J'aimerais exprimer ma profonde gratitude envers mon codirecteur, **Philippe Girones**. Son expertise et ses suggestions pertinentes ont été inestimables pour ce travail. Je lui suis reconnaissante pour la richesse des échanges que nous avons partagés.

Il est souvent dit que nous sommes le fruit de ceux qui nous entourent. Aujourd'hui, je tiens à rendre hommage à ces piliers qui ont forgé ma vie et soutenu mon parcours.

À mon père, **Ameur Chebbi**, tu es la boussole qui a guidé chacun de mes pas. Ton amour, ta sagesse et ton dévouement inébranlables m'ont montré ce que signifie être fort face aux tempêtes de la vie. Les sacrifices que tu as faits, les leçons que tu m'as apprises, resteront à jamais gravés dans mon cœur.

À ma mère, **Zohra Chebbi**, la douce mélodie de ta voix, ton amour incommensurable et ta patience infinie ont été mon refuge. Tu m'as appris la tendresse, la résilience et la grâce. Dans chaque étape de ce voyage, j'ai ressenti la chaleur de ton amour enveloppant mon âme.

**Hela**, ma chère sœur, ton soutien inébranlable et ton amour fraternel m'ont portée dans les moments les plus difficiles. **Montassar**, mon beau-frère, ta bienveillance et ton humour ont souvent illuminé mes journées. À **Oumayma, Taieb, Hedi, Aymen, Noucha, Nour**, vous êtes les étoiles scintillantes qui illuminent ma voûte céleste. Chacun de vous a apporté une lumière unique à ma vie.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma grande famille, mes tantes, cousins et cousines. Vous avez formé une mosaïque d'amour, de soutien et d'encouragement autour de moi.

Et à mes amies fidèles, **Sywar Bel Kahla, Olfa Hagui, Amira Djbeli, Chiraz Kasdallah, Jihane Bouslihim, Menyar Mahjoub** : vous êtes les sœurs que la vie m'a offertes. Votre présence, vos rires, vos conseils, et surtout votre force indomptable ont été le vent sous mes ailes, m'encourageant à voler toujours plus haut.

Avec vous tous, je me suis sentie aimée, soutenue, et encouragée à chaque étape. Du fond du cœur, je vous remercie.

## Table des matières

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>13</b>
<b>1. CONTEXTE GENERAL DES TRAVAUX ET PROBLEMATIQUES .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Contexte général .....</b>	<b>18</b>
1.2.1. Quoi ? La dépollution expliquée et les définitions clés .....	18
1.2.2. Pourquoi ? La nécessité cruciale de la dépollution .....	24
1.2.3. Quand ? Le timing de la dépollution.....	25
1.2.4. Comment ? Les méthodes et techniques expliquées .....	27
1.2.5. Qui ? les acteurs en matière de dépollution .....	31
<b>1.3. Problématiques perçues .....</b>	<b>34</b>
1.3.1. Mauvais pilotage et gestion de projet : les facteurs de complexité de la dépollution .....	34
1.3.2. Comportements émergents.....	35
1.3.3. Coût élevé .....	36
1.3.4. Long délais.....	38
1.3.5. Insatisfaction des exigences des parties prenantes .....	39
1.3.6. Mauvaise gestion des Données, Informations et Connaissances (DIC).....	40
1.3.7. Synthèse : des défis de la dépollution à la formulation de verrous globaux de recherche.....	41
<b>1.4. Conclusion et méthodologie de recherche.....</b>	<b>44</b>
<b>2. ETAT DE L'ART.....</b>	<b>47</b>
<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>48</b>
<b>2.2. Verrous conceptuels .....</b>	<b>48</b>
2.2.1. Manque de modèle générique pour la dépollution .....	48
2.2.2. Absence de spécification formelle des métadonnées.....	49
2.2.3. Difficulté de communication et coopération entre les parties prenantes.....	50
2.2.4. Ambiguïté sémantique et ontologique .....	51
2.2.5. Absence d'indicateurs partagés entre les parties prenantes .....	53
<b>2.3. Verrous méthodologiques .....</b>	<b>54</b>
2.3.1. Mauvaise planification et gestion des imprévus .....	54
2.3.2. Absence de traçabilité des DIC .....	55

2.3.3. Limitation de la notion de gestion d'exigences .....	56
<b>2.4. Verrou financier .....</b>	<b>58</b>
2.4.1. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts .....	58
<b>2.5. Verrous techniques .....</b>	<b>60</b>
2.5.1. Manque d'outils interopérables.....	60
2.5.2. Insuffisance de fiabilité des données .....	60
<b>2.6. Verrous organisationnels.....</b>	<b>61</b>
<b>2.7. Verrous environnementaux .....</b>	<b>62</b>
<b>2.8. Conclusion : verrous adressés et contributions proposées</b> .....	<b>63</b>
<b>3. LA MÉTHODE DEPOSE (DEPOLLUTION MODEL BASED SYSTEM</b> <b>ENGINEERING) .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. Introduction : vers la méthode DEPOSE .....</b>	<b>66</b>
<b>3.2. La méthode DEPOSE : vision globale .....</b>	<b>67</b>
3.2.1. Principes de base.....	67
3.2.2. Hypothèses.....	68
3.2.3. Apports combinés de l'approche systémique et de la modélisation métier.....	69
3.2.4. DEPOSE est une méthode .....	74
<b>3.3. Conclusion.....</b>	<b>77</b>
<b>4. NIVEAU DEPOLLUTION SYSTEM : CONCEPT .....</b>	<b>79</b>
<b>4.1. Introduction : Un système de dépollution est un système</b> <b>de systèmes .....</b>	<b>80</b>
<b>4.2. Caractéristiques du système de dépollution .....</b>	<b>81</b>
4.2.1. Finalité, missions et objectifs d'un système de dépollution	81
4.2.2. Le DS dans son contexte.....	83
4.2.3. Cycle de vie d'un système de dépollution.....	85
4.2.4. Les parties prenantes d'un système de dépollution .....	88
4.2.5. Les exigences des parties prenantes .....	91
4.2.6. Les interfaces.....	94
4.2.7. Architecture générique d'un système de dépollution .....	96
<b>4.3. Synthèse et conclusion.....</b>	<b>102</b>
<b>5. NIVEAU DEPOLLUTION NETWORK : CONCEPT.....</b>	<b>103</b>
<b>5.1. Introduction .....</b>	<b>104</b>
<b>5.2. Défis.....</b>	<b>104</b>
<b>5.3. Réseau d'entreprises : congruence entre l'entreprise</b> <b>étendue et l'entreprise virtuelle.....</b>	<b>106</b>

---

5.4. Identifier les rôles et les responsabilités .....	108
5.5. cartographie collaborative des processus en tant qu'architecture fonctionnelle.....	110
5.6. Modèle de gouvernance : mise en œuvre de l'holacracy .....	113
5.7. Synthèse et conclusion .....	115
<b>6. FORMALISATION DE LA METHODE DEPOSE POUR LE DEPOLLUTION SYSTEM .....</b>	<b>117</b>
6.1. Concepts : construction d'un méta modèle .....	118
6.2. Les vues de modélisation et les DSML associés.....	121
6.3. Les DSML .....	123
6.3.1. Context Modelling DSML.....	123
6.3.2. Functional Modeling DSML .....	126
6.3.3. Structural Modelling DSML.....	130
6.3.4. Concern Modeling DSML.....	134
6.3.5. Risks Management DSML.....	138
6.3.6. Life cycle Modeling DSML.....	145
6.3.7. Data Management DSML .....	148
6.3.8. Conclusion .....	151
6.4. Démarche opératoire .....	151
6.4.1. Niveau Depollution System .....	151
6.4.2. Niveau Réseau de dépollution.....	159
6.5. RECP .....	161
6.6. Outil.....	162
6.6.1. Le choix de l'environnement de modélisation .....	162
6.6.2. Objectif de l'outil.....	163
6.6.3. DEPOSETOOL .....	163
6.7. Synthèse et conclusions.....	165
<b>7. APPLICATION DE LA METHODE DEPOSE .....</b>	<b>167</b>
7.1. Introduction .....	168
7.2. Présentation du cas d'application .....	168
7.3. Analyse de l'existant.....	170
7.4. Problèmes liés au design time .....	170
7.4.1. Manque de validation préliminaire.....	170
7.4.2. Manque de flexibilité dans la conception.....	171
7.4.3. Traçabilité des exigences.....	171
7.5. Problème lié au Run time.....	172

7.5.1. Performance insuffisante.....	172
7.5.2. Manque de réactivité face aux imprévus .....	173
7.5.3. Absence d'évolutivité du système de dépollution. ....	174
<b>7.6. Application de la méthode DEPOSE.....</b>	<b>174</b>
7.6.1. Parties Prenantes.....	175
7.6.2. Diagramme de contexte.....	177
7.6.3. Exigences.....	178
7.6.4. Architecture Fonctionnelle du système de dépollution du site Alpha.....	179
7.6.5. Conclusion.....	184
<b>8. CONCLUSION ET PERSPECTIVE .....</b>	<b>187</b>
<b>8.1. Synthèse et constats .....</b>	<b>188</b>
<b>8.2. Perspectives .....</b>	<b>189</b>
<b>9. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>191</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1: Identification des acteurs dans un contexte de la dépollution de sites industriels pollués en France : Source (Origo 2008) .....	32
Tableau 2: Synthèse des verrous classifiés par type .....	42
Tableau 3: Tableau récapitulatif des problématiques identifiées associées aux verrous..	43
Tableau 4: Examen global des enjeux et des parties prenantes impliqués dans la dépollution des sites pollués en France. (Origo 2008).....	57
Tableau 5: Liste des contributions adressées par verrou étudiées dans ce travail de recherche .....	63
Tableau 6: Exemples de types d'objectifs .....	82
Tableau 7: Inventaire des parties prenantes établi à partir d'une liste générique (exemple de site nucléaire) .....	89
Tableau 8: Guide de caractérisation des interfaces .....	95
Tableau 9: Exemple de l'utilisation du Guide de caractérisation des interfaces.....	96
Tableau 10: Inventaire des fonctions élémentaires d'un système de dépollution .....	97
Tableau 11: Syntaxe concrète du Context Modeling DSML.....	126
Tableau 12: Syntaxe concrète du structural Modeling DSML .....	132
Tableau 13: Syntaxe concrète DSML de gestion des risques pour le diagramme de maîtrise des risques .....	144
Tableau 14: Syntaxe concrète du Life Cycle Modeling DSML.....	147
Tableau 15: Contributions par la méthode DEPOSE au niveau DS.....	165
Tableau 16: Classement par type des parties prenantes .....	175
Tableau 17: Finalité et Intervention des Parties Prenantes .....	175
Tableau 18: Classement par note des parties prenantes.....	176
Tableau 19: Référentiel des exigences.....	178
Tableau 20 : Evaluation de la méthode DEPOSE ( Cas d'application) .....	184

## Table des illustrations

Figure 1 : Plan du manuscrit.....	15
Figure 2 : Poids global des 7 familles de polluants identifiées dans les sols ou les nappes mi-2018. Source : MTES/DGPR, Basol.....	20
Figure 3 : Nombre de sites et sols pollués par région en 2018. Source : MTES/DGPR, Géorisques.....	22
Figure 4 : Répartition Géographique des Sites et Sols Pollués en France en 2023. Source : MTES/DGPR, Géorisques .....	26
Figure 5: Le schéma conceptuel.....	28
Figure 6 : Traitements des terres polluées des sites pollués. Source : MTES/DGPR, Basol.....	29
Figure 7: Coût global d'une opération de traitement. Source : BRGM ..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure 8 : Comparaison des coûts (Moy. basse - Moy. haute et Moy. haute - Max) pour différentes techniques en euros/tonne de sol traité. Source selectdepol.fr ..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure 9 : Démarche employée pour orienter le travail de thèse vers les contributions .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 10: IEEE Std 1471-2000 (extrait synthétique) .....	71
Figure 11: La grille SAGACE (Penalva 1990) .....	72
Figure 12: Les composants de la méthode .....	75
Figure 13: Pyramide de l'OMG interprétée avec l'inclusion de vues et de points de vue (Chapurlat et al. 2022).....	75
Figure 14: Exemple de syntaxes abstraite et concrète, de règles de modélisation et sémantique opérationnelle.....	76
Figure 15 : Diagramme de contexte d'un système de dépollution générique.....	83
Figure 16: Le sur-système territorial d'un système de dépollution .....	84
Figure 17: Phases d'évolution du système de dépollution (cycle de vie) .....	86
Figure 18: Modes opérationnels du système de dépollution .....	87
Figure 19: Exemple de matrice d'influences directes pour la dépollution d'une installation nucléaire.....	90
Figure 20: Matrice des exigences .....	93
Figure 21: Représentation des flux, des contraintes et des ressources de la fonction F..	97
Figure 22: Architecture fonctionnelle du système de dépollution .....	99
Figure 23: architecture physique d'un système de dépollution.....	100
Figure 24: Exemple d'attribution de fonctions à une entité physique d'un système de dépollution.....	102
Figure 25: les Concepts identifiés pour un système de dépollution (DS).....	102

Figure 26 : Croisement des modèles d'entreprise étendue et d'entreprise virtuelle.....	107
Figure 27 : Principaux besoins et rôles de la gouvernance des DN en tant qu'équilibre (Marius 2010) .....	109
Figure 28: Cartographie simplifiée des processus du DN .....	111
Figure 29 : De l'application holacracy à la gouvernance DN.....	113
Figure 30: Le concept de PlatformFramework_NamedObject.....	118
Figure 31: Classes abstraites de structuration.....	120
Figure 32: Principe du modèle de système (ISO 24641).....	121
Figure 33: Toutes les vues de modélisation et les DSML associés.....	122
Figure 34: Context Modeling DSML.....	125
Figure 35: Exemple d'un diagramme de contexte .....	126
Figure 36: Functional Modeling DSML.....	129
Figure 37: Exemple d'un diagramme Fonctionnel .....	130
Figure 39: Exemple d'un diagramme structurel.....	132
Figure 38: structural Modeling DSML .....	133
Figure 40: Concern Modeling DSML.....	136
Figure 41: L'éditeur développé sous Xtext .....	137
Figure 42: Risks Management DSML.....	141
Figure 43:Diagramme associé au Risk Management DSML et modes de transition.....	142
Figure 44: exemple Diagramme de maitrise des risques .....	145
Figure 45: Life Cycle Modeling DSML .....	147
Figure 46: Life cycle diagramme.....	148
Figure 47: Data management DSML.....	150
Figure 48: Démarche opératoire pour le niveau DS (BPMN simplifié) .....	158
Figure 49: BPMN simplifié de la démarche opératoire pour le Niveau DN .....	160
Figure 50: Aperçu de l'outil de modélisation.....	163
Figure 51: schéma de principe de l'intégration technique du RECP .....	164
Figure 52: Extrait de RECP développé.....	165
Figure 53: Diagramme de contexte phase de conception.....	177
Figure 54 - Décomposition hiérarchique fonctionnelle de niveau 1.....	179
Figure 55 - Décomposition hiérarchique de la fonction "Effectuer le traitement des polluants".....	180
Figure 56 - Décomposition hiérarchique de la fonction "Communiquer" .....	180
Figure 57: BPMN décrivant un processus de dépollution du projet de dépollution site Alpha.....	181



# **INTRODUCTION**

La dépollution des sites industriels est devenue une préoccupation majeure à travers le monde, tant du point de vue environnemental que sociétal. Ces efforts visent notamment à inverser les dégâts causés par des années d'activités industrielles souvent sans prise en compte de l'environnement. En France, tout comme dans de nombreux pays développés, ce défi est particulièrement pressant en raison de la densité de son tissu industriel et de son héritage d'activités manufacturières. L'enjeu ne réside pas uniquement dans la dimension environnementale, mais s'étend aussi aux domaines économique, social et de la santé collective.

Cependant, entreprendre des projets de dépollution n'est pas une tâche aisée. La complexité de tels projets est souvent sous-estimée ce qui peut conduire à des délais prolongés, des retards inattendus, des conflits d'intérêts entre les différents intervenants, des problèmes d'interopérabilité ou encore des comportements émergents imprévus. Par ailleurs, chaque site a sa propre histoire, sa propre géographie et ses propres défis en termes de pollution, rendant chaque projet unique en son genre.

Plusieurs défis sont à étudier, à comprendre et à lever et cela nécessite de disposer d'un cadre structuré, de principes et de règles encore peu étudiées jusqu'ici. Le tout doit reposer sur une grande rigueur à la fois scientifique et technique, structurant et coordonnant les différentes activités tout en assurant une traçabilité et un partage transparent des résultats. Il est également essentiel de fonder cette démarche sur des démonstrations, des preuves et des données tangibles pour gagner la confiance de tous les acteurs impliqués.

Dans cette perspective, ces travaux sont concentrés sur l'élaboration d'une méthode nommée DEPOSE pour DEPollution model based System Engineering. Elle vise non seulement à conceptualiser la dépollution, mais aussi à soutenir les équipes sur le terrain à travers une approche d'ingénierie basée sur des modèles. L'ambition est de standardiser et d'optimiser les pratiques tout en s'adaptant aux spécificités de chaque projet.

La mise au point de la méthode DEPOSE n'a pas été linéaire. Elle s'est construite en combinant une approche descendante, basée sur la théorie, l'exploitation de standards et l'exploration de la littérature, complétée par une approche montante, tirant des leçons des pratiques réelles sur le terrain, avec leurs limites et leurs contraintes. Ce mémoire reprend et retrace cette démarche de recherche et développement, tout en mettant en avant comment DEPOSE peut améliorer la dépollution.

Ce manuscrit se structure en sept chapitres majeurs synthétisés Figure 1. Le chapitre 1 s'attarde sur les problématiques et les obstacles rencontrés dans le

domaine de dépollution. Le chapitre 2 se penche sur l'état de l'art, identifie les verrous existants et introduit la contribution de DEPOSE. Le chapitre 3 offre une vue globale de la méthode DEPOSE avec ses fondements conceptuels. Les chapitres 4 et 5 plongent respectivement dans les concepts de Depollution System et de Depollution Network. Le chapitre 6 synthétise la méthode DEPOSE dans son ensemble. Enfin, le chapitre 7 illustre l'application de cette méthode sur un cas d'application avant la conclusion du manuscrit.

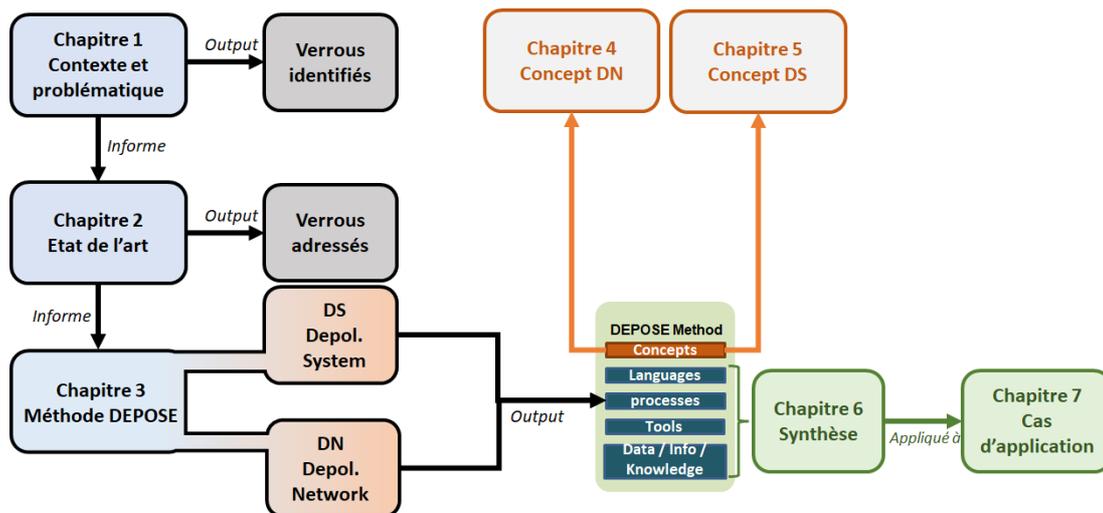


Figure 1 : Plan du manuscrit



# **1. CONTEXTE GENERAL DES TRAVAUX ET PROBLEMATIQUES**

## 1.1. INTRODUCTION

La lecture du rapport de la commission d'enquête du Sénat de 2020 sur la pollution des sols (Gisèle 2020) illustre clairement l'intérêt et la problématique de la dépollution des sites industriels. On peut ainsi y lire que *« notre pays, caractérisé par une riche histoire industrielle et minière, compte plus de 320 000 anciens sites d'activités industrielles ou de services, et près de 3 000 anciens sites miniers. En dépit de son impact majeur sur la santé des populations et l'environnement, la pollution des sols d'origine industrielle et minière constitue toutefois un enjeu mal mesuré et insuffisamment pris en compte dans notre législation »*

Il est ainsi compréhensible que la dépollution des sites industriels soit un défi majeur pour nos sociétés et territoires. En effet, la réutilisation de l'espace occupé par ces sites, afin de pouvoir y mener d'autres activités en toute sécurité est un enjeu économique et sociétal. La compréhension précise et la gestion efficace de cet héritage industriel nécessitent alors une approche holistique et une maîtrise rigoureuse des actions et des impacts de la dépollution pour atteindre un état plus durable. Il est donc indispensable d'avoir une approche globale des objectifs de performance des projets de dépollution (coûts, qualité, délais), de sûreté et de sécurité des biens et des personnes, et des enjeux environnementaux.

La dépollution doit être envisagée comme une démarche organisée et structurée et donc plus facilement reproductible, quelles que soient les spécificités et les complexités du site, du polluant ou des intervenants.

Ce travail de thèse est une contribution à l'élaboration de cette démarche et vise à énumérer un certain nombre de problèmes liés à diverses contraintes et facteurs de complexité, qui ne peuvent plus être traités isolément. Les secteurs du nucléaire et de l'aéronautique ont déjà développé et validé des approches pour répondre à des facteurs de complexité similaires. Les travaux proposés visent à s'inspirer de ces méthodes, pratiques et usages pour repenser l'organisation et la gestion des projets de dépollution.

## 1.2. CONTEXTE GENERAL

### 1.2.1. Quoi ? La dépollution expliquée et les définitions clés

Il est souhaitable de répondre avant tout aux questions suivantes : qu'est-ce que la dépollution ? Qu'est-ce qu'un *site* ou une *friche industrielle* susceptible de

devoir être dépollué ? Quelles sont alors les sources de *pollution* et qu'est-ce qu'un *polluant* ?

### **Pollution**

Selon (Normes 2001), la pollution désigne l'introduction directe ou indirecte, à cause de l'activité humaine, de substances ou de contaminants dans l'air, l'eau ou le sol. Ces substances sont susceptibles de nuire à la santé humaine, à la qualité des écosystèmes aquatiques ou terrestres, de causer des dégâts matériels, de détériorer ou d'entraver l'agrément de l'environnement ou d'autres utilisations légitimes de celui-ci (Légifrance 2000). Lorsque l'on parle de pollution, il est nécessaire de définir le terme de seuil. Il désigne un niveau de contamination qui, une fois atteint, produit des dommages irréversibles, des déséquilibres écologiques et des effets nocifs sur la santé des êtres vivants. Ce seuil se veut être un point de basculement représentatif de l'impact réel de la pollution et nécessitant une réponse ferme et coordonnée de toutes les parties prenantes (Koesler 2010). Une partie prenante est définie comme « *une personne ou un groupe qui possède un intérêt vis-à-vis d'une décision ou activité d'une organisation* » (26000 ISO 2010).

### **Polluant**

Le mot « polluant » peut faire référence à toute substance créée artificiellement et libérée dans l'environnement, ainsi qu'à tout changement d'origine humaine influençant la concentration ou la distribution d'une substance naturelle spécifique à un certain environnement. Dans une définition élargie, le mot « polluant » se réfère à une substance ou un ensemble de substances causant une dégradation des propriétés de l'environnement, même si elles sont présentes en dessous du niveau de nuisance. C'est pourquoi on les appelle parfois « altéragènes ». Pour les polluants nuisibles à la vie, on utilise le terme « contaminants ». Des accords internationaux encadrent la libération des polluants en fonction de leur toxicité (Normes 2001).

Sur un site industriel, plusieurs types de polluants peuvent coexister de façon récurrente et notamment les hydrocarbures et les métaux et métalloïdes. Selon (Géorisques 2018) les minéraux, les produits chlorés et les HAP constituent environ 60% des cas de pollutions multiples des sols comme le montre la Figure 2. Ces substances, largement utilisées dans l'industrie et les transports, ont un potentiel de nuisance élevé, tant pour l'environnement que pour la santé humaine. D'autre part, les cyanures, les BTEX (un regroupement des Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène) et d'autres contaminants (comme l'ammonium, les chlorures, les pesticides, les solvants non halogénés, les sulfates, les substances radioactives) sont également présents et représentent moins de 10% des contaminations du sol (Géorisques 2018).

La pollution des eaux souterraines est très similaire à celle des sols au niveau des hydrocarbures (27%) et des métaux et métalloïdes (18%) (Géorisques 2018). Cette similarité souligne la nécessité d'adopter une vision intégrée de la gestion de nos ressources naturelles, car la pollution affecte l'ensemble de nos écosystèmes.

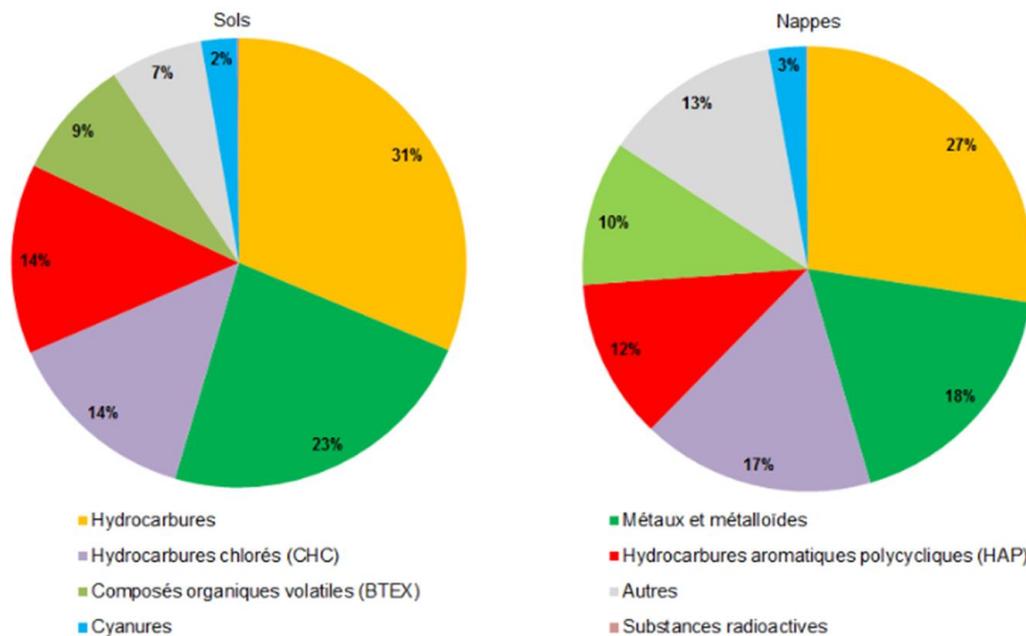


Figure 2 : Poids global des 7 familles de polluants identifiées dans les sols ou les nappes mi-2018. Source : MTES/DGPR, Basol

### **Friche industrielle**

Le terme *friche* trouve son origine dans la terminologie agricole et la géographie rurale. Il est utilisé avec une connotation négative pour décrire un terrain qui n'est pas cultivé, mal placé ou de faible fertilité (Sébillotte 1977). La friche urbaine varie en fonction de plusieurs facteurs (Kellerhals and Mathey 1992). Il est possible d'identifier trois critères essentiels : l'abandon (industriel dans notre cas), la détérioration et la durée d'inutilisation, auxquels peuvent s'ajouter la taille de la friche, le niveau d'inutilisation (potentiel de réaffectation temporaire) et l'origine de la friche. Il existe aussi plusieurs catégories de friches, par exemple les friches ferroviaires, militaires, scolaires, etc. Dans cette étude, nous nous intéressons spécifiquement aux friches industrielles. Une friche industrielle est un terrain où se trouvent des installations industrielles désaffectées, abandonnées ou sous-utilisées. Ces espaces étaient autrefois utilisés pour des activités industrielles ou commerciales mais ont perdu leur fonction première en raison de divers facteurs tels que la délocalisation, le déclin d'une industrie spécifique, des changements dans l'économie locale ou globale, ou des décisions stratégiques d'entreprises.

### ***Sites et sols pollués***

Le dictionnaire de l'environnement (Normes 2001) utilise « sites et sols pollués » pour caractériser un lieu (qu'il soit d'usage industriel ou autre) qui, par suite de l'accumulation ou de l'infusion de substances polluantes, engendre des impacts sur l'environnement ou la santé publique. En l'absence d'un interlocuteur financièrement responsable, on utilise le terme « site pollué orphelin ». Ces sites et sols pollués sont souvent liés à des méthodes anciennes de gestion des déchets, à des fuites ou des déversements accidentels ou délibérés de produits chimiques, ou encore aux dépôts atmosphériques accumulés sur de nombreuses années (BRGM 1999). Dans une perspective plus large, l'impact de la pollution des sols ne se limite pas seulement à la santé humaine, mais s'étend aussi à la biodiversité du sol (Zhang et al. 2013), ce qui peut altérer le fonctionnement des écosystèmes du sol, tels que les micro-organismes qui jouent un rôle crucial dans la décomposition de la matière organique et la nutrition des plantes (Wagg et al. 2014).

On observe que les régions avec un héritage industriel marqué, ainsi que celles qui ont subi une urbanisation intense, sont souvent celles qui présentent le plus grand nombre de sites et de sols pollués (Figure 3). La Figure 3 illustre la répartition des sites et sols pollués par région. Sur l'axe des abscisses, nous observons le nombre de sites et sols affectés, tandis que l'axe des ordonnées présente les différentes régions concernées. Pour chacune d'elle, la proportion que ce nombre représente par rapport au total des sites pollués toutes régions confondues est exprimé sous la forme d'un pourcentage (Géorisques 2018). Les régions qui ont été les moteurs économiques de la France durant la révolution industrielle sont les plus impactées par les pollutions : Auvergne-Rhône-Alpes (18,1%), Grand Est (15,5%) et Hauts-de-France (13,6%).

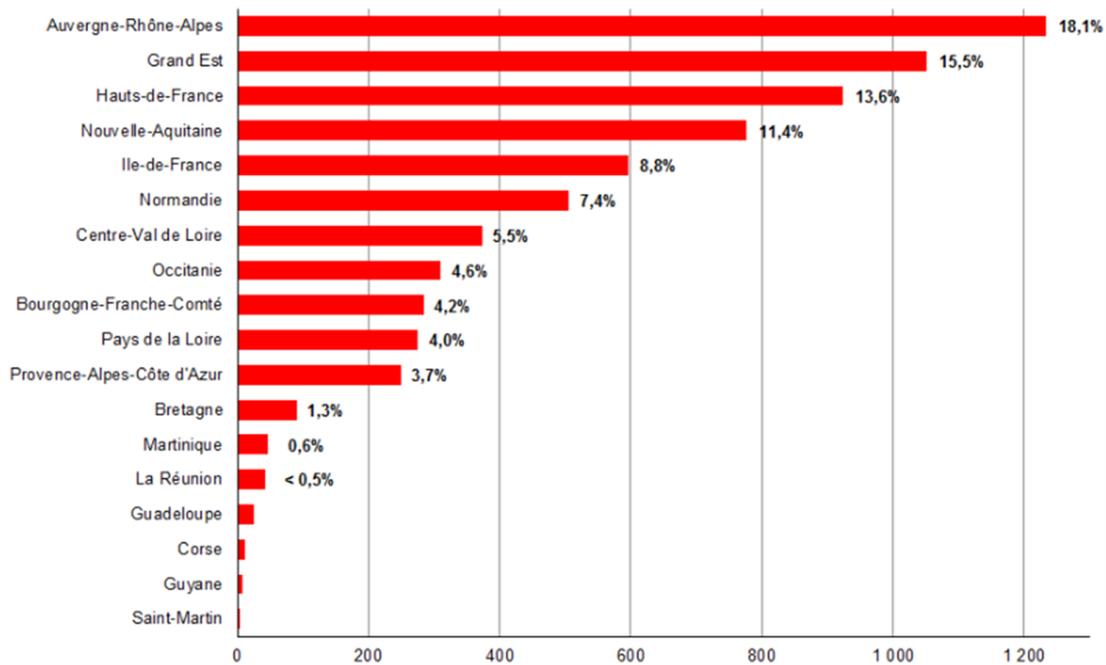


Figure 3 : Nombre de sites et sols pollués par région en 2018. Source : MTES/DGPR, Géorisques

La variété de polluants, d'effets et d'impacts témoigne de la complexité de la pollution et de la nécessité d'approches variées pour la combattre.

### Dépollution

Le dictionnaire de l'environnement (Normes 2001) définit la dépollution comme : « l'action de supprimer ou de diminuer les pollutions, principalement les pollutions industrielles, des sols, de l'eau ou de l'air. Cela peut concerner aussi bien la dépollution de sites industriels que celle de véhicules ou d'appareils produisant des pollutions ». Cette définition, bien que claire, ne met cependant pas en avant la complexité de l'action de dépollution. Les études terrain ont mis en évidence la spécificité de chaque activité de dépollution malgré les similitudes qu'il peut y avoir entre de deux projets semblables.

Par exemple, après les rejets de résidus toxiques à Abidjan en 2006, le gouvernement de Côte d'Ivoire a confié à une société la mission de nettoyer les zones touchées et de contrôler la pertinence des procédés et techniques de décontamination employés. (Adjir et al. 2018). L'efficacité de la dépollution des sites a nécessité l'étude des concentrations de contaminant obtenues suite aux analyses, puis de vérifier après l'opération de dépollution que les concentrations étaient inférieures ou égales à celle de l'échantillon témoin. En revanche, pour la pollution d'un site au Chrome, la dépollution nécessite le concept de stabilisation (Ignatiadis et al. 2005). Cette notion consiste à transformer le polluant en une espèce insoluble et non toxique. L'opération de décontamination vise alors à réduire le chromate en chrome trivalent, en utilisant un puissant agent réducteur,

et à le faire précipiter sous forme d'espèces minérales insolubles. Ces deux exemples abordent tous deux le sujet de la dépollution selon deux techniques différentes liées aux spécificités du polluant.

Ainsi, (Cappuyens 2013) évoque le « niveaux de qualité » et fait référence à des objectifs ou des standards déterminés sur la base de certains critères environnementaux. Ces critères peuvent être liés à la quantité de polluants tolérée, au niveau de la biodiversité, à la clarté de l'eau, à la pureté de l'air, etc. Par ailleurs, la qualité ou encore le niveau de dépollution est jugé acceptable ou non en fonction de la destination future du site (agricole, industriel, résidentiel, etc.). Ainsi, le commencement de la dépollution consiste à définir les objectifs de la dépollution d'un site pollué selon l'usage envisagé par son nouveau propriétaire.

Les travaux de (Pecina, Juricka, and Galiova 2021) mettent en lumière certaines des limites de la dépollution. Ces travaux suggèrent que les sites fortement pollués par des activités minières historiques ne sont pas appropriés pour la création de parcs urbains, même après la dépollution. Cela suggère que des solutions ne sont pas toujours appropriées et que la dépollution peut avoir des limites en fonction des enjeux futurs, en particulier dans les zones fortement contaminées par des activités industrielles historiques.

### **Position**

A la vue des définitions et principes ci-dessus, ces travaux définissent la dépollution comme « *un ensemble de processus graduels et itératifs impliquant, concernant et impactant éventuellement des personnes ou des groupes de personnes, visant à transformer un site pollué en un site jugé approprié et compatible avec les usages futurs et les attentes des futurs utilisateurs. Il faut pour cela satisfaire les besoins et contraintes de diverses natures exprimées par ces personnes, d'origine réglementaires, de sûreté, de sécurité, environnementales, économiques, ou encore liées aux risques sanitaires.* ». Il est indéniable que, au-delà des opérations techniques de dépollution, une évaluation continue et précise du site en cours de dépollution est essentielle. Cette évaluation ne se limite pas à surveiller l'état actuel du site mais doit également comprendre une capacité à argumenter et à évaluer le degré d'alignement des progrès réalisés avec l'état futur souhaité. Cela est essentiel pour valider les utilisations futures prévues du site (Ren et al. 2015).

Dans le reste de ce document un « *projet de dépollution* » est défini comme « *une série de processus coordonnés et planifiés visant à réduire, éliminer ou prévenir la pollution dans un environnement spécifique* ».

### **1.2.2. Pourquoi ? La nécessité cruciale de la dépollution**

La dépollution cherche en permanence à réduire ou maîtriser les risques pour la santé et l'environnement, et vise la revalorisation foncière d'un territoire.

- ***Risques pour la santé et l'environnement***

Les sites industriels abandonnés ou les friches industrielles sont particulièrement préoccupants, non seulement en raison des substances toxiques qui y ont été utilisées, produites ou stockées, mais également à cause de la contamination résiduelle provenant des équipements et des processus de production eux-mêmes, même lorsqu'ils ont été correctement gérés.

Quand ces sites ne sont pas correctement nettoyés, les substances chimiques toxiques peuvent infiltrer les sols et les eaux souterraines. Selon l'EPA (Environmental Protection Agency), plus de 70% des sites contaminés aux États-Unis affectent les nappes phréatiques qui fournissent de l'eau potable à de nombreuses communautés (Collin 2006). L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) rapporte que presque 2,2 millions de personnes meurent chaque année des suites de maladies liées à la contamination de l'eau potable par un nombre important de substances chimiques toxiques (OMS 2021).

Cette contamination peut entraîner des maladies graves chez les êtres humains, notamment des cancers, des maladies respiratoires, des troubles de la reproduction, etc. En effet, le Centre International de Recherche sur le Cancer a constaté une prévalence accrue de certains cancers, comme ceux du poumon, du sein et de la prostate, dans les zones à forte pollution industrielle (CIRC 2022).

La pollution des sols peut également avoir des conséquences graves sur la faune et la flore et nuire à la production alimentaire et à la biodiversité. L'Université de Yale a mis en évidence qu'un pourcentage important des terres cultivables dans le monde sont polluées par des métaux lourds et des produits chimiques toxiques qui ont migrés de sites industriels pollués (Dijkstra, Meeussen, and Comans 2004).

- ***Revalorisation foncière d'un territoire***

La demande immobilière dans les zones urbaines ne cesse de croître, en raison de l'augmentation de la population et de l'attractivité économique des villes. Cette forte demande a conduit à une augmentation des prix fonciers et rend la construction de nouveaux bâtiments coûteuse et difficile dans certaines zones

urbaines (Accetturo et al. 2018). Or, la sensibilisation accrue à l'environnement et à la durabilité a conduit à un changement d'attitude envers les friches industrielles. Au lieu d'être considérés comme des zones sans intérêt, ces sites sont désormais perçus au travers de l'opportunité de les réutiliser plutôt que d'envahir de nouveaux espaces naturels (Dumesnil and Claudie 2002). Les gouvernements et les entreprises sont donc confrontés à un double défi : dépolluer les sites et les rendre utilisables tout en répondant à la demande croissante de logements et de bureaux (ADEME 2023).

De plus, la dépollution de friches industrielles et de sites abandonnés peut également avoir des avantages sociaux et économiques pour les communautés locales. La réutilisation des sites industriels abandonnés peut contribuer à la revitalisation des quartiers, en créant de nouveaux espaces de vie et de travail pour les résidents locaux. Cela peut également stimuler la création d'emplois locaux, ce qui peut avoir des effets bénéfiques sur l'économie de la région (Janin and Lauren 2008).

En conclusion, la réutilisation de ces friches industrielles peut aider à répondre à la demande de logements et de bureaux tout en ayant des avantages économiques et sociaux pour les communautés locales. Cependant, il est important de veiller à ce que la dépollution des sites soit effectuée de manière appropriée afin de minimiser les risques pour la santé publique et l'environnement.

### **1.2.3. Quand ? Le timing de la dépollution**

La dépollution de sites industriels est souvent initiée pour plusieurs raisons : suite à un incident lors de l'exploitation, lors de la découverte d'une contamination ancienne, à la fin des activités d'un site, ou encore lorsque le site est envisagé pour une nouvelle utilisation ou face aux préoccupations environnementales actuelles.

En France, les installations concernées sont généralement classées comme Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) (Mondello 2009), un statut qui impose des normes strictes de gestion environnementale. En cas d'accident ou de cessation d'activité, ces installations doivent subir une dépollution rigoureuse afin de minimiser les risques environnementaux et sanitaires.

Les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement sont spécifiées et détaillées dans le Code de l'Environnement. article L.511-1 (Article L511-1 2021): « *sont soumis aux dispositions du présent titre les usines, ateliers, dépôts, chantiers et d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne*

*physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publique, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature, de l'environnement et des paysages, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments pour patrimoine archéologique ».*

Le suivi et la gestion de ces sites sont facilités par des bases de données spécifiques. Sur le site Géorisques on trouve une base de données qui recense les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués). Le nombre de sites et sols pollués présents dans cette base en 2023 est de 3 928 (Figure 4).

En outre, la Carte des Anciens Sites Industriels et Activités de Services (CASIAS) a été introduite pour conserver la mémoire des anciens sites industriels et activités de services et répond à l'obligation de l'état de publier une carte de ces sites, conformément à l'article L125-6 du code de l'environnement.

Dans tous les cas, il est crucial de commencer les travaux de dépollution dès que possible pour prévenir une éventuelle propagation des polluants et limiter les impacts sur l'environnement et la santé humaine. Cette notion d'engagement dans le temps met en évidence l'importance d'une intervention rapide et efficace face à la pollution industrielle.

Pour conclure, la question de « quand dépolluer ? » est une question à laquelle il faut répondre « tout le temps », avec un engagement sérieux et soutenu, une planification soignée et un effort commun de tous les acteurs de la société.

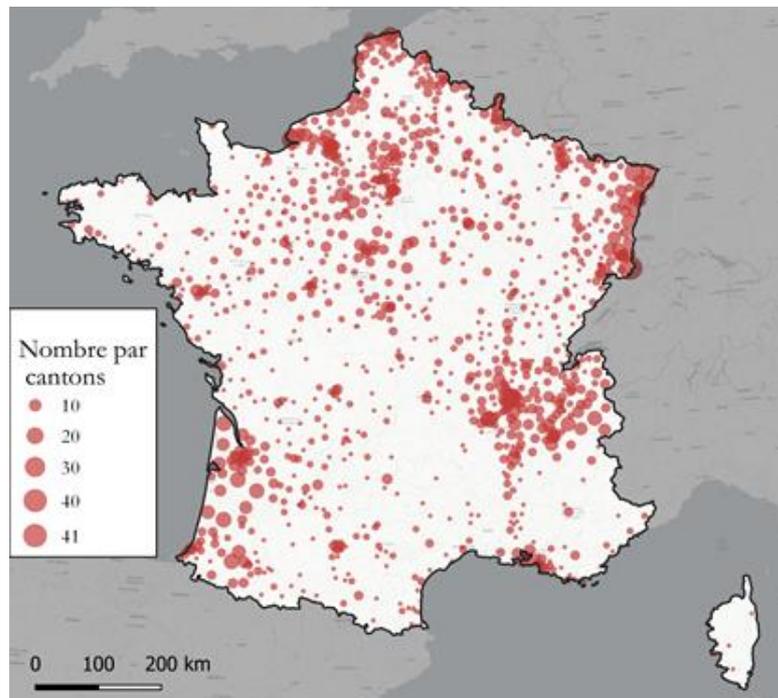


Figure 4 : Répartition Géographique des Sites et Sols Pollués en France en 2023. Source : MTES/DGPR, Géorisques

## 1.2.4. Comment ? Les méthodes et techniques expliquées

- **La méthodologie**

De nombreux pays ont mis en place des programmes spécifiques pour la gestion et la dépollution des sites contaminés.

Aux États-Unis, par exemple, l'Environmental Protection Agency (EPA) supervise le programme *Superfund*, également connu sous le nom de Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA). Ce programme a été mis en place pour dépolluer les sites fortement contaminés par des substances dangereuses. Il suit une série d'étapes pour évaluer, nettoyer et réhabiliter les sites pollués. Ces étapes comprennent une évaluation préliminaire, une inspection du site, le placement sur la National Priorities List (NPL), une évaluation des solutions possibles, la conception et la mise en œuvre d'un plan de réhabilitation, et enfin la surveillance du site pour assurer le respect des normes environnementales.

En France, le gouvernement a instauré en 2017 la « Méthodologie Nationale de Gestion des Sites et Sols Pollués ». Conçue par le ministère de la Transition Écologique et Solidaire, cette méthodologie s'inspire du processus du programme *Superfund*. Elle organise l'identification des sites potentiellement pollués, l'évaluation des risques, l'élaboration d'un plan de gestion et la mise en œuvre de mesures de réhabilitation. Basée sur le principe « pollueur-payeur », elle stipule que le responsable de la pollution doit également financer la dépollution du site concerné.

La mise en place de cette méthodologie a été progressive. Pour accompagner les acteurs dans la gestion des sites et sols pollués, le ministère a édité plusieurs guides méthodologiques (ASN 2011; SSP-InfoTerre 2017). L'objectif est de dépolluer les sites en vue de minimiser les risques pour la santé humaine et l'environnement, tout en anticipant l'utilisation future du site. Au cœur de cette méthodologie se trouve un schéma conceptuel aidant à identifier les sources de pollution, à comprendre le transfert des polluants et à définir les enjeux à protéger (Figure 5). Elle intègre également l'Interprétation de l'État des Milieux (IEM), qui vérifie la compatibilité entre l'état actuel du site et ses usages. De plus, la méthodologie inclut le Plan de Gestion (PG), structurant une stratégie de dépollution et d'adaptation des usages, nécessaire en cas de dégradation environnementale incompatibles avec les usages présents ou à venir.

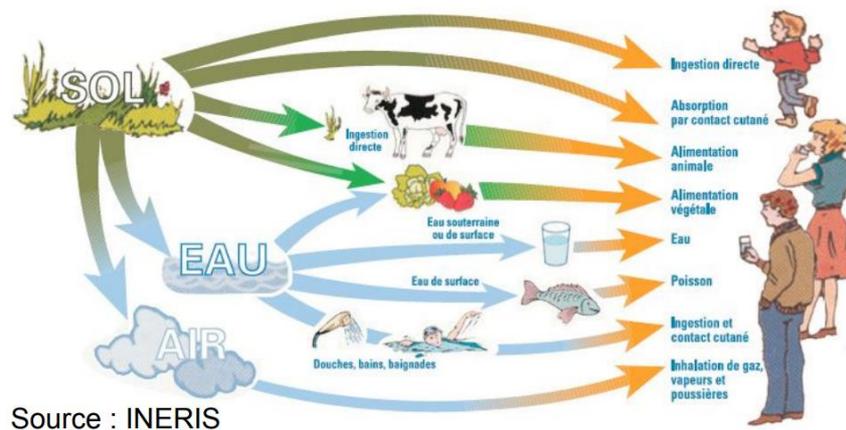


Figure 5: Le schéma conceptuel

### • **Les techniques et moyens de dépollution**

Pour dépolluer il est nécessaire de déterminer les différents objectifs qualitatifs et/ou quantitatifs (Cappuyns 2013). Pour atteindre ces objectifs, il existe une grande diversité de techniques de dépollution (Udell and all. 1995). L'enjeu, en décrivant ces techniques, est de mettre en évidence les défis auxquels sont confrontées les parties prenantes pour les utiliser et gérer la dépollution, malgré les avancées technologiques (BRGM and ADEME 2023). Selon le type de pollution, quatre approches de traitement peuvent être considérées :

#### - In situ

Dans cette situation, le sol reste en place. Les contaminants peuvent être retirés et traités en surface, dégradés directement dans le sol ou rendus inertes au sein du sol. Les eaux souterraines affectées sont le plus souvent traitées in situ.

#### - Hors site

Les résidus ou terrains pollués sont excavés puis acheminés vers une installation externe dédiée au traitement ou à la suppression (incinération, processus physico-chimique, site d'enfouissement technique).

#### - Sur site

Les terrains et/ou les eaux contaminés, une fois excavés, sont traités sur le site même grâce à des équipements adaptés. Après traitement, la terre peut être réintégrée à son emplacement initial ou retirée.

#### - Le confinement

Cette technique vise à isoler une pollution, susceptible d'impacter le sol ou l'eau, dans une région définie pour une période spécifiée. Les secteurs de

confinement peuvent être localisés à la surface ou à des profondeurs variées du terrain.

La Figure 6, ci-dessous, illustre les méthodes les plus couramment employées pour la gestion des sols contaminés tels que, l'excavation des terres (29% des sites traités), le traitement biologique (25%) et l'enfouissement de déchets dangereux dans des installations dédiées (19%) (Géorisques 2018). Les terres excavées peuvent également être réutilisées sous forme de granulats pour les travaux de génie civil, en tant qu'alternative à l'enfouissement lorsque cela est possible.

La complexité et la diversité des situations à gérer peut-être illustrée par le choix d'une technique de dépollution qui dépend des caractéristiques du terrain, de celles des polluants, et de l'usage ultérieur du sol.

### Excavation et extraction de sols pollués

L'excavation et l'extraction des sols pollués sont des approches directes largement utilisées pour la dépollution des sites industriels. Cependant, malgré leurs avantages, ces techniques peuvent présenter certaines difficultés et limitations dans certaines situations.

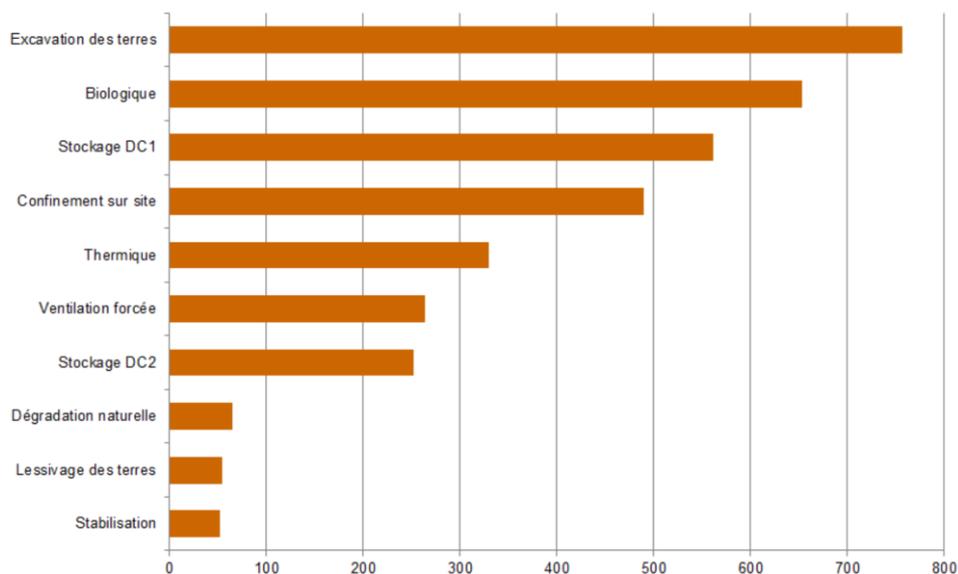


Figure 6 : Traitements des terres polluées des sites pollués. Source : MTES/DGPR, Basol

Par exemple, dans les zones urbaines densément peuplées, l'excavation peut être extrêmement complexe et coûteuse en raison des infrastructures souterraines, telles que les pipelines, les câbles électriques et les conduites d'eau, qui rendent difficile l'accès aux sols contaminés. De plus, il peut être difficile de garantir la protection des bâtiments voisins lors de l'excavation, ce qui limite l'utilisation de cette méthode dans ces conditions (Kalinovich et al. 2008).

De même, l'extraction sous vide améliorée peut être efficace pour éliminer les contaminants volatiles du sol, mais elle peut être limitée dans les cas où les contaminants se sont infiltrés en profondeur dans des formations géologiques complexes ou dans des zones où les sols sont très perméables. Dans ces situations, il peut être difficile d'atteindre une extraction complète des contaminants, ce qui nécessite l'utilisation de méthodes complémentaires ou alternatives (Lianwen Liu et al. 2018).

Il est donc essentiel d'évaluer précisément les conditions spécifiques du site et les caractéristiques des contaminants avant d'utiliser l'excavation et l'extraction de sols pollués pour garantir l'efficacité de ces techniques et minimiser les risques potentiels pour l'environnement et les populations environnantes.

### **Traitements thermiques**

Les traitements thermiques, tels que la désorption thermique et la vitrification, sont des méthodes couramment utilisées pour traiter les sols fortement contaminés. Cependant, malgré leurs avantages, ces techniques peuvent présenter des difficultés et ne sont pas adaptées à toutes les situations (Haemers and Simonnot 2018).

Prenons l'exemple de la désorption thermique. Cette méthode utilise la chaleur pour augmenter la volatilité des contaminants, facilitant ainsi leur extraction du sol. Cependant, son efficacité dépend de plusieurs facteurs, tels que la composition des contaminants, la profondeur de la contamination et la nature des sols. Dans certains cas, certains contaminants peuvent être très résistants à la désorption thermique, ce qui rend difficile leur élimination complète.

Quant à la vitrification, elle implique l'utilisation de températures extrêmement élevées pour transformer les sols contaminés en une substance vitreuse. Cela permet d'emprisonner les contaminants de manière efficace, réduisant ainsi leur mobilité et leur toxicité. Cependant, cette méthode dépend du type de sol à traiter et nécessite une grande quantité d'énergie pour atteindre les températures requises, ce qui peut rendre son utilisation coûteuse et limite son application.

En résumé, bien que les traitements thermiques offrent des avantages, leur complexité et leurs limitations doivent être prises en compte. Chaque situation de dépollution nécessite une évaluation approfondie pour déterminer si ces techniques sont appropriées ou si d'autres méthodes doivent être envisagées (Laribi and Zellagui 2010).

## **Contention et confinement des polluants**

La contention et le confinement sont des approches utilisées pour empêcher la migration des contaminants. Par exemple, le sol contaminé peut être encapsulé dans une matrice de matériaux inertes ou des barrières physiques peuvent être construites pour limiter la dispersion des contaminants.

Malgré les avantages de ces techniques, leur mise en œuvre peut être complexe voire inefficace dans certaines situations. Par exemple, dans les cas où les contaminants sont très volatiles et peuvent s'évaporer à travers les matériaux d'encapsulation, ou si le sol contaminé est situé dans une zone présentant une activité sismique ou des mouvements de terrain, entraînant l'endommagement des barrières physiques et compromettant ainsi leur efficacité.

Dans certains cas, des techniques telles que le compactage du sol sont utilisées pour en réduire la porosité, ce qui diminue la mobilité des contaminants. Cependant, cette approche peut être limitée dans des situations où le sol est très hétérogène ou contient des matériaux non compressibles.

Malgré la diversité des techniques de dépollution disponibles et les avancées technologiques dans ce domaine, choisir la bonne technique adaptée à un site donné n'est pas une tâche facile. Il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs clés pour prendre une décision éclairée. Des éléments tels que le type de sol, les infrastructures présentes sur le site, la profondeur de la nappe phréatique, la nature des contaminants et leur degré de toxicité, ainsi que les contraintes environnementales et réglementaires spécifiques doivent être soigneusement évalués. Chaque site de dépollution possède des caractéristiques uniques qui peuvent influencer le choix de la technique de dépollution la plus appropriée. Une analyse approfondie de ces facteurs est essentielle pour garantir une dépollution efficace et respectueuse de l'environnement. Les experts en dépollution doivent donc prendre en compte tous ces éléments afin de déterminer la meilleure approche qui permettra de remédier aux problèmes de pollution de manière optimale.

### **1.2.5. Qui ? les acteurs en matière de dépollution**

Les acteurs communément impliqués dans la dépollution des sites industriels sont listés dans le Tableau 1 page suivante.

Tableau 1: Identification des acteurs dans un contexte de la dépollution de sites industriels pollués en France : Source (Origo 2008)

Parties prenantes	Rôle	Action
Union Européenne	Définit la politique de l'Union Européenne en matière de respect de l'environnement	Soutenir des initiatives en vue de : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gérer durable des eaux souterraines et de surface</li> <li>▪ Réduire et prévenir les incidences environnementales des activités économiques</li> <li>▪ Réutiliser et recycler les produits</li> <li>▪ Concevoir des produits non polluants</li> </ul>
Ministères de l'Écologie, de l'Énergie et des Territoires	Définit la politique nationale en matière d'écologie et de développement durable. Fixe les orientations de la politique nationale et les moyens de son application	Plusieurs actions dont : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A titre préventif, demander un diagnostic initial d'un site</li> <li>▪ A titre curatif, imposer des travaux pour écarter tout risque pour la population et l'environnement</li> <li>▪ Financer par le biais de l'ADEME le traitement des sites orphelins</li> </ul>
Conseil régional	La région est une collectivité territoriale de plein exercice	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Promouvoir le développement économique, social, culturel, scientifique et sanitaire de la région</li> <li>▪ Aménager le territoire (intérêt des friches industrielles)</li> </ul>
Préfecture	Administration territoriale Elle a autorité sur les services déconcentrés de l'Etat dans la région ou le département	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fixer, en cas d'incompatibilité, l'usage et les prescriptions nécessaires à la réhabilitation d'un site industriel pollué</li> </ul>
Municipalité	La commune est une collectivité territoriale de plein exercice	Formuler des propositions de <i>type d'usage</i> suite aux propositions de modification de l'Art 341, qui leur confère désormais un rôle plus important,
Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)	Service régional de l'inspection des installations classées. Exerce sous tutelle commune du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du Ministère de la Cohésion des Territoires, sous tutelle du préfet	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veiller à la préservation de l'environnement</li> <li>▪ Conseiller et assister les exploitants et la préfecture</li> <li>▪ Surveiller et sanctionner le cas échéant les exploitants</li> </ul>
Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)	Etablissement public à caractère industriel et commercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Développer des méthodologies spécifiques</li> <li>▪ Informer, sensibiliser, conseiller et soutenir techniquement</li> <li>▪ Réhabiliter les sites pollués en cas de défaillances du responsable</li> </ul>
Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS)	Service déconcentré du Ministère de l'Emploi et de la Solidarité compétent en matière de santé publique et d'action sociale, placé sous l'autorité du préfet	Intervenir sur le volet sanitaire de la réhabilitation des sites industriels pollués
Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)	Etablissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rédiger des documents méthodologiques de référence pour le MEDD (calcul de valeurs seuils, participation aux guides ESR et EDR...)</li> <li>▪ Agir en qualité d'expert pour le MEDD</li> </ul>

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)	Etablissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle des Ministères chargé de la Recherche et de l'Industrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agir en qualité d'expert pour l'administration</li> <li>▪ Réaliser des études d'impacts</li> </ul>
Exploitant du site	Responsable du site et de sa réhabilitation	Conduire tout le processus de réhabilitation
Propriétaire du site	Le propriétaire peut aussi être l'exploitant du site. Lorsqu'il ne l'est pas, il dispose d'un droit de regard sur les opérations de réhabilitation, dans le but d'une valorisation future du site	Imposer éventuellement un niveau de dépollution du site en fonction de l'usage qu'il veut en faire ultérieurement, sauf en cas de compromis avec l'exploitant
Associations/ Organisations Non Gouvernementales	Organisations à but non lucratif	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lutter pour le respect et l'amélioration de la qualité de l'environnement</li> <li>▪ Demander la réalisation d'évaluation de risques ou de travaux sur un site industriel</li> </ul>
Riverains	Citoyens	Défendre leur cadre de vie

L'importance des parties prenantes dans la dépollution des sites industriels est cruciale. Comme souligné par (Nguyen, Sherif, et K. Panuwatwanich 2018), une compréhension approfondie des acteurs et de leurs stratégies d'engagement est nécessaire pour gérer la complexité environnementale des projets, surtout face à la fluctuation des politiques et réglementations. Cela est corroboré par (Alaloul et al. 2020) qui indiquent que leur engagement est essentiel pour améliorer significativement le projet. De plus, (Almahmoud et Doloï 2015) montrent qu'une satisfaction optimale de leurs besoins est liée à la performance en matière de durabilité sociale des projets. La notion de « dépollution durable » avancée par (Hou and O'Connor 2020) met en lumière le rôle central des parties prenantes. Pour elle, cette dépollution est pleinement efficace lorsque les critères réglementaires, normatifs et cognitifs sont respectés par toutes les parties impliquées. Renforçant cette idée, (Holland et al. 2011) insistent sur le dialogue continu entre elles pour optimiser l'intégration des critères de durabilité pendant la dépollution.

L'engagement de ces acteurs est donc fondamental pour assurer une dépollution efficace, durable et socialement acceptable. Cependant, la dépollution ne se limite pas seulement à l'engagement mais requière également une expertise spécifique. Les sites industriels pollués sont abordés par un prisme multidisciplinaire, nécessitant des compétences spécialisées à divers niveaux. La nature dynamique de la dépollution se reflète dans l'évolution des rôles des acteurs, des techniques, et des méthodes utilisées, particulièrement face à l'évolution des procédés industriels et des nouveaux défis de contamination.

## 1.3. PROBLEMATIQUES PERÇUES

La mise en œuvre de projets de dépollution est souvent confrontée à une série de défis et de problématiques présentés dans la suite.

### 1.3.1. Mauvais pilotage et gestion de projet : les facteurs de complexité de la dépollution

Les nombreuses activités ont des effets de bord les unes sur les autres (délais, coûts, effets de techniques employées n'autorisant plus certaines activités prévues initialement ou les retardant, etc.) Face à la majorité des projets de dépollution, une problématique persistante se dessine : la difficulté de coordonner efficacement des activités aussi diverses que la sécurisation du site, le diagnostic, la collecte et le transport d'échantillons, l'excavation du sol contaminé, le traitement, le stockage, la surveillance, et l'évaluation. Pour bon nombre de ces projets, ces activités ne sont ni bien synchronisées ni adéquatement organisées, ce qui entrave le succès et l'efficacité du projet de dépollution.

Les nombreuses parties prenantes multi disciplinaires doivent assumer des rôles et des responsabilités diverses ajoutant une couche supplémentaire de complexité à sa mise en œuvre. Par exemple, lors de la dépollution d'un site industriel, ces groupes multidisciplinaires (chimie environnementale, biologie, géologie, ingénierie environnementale...) doivent collaborer pour coordonner l'analyse du sol, l'excavation des déchets dangereux, l'installation d'équipements de traitement et la surveillance environnementale, tout en respectant les réglementations locales et en engageant un dialogue constant avec la communauté.

La variété des polluants, de leur possible migration, recombinaison ou interaction avec le sol ou d'autres polluants ou leur évolution dans le temps et l'espace peuvent avoir des effets croisés ou émergents difficiles à anticiper et donc à maîtriser. Chaque type de polluant et chaque combinaison peut ainsi nécessiter une méthode de dépollution spécifique. De fait, mettre en œuvre simultanément des techniques différentes nécessite de prendre en compte le facteur temps (délai d'application, délais avant apparition des effets réels, ...), les facteurs financiers (coûts directs et induits) et les facteurs de sécurité et de sûreté, ce qui nécessite une surveillance et une adaptation constantes.

La diversité des types de sol, de leurs interactions avec les polluants engendre des phénomènes physico-chimiques difficiles à maîtriser. Les propriétés variées des sols, comme l'argile qui retient fortement les polluants ou le sable perméable favorisant leur déplacement, influencent le comportement des

contaminants. Ces interactions peuvent altérer la toxicité des polluants, comme certains métaux lourds devenant plus mobiles, et dictent les techniques de dépollution à employer, allant de la phytoremédiation pour les sols drainés à la solidification pour les sols argileux. Cette complexité requiert une solide connaissance de la chimie du sol pour des interventions efficaces.

La diversité des emplacements géographiques des sites industriels pollués, et notamment leur proximité avec des zones résidentielles ou infrastructures clés, engendrent des défis logistiques et sécuritaires difficiles à anticiper et donc à gérer efficacement. La localisation géographique des sites industriels pollués peut influencer significativement le projet de dépollution à plusieurs égards, et affecter la complexité, le coût et la durée de la dépollution, nécessitant ainsi une planification rigoureuse et une approche adaptée en mettant en avant l'importance de la localisation géographique dans l'impact sur les investissements en technologies de dépollution (Shachmurove and Shachmurove 2009). On peut rencontrer les problèmes suivants : accessibilité du site, proximité des zones résidentielles, proximité du site avec des infrastructures vitales comme des sources d'eau potable, des voies navigables ou des zones urbaines.

En synthèse, les caractéristiques propres à chaque site, comme la nature du sol, la nature et diversité des polluants présents et de leurs interactions avec le milieu ou avec d'autres polluants sont des éléments clés qui influencent la stratégie de dépollution à adopter. De même, des facteurs externes comme l'emplacement géographique du site peuvent également avoir un impact significatif sur le processus de dépollution. Afin de mieux comprendre les raisons sous-jacentes de cette difficulté à gérer et maîtriser cette complexité, certaines causes majeures ont été identifiées et qualifiées de « verrous » : l'absence d'un modèle générique de dépollution, un déficit de communication et de coopération entre les parties prenantes, et une gouvernance inadéquate. La définition et l'analyse de ces verrous sont développées/étudiées dans le chapitre 2.

### **1.3.2. Comportements émergents**

Dans tout projet, des interactions sont nécessaires (échanges liés aux activités menées en coopération ou en collaboration) entre les acteurs impliqués dans le projet. Comme le mentionne (Le Moigne 1998), ces interactions peuvent être à l'origine de phénomènes et de comportements dits émergents car imprévisibles. Ces comportements sont le résultat de l'interaction complexe entre les différents acteurs, les « interfaces » et les facteurs environnementaux. Par « interface », on entend la connexion, le point de contact entre les différents acteurs

ou éléments d'un projet. Par « interaction », on fait référence à l'influence mutuelle que ces éléments exercent les uns sur les autres. Ces comportements émergents ne peuvent pas être prédits ou contrôlés en raison de leur nature complexe et multifactorielle. Par exemple, les polluants eux-mêmes peuvent présenter des comportements émergents : leur migration, leur interaction avec d'autres substances ou leur transformation peuvent modifier leur nature et leur comportement, ajoutant une autre dimension d'incertitude à la dépollution. Ces phénomènes peuvent perturber le processus de dépollution et complexifier la gestion du projet, en posant des défis tels que des conditions météorologiques imprévues, des événements sociaux ou politiques, des interférences avec les activités industrielles ou des changements dans la réglementation environnementale (Guelton 2002).

Par exemple, une entreprise qui a participé à un projet de dépollution d'un site industriel peut faire faillite et transférer la responsabilité de ses missions à une autre entreprise, ce qui peut perturber le déroulement du projet de dépollution. De même, des mouvements sociaux, des manifestations ou des pressions politiques peuvent affecter le financement ou le calendrier d'un projet de dépollution (ADEME 2020).

La complexité des comportements émergents souligne l'importance d'une gestion de projet proactive, agile et adaptable. Les gestionnaires de projets de dépollution doivent être en mesure de surveiller les développements externes et de s'adapter aux changements imprévus. Ils doivent également être prêts à collaborer avec une grande variété d'acteurs et à anticiper les risques potentiels. La mauvaise gestion des comportements émergents est due à plusieurs verrous, tels que la planification inadéquate, l'absence d'outils interopérables, le manque de méthodologie en gestion d'exigences et des lacunes en matière de communication et coopération entre les parties prenantes. Ces obstacles seront approfondis dans le chapitre 2.

### **1.3.3. Coût élevé**

La diversité des coûts, de leurs possibles interactions avec d'autres facteurs financiers entraînant des dépenses croisées ou imprévues difficiles à prévoir et donc à contrôler. La dépollution de ces sites est un processus long et coûteux. Selon une mise à jour des coûts communiquée par l'UPDS (l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sols) en septembre 2019, pour la technique de dépollution « *Landfarming* » par exemple, les estimations suggèrent un coût moyen minimal de 13 €/t, un coût moyen maximal de 25 €/t, et un coût maximal

absolu de 35 €/t pour le traitement des sols après excavation (BRGM 2023) .Il convient de noter que ces montants excluent les coûts liés à l'excavation elle-même, le tri des terres avant traitement, le transport interne et la consommation d'électricité. Comme l'indique la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, l'évaluation du coût de dépollution d'un site industriel englobe plusieurs dépenses majeures : conception, construction, maintenance, exploitation, contrôle et repli. Ces postes couvrent depuis les études initiales jusqu'à la réhabilitation post-dépollution du site.

La complexité de la dépollution réside dans la multiplicité des dimensions à considérer simultanément pour minimiser les coûts. Se concentrer sur un seul aspect peut négliger d'autres éléments essentiels, rendant ainsi la dépollution onéreuse. La véritable difficulté est d'optimiser l'ensemble des coûts, car il s'agit d'agir sur plusieurs fronts à la fois. Cela rend la minimisation des coûts à la fois cruciale et délicate.

Le coût de dépollution varie considérablement en fonction de la technique utilisée, comme illustré dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et dans la Figure 8.

Par exemple, le coût moyen du stockage des déchets inertes est de 35 €/t, tandis que l'incinération in situ peut atteindre jusqu'à 800 €/t ("Comparaison Des Techniques Par COÛTS" 2009).

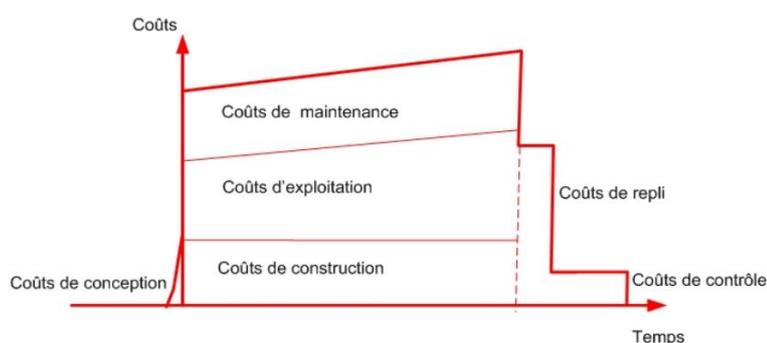


Figure 7: Coût global d'une opération de traitement. Source : BRGM

Une analyse coûts-avantages (BCA)(ADEME 2016) est indispensable pour orienter la réflexion des parties prenantes. Cette analyse vise à évaluer l'ensemble des options disponibles pour la gestion d'un site pollué, prenant en compte à la fois les coûts financiers et les avantages environnementaux. En procédant à une telle évaluation, on peut garantir que la solution choisie est la plus bénéfique pour toutes les parties concernées et pour l'environnement. La dépollution et la réhabilitation de ces sites requièrent des investissements importants en matière de

technologies, de ressources humaines et d'expertise, ce qui peut représenter un frein pour les acteurs publics et privés impliqués (ADEME 2014).

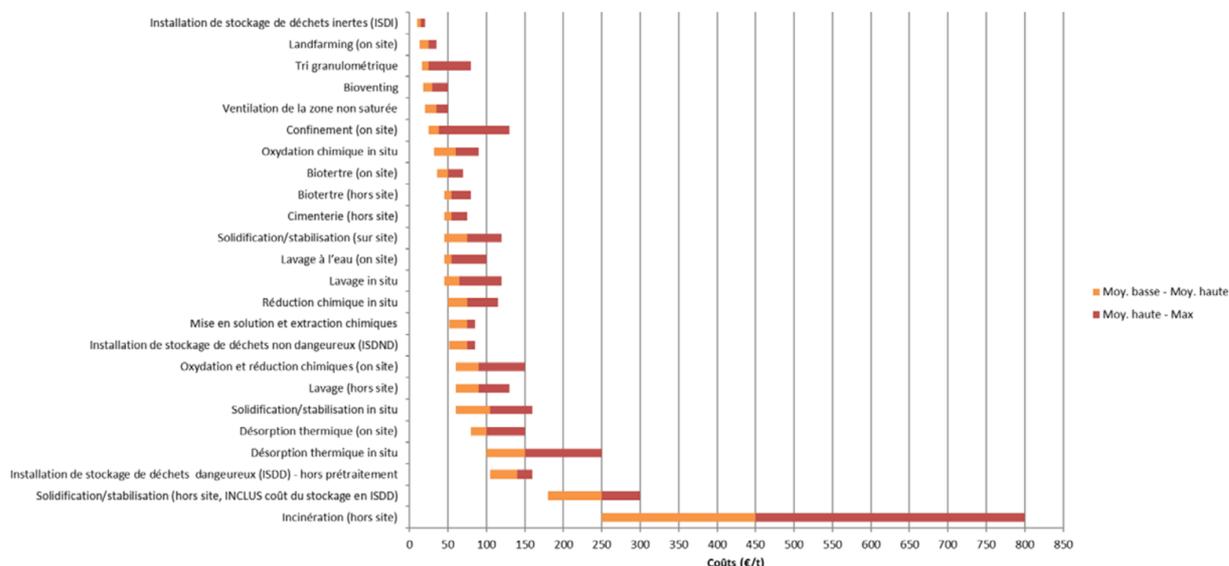


Figure 8 : Comparaison des coûts (Moy. basse - Moy. haute et Moy. haute - Max) pour différentes techniques en euros/tonne de sol traité. Source selectdepol.fr

Le coût élevé des projets de dépollution peut découler de multiples verrous tels que : la difficulté d'optimisation des coûts, une gouvernance inadaptée, une planification inadéquate et une gestion défailante des imprévus, un déficit de communication et de collaboration entre les acteurs concernés, ainsi qu'une ambiguïté sémantique et ontologique. Ces défis seront détaillés dans le chapitre 2.

### 1.3.4. Long délais

L'expérience a montré que les projets de dépollution sont généralement de longue haleine, caractérisés par des délais importants et fréquemment sujet à des retards considérables. Par exemple, la *phytodégradation*, qui est le processus par lequel les plantes absorbent et décomposent les polluants, peut prendre de 2 à 20 ans. Ce laps de temps est nécessaire pour permettre aux plantes d'absorber, de métaboliser et de dégrader les polluants, un processus qui est également influencé par des facteurs tels que le type de polluant, les caractéristiques du sol et les conditions météorologiques. Un autre exemple, le *bioventing*, qui implique l'utilisation de micro-organismes pour dégrader les polluants organiques dans le sol et les eaux souterraines, nécessite des périodes de traitement allant de 6 mois à 5 ans. Ces durées varient en fonction de la nature et de la concentration du polluant, des conditions du sol, ainsi que des caractéristiques et du nombre de micro-organismes utilisés. En outre, des contraintes réglementaires, des défis financiers et logistiques,

ainsi que des problèmes environnementaux imprévus peuvent retarder ces processus.

### **1.3.5. Insatisfaction des exigences des parties prenantes**

La diversité des exigences et leur possibles interrelations avec d'autres demandes des parties prenantes entraînent des attentes croisées ou imprévues difficiles à satisfaire et donc à harmoniser. Avant que le projet de dépollution ne soit mis en place, sa compréhension et son adéquation avec les exigences de tous les acteurs impliqués doit aussi être vu comme un défi majeur. La dépollution industrielle est un domaine hautement régulé et complexe, nécessitant une conformité rigoureuse à un ensemble diversifié d'exigences. Ces dernières peuvent provenir de diverses sources, les autorités de régulation, les fournisseurs de technologies de dépollution, et même les entreprises participant aux projets de dépollution.

Il est important de noter que ces réglementations évoluent constamment, et que les entreprises doivent donc faire preuve d'une vigilance constante pour s'assurer qu'elles restent en conformité avec les nouvelles lois et règles. Cela peut impliquer des investissements importants dans des technologies plus propres, la formation du personnel à des pratiques respectueuses de l'environnement, et la mise en place de systèmes de gestion environnementale pour suivre et contrôler leur impact sur l'environnement.

Cependant, il ne faut pas oublier que les fournisseurs de technologies et les entreprises impliquées dans le projet ont aussi leurs propres exigences. Par exemple, un fournisseur de technologie de dépollution peut avoir des directives spécifiques sur l'application de sa technologie pour garantir son efficacité. Dans le même temps, les entreprises participant au projet peuvent avoir des exigences opérationnelles et fonctionnelles spécifiques, telles que des limites de temps pour la réalisation du projet ou des objectifs de coût à respecter.

Respecter les exigences diverses et satisfaire tous les acteurs dans les projets de dépollution représentent un défi majeur. Non seulement cela nécessite une compréhension approfondie des réglementations, des spécificités de chaque site et des technologies de dépollution, mais cela nécessite également une coordination et une communication efficaces entre toutes les parties prenantes pour garantir le respect de toutes les exigences et la satisfaction de tous les acteurs. L'insatisfaction est principalement enracinée dans divers verrous : l'absence d'une gestion structurée des exigences, le défaut d'indicateurs partagés parmi les parties

prenantes, une communication et coopération défailtantes entre elles, ainsi que le manque d'outils interopérables.

La diversité des intérêts des parties prenantes, et leurs potentiels alignements contradictoires, engendrent des tensions et des conflits d'intérêts difficiles à résoudre et à concilier. La prise de décision et la gouvernance dans les projets de dépollution peuvent s'avérer extrêmement difficiles, notamment en raison des conflits d'intérêts qui peuvent surgir entre les différentes parties prenantes. Chaque acteur, qu'il s'agisse des autorités réglementaires, des entreprises de dépollution, des communautés locales ou des groupes environnementaux, possède ses propres objectifs et priorités, qui peuvent parfois être en contradiction les uns avec les autres. Par exemple, un ingénieur peut vouloir utiliser une technologie de dépollution spécifique qui est innovante et efficace, mais qui est également coûteuse. Cependant, le gestionnaire du projet peut préférer une approche plus économique, même si elle est moins efficace ou si elle prend plus de temps, afin de respecter le budget du projet. Par ailleurs, la communauté locale peut avoir des préoccupations environnementales ou sanitaires liées à l'approche proposée par l'ingénieur. Ces conflits d'intérêts rendent la prise de décision et la gouvernance de ces projets complexes, nécessitant un processus de prise de décision inclusif, transparent et bien géré, capable de concilier les diverses perspectives et d'obtenir le soutien de toutes les parties prenantes.

Les principaux verrous à la résolution des conflits d'intérêts sont la mauvaise gouvernance, l'ambiguïté sémantique et ontologique, ainsi que l'absence d'indicateurs communs entre les parties prenantes. Ces verrous seront développés en détail dans le chapitre 2.

### **1.3.6. Mauvaise gestion des Données, Informations et Connaissances (DIC)**

La complexité de la gestion des Données, Informations et Connaissances (DIC) (El Alaoui et al. 2023), avec ses interactions potentielles et ses ramifications imprévues, rendent sa maîtrise ardue et délicate dans un projet de dépollution. Cette gestion fait appel à un processus qui englobe la collecte de données brutes, leur transformation en informations utiles et la création de connaissances à partir de ces informations. Cela nécessite une attention particulière à l'exactitude, la pertinence et l'accessibilité des données pour assurer leur utilité. Parallèlement, l'approche des « 5V » - Volume, Vitesse, Variété, Vérité et Valeur - sert de cadre pour comprendre et naviguer dans le paysage complexe des Big Data.

Chaque opération de dépollution des sites industriels engage en effet plusieurs acteurs, chacun ayant ses propres objectifs, savoirs, savoir-faire et besoins en termes de DIC. Celles-ci résultent et influencent à la fois la planification, l'exécution et le suivi des projets de dépollution avec des besoins essentiels de formalisation et de traçabilité, de partage et de sécurité encore peu pris en compte.

Prenons par exemple le cas où une entreprise de dépollution doit gérer des informations relatives à la contamination d'un site. Ces informations pourraient se présenter sous forme de données scientifiques complexes, de rapports d'expertise variés et de documents de conformité réglementaire, tous avec différents formats, qualités et disponibilités. Dans certains cas, ces informations pourraient être dispersées dans une multitude de documents s'étalant sur plusieurs années, rendant leur gestion encore plus compliquée.

La difficulté réside alors dans le fait de réunir toutes ces DIC de manière cohérente, d'en assurer la qualité et la validité, et de les rendre facilement accessibles à toutes les parties prenantes concernées. Par exemple, des informations erronées ou mal interprétées sur la nature des polluants sur un site pourraient conduire à des techniques de dépollution inefficaces, tandis que l'inaccessibilité des données pourrait retarder le projet et augmenter les coûts.

De plus, la recherche constante d'amélioration de la performance des opérations de dépollution permet de réduire les coûts et les délais, et de mieux maîtriser les risques. Cela implique une analyse approfondie et un ajustement constant des méthodes de gestion des DIC, soulignant l'importance cruciale de ces éléments dans les efforts de dépollution des sites industriels. Les verrous majeurs entravant la gestion adéquate du DIC dans un projet de dépollution sont : l'absence de traçabilité du DIC, le défaut de spécifications formelles des métadonnées, la fiabilité insuffisante des données et le manque de modèle générique pour la dépollution. Ces verrous seront détaillés dans le chapitre 2.

### **1.3.7. Synthèse : des défis de la dépollution à la formulation de verrous globaux de recherche**

Les verrous doivent ici être interprétés comme les causes potentielles des problématiques vues ci-dessus. Ils sont d'origines, d'effets, de type et de nature hétérogènes. Durant ce travail, la démarche de recherche adoptée est basée sur cette notion de verrous : des causes plus ou moins importantes, persistantes et qu'il faut étudier et lever pour aller vers une contribution répondant si possible à toutes ces problématiques, ou tout au moins contribuant à les surmonter. Le Tableau 2 synthétise les verrous identifiés.

Tableau 2: Synthèse des verrous classifiés par type

Type de verrous	Description
Verrous Conceptuels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence d'un modèle générique collaboratif facilement déployable et permettant la transition vers des approches plus adaptées selon le domaine, les parties prenantes, etc.</li> <li>• Absence d'un modèle de données pour la dépollution des sites industriels signifiant qu'il n'existe pas de structure formelle ou de schéma prédéfini pour organiser et interpréter les informations liées à la dépollution de ces sites.</li> <li>• Absence de vocabulaire commun face à la multiplicité des métiers dans le domaine de dépollution et travail en silo qui reste privilégié.</li> <li>• Difficulté de communication et coopération entre les parties prenantes.</li> <li>• Absence d'indicateurs partagés entre les parties prenantes. Sans indicateurs communs, chaque partie prenante peut avoir sa propre interprétation de l'efficacité de la dépollution, rendant difficile la coordination des efforts et l'évaluation objective du succès du projet.</li> </ul>
Verrous Méthodologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise planification et gestion insuffisante des imprévus pouvant entraîner des retards, des surcoûts et des inefficacités dans les projets de dépollution, compromettant ainsi leur succès et leur efficacité globale.</li> <li>• Absence de traçabilité des Données, Informations et Connaissances (DIC) pouvant entraver le partage d'informations pertinentes et la prise de décision éclairée dans les projets de dépollution.</li> <li>• Insuffisance dans la préparation et la réponse aux événements inattendus pouvant survenir lors d'un projet de dépollution, que ce soit une variation inattendue des conditions environnementales, un changement dans la nature des polluants à traiter, ou une interruption des opérations en raison de problèmes logistiques ou techniques.</li> </ul>
Verrous Organisationnels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allocation inefficace des ressources et supervision insuffisante du projet.</li> <li>• Manque de coordination entre les différents acteurs impliqués (gouvernement, entreprises, communautés locales, etc.)</li> <li>• Difficultés dans l'obtention des autorisations nécessaires.</li> <li>• Manque de transparence et de communication entre les parties prenantes.</li> </ul>

Verrous Financiers	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Opportunité de minimiser les coûts à travers des stratégies d'optimisation pas pleinement exploitée.</li> </ul>
Verrous Sécuritaire et environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque de connaissances ou de compétences pour réaliser le projet de dépollution.</li> <li>• Résistance de la communauté locale ou des employés à la mise en œuvre du projet.</li> <li>• Santé et sécurité des travailleurs impliqués dans le processus de dépollution.</li> <li>• Absence de formation ou de sensibilisation aux problèmes de pollution et à l'importance de la dépollution.</li> </ul>
Verrous Techniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence ou limitations fortes des environnements de travail (outillés) structurés pour encourager le travail collaboratif des parties prenantes.</li> <li>• Problèmes d'interopérabilité (types de fichiers, instruments, etc.)</li> <li>• Gestion inadéquate du référentiel de données.</li> </ul>

Les différentes problématiques identifiées dans ce chapitre découlent chacune de l'influence d'un ou de plusieurs verrous. Elles sont synthétisées dans le Tableau 3.

*Tableau 3: Tableau récapitulatif des problématiques identifiées associées aux verrous*

Verrous / Problèmes	Mauvais pilotage et gestion de projet complexe	Mauvaise gestion des DIC	Comportements émergents	Insatisfaction des parties prenantes	Coût élevé	Long délai, retard
Manque de modèle générique pour la dépollution	X			X	X	
Absence de spécification formelle des métadonnées		X				X
Manque de communication et coopération entre les parties prenantes	X		X	X	X	X
Mauvaise gouvernance	X		X		X	X
Ambiguïté sémantique et ontologique	X			X	X	X
Insuffisance de fiabilité des données	X	X		X		X
Manque d'outils interopérables	X	X			X	X
Absence d'indicateur partagé entre les parties prenantes				X		X
Mauvaise planification et gestion des imprévus	X		X		X	X

Absence de traçabilité des DIC		X				X
Absence de notion de gestion d'exigence	X		X	X	X	X
Difficulté à optimiser pleinement la réduction des coûts					X	X

## 1.4. CONCLUSION ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre a pour objectif de présenter une vision exhaustive du contexte de la dépollution opérationnelle des sites industriels dévoilant une réalité complexe entrelacée d'enjeux de divers ordres tels que législatifs, réglementaires, sociologiques ou économiques, entre autres. Cette complexité ne peut être maîtrisée ou a minima comprise par la seule juxtaposition de solutions, de techniques, de savoir-faire ou encore de moyens qui, chacun, adressent/répondent souvent un aspect particulier du problème.

Sept grandes problématiques ont été mises en avant. Chacune d'elles souligne une dimension particulière du défi global que représente la dépollution des sites industriels. Ces problématiques vont du manque d'un cadre de référence général pour la dépollution à des problèmes plus spécifiques liés à la gestion des informations et du risque d'émergence de comportements non prévus.

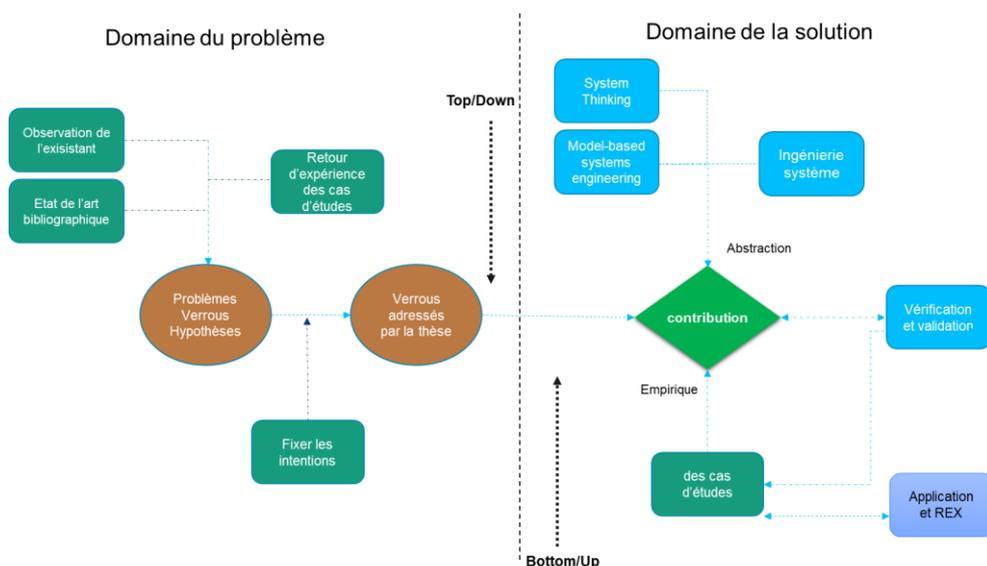


Figure 9 : Démarche employée pour orienter le travail de thèse vers les contributions

Des verrous ont de fait été identifiés et vont désormais guider la méthodologie de recherche décrite dans le chapitre suivant. La Figure 9 présente la méthodologie de recherche adoptée durant ces travaux, unissant les approches descendante et ascendante (Sauquet 2014). L'approche descendante est fondée sur l'établissement d'un cadre théorique, puis sa mise en œuvre pas à pas pour converger vers le niveau opérationnel. À l'inverse, l'approche ascendante privilégie l'examen de projets tangibles pour en extraire et en conceptualiser le contenu. En associant ces deux approches, nous obtenons une compréhension nuancée et plus complète du sujet. Cette combinaison facilite l'identification des divergences entre la théorie et la pratique, tout en mettant en lumière les opportunités d'amélioration non exclusivement liées d'ailleurs à la dépollution des sites industriels. En tenant compte des éléments de détail et du contexte global, cette méthodologie de recherche assure un équilibre entre les spécificités opérationnelles et l'appréhension théorique du sujet.



## **2. ETAT DE L'ART**

## **2.1. INTRODUCTION**

Ce chapitre présente l'état de l'art dans le but de réaliser analyse critique et constructive des travaux relatifs aux verrous identifiés dans le chapitre 1. Ces verrous entravent la progression des projets de dépollution, mais ils peuvent déjà avoir été partiellement ou totalement surmontés grâce aux recherches existantes.

Les questions de recherche qui sous-tendent ces travaux peuvent être formulées comme suit :

**Comment pouvons-nous apporter une aide, une structure, une orientation et un soutien aux parties prenantes impliquées dans la conception et la réalisation de projets de dépollution complexes ?**

**Comment pouvons-nous aider ces mêmes parties prenantes à s'organiser et à converger vers une plus grande reproductibilité, qu'elle soit totale ou partielle, de ces projets ?**

Cet état de l'art vise à fournir un panorama des travaux, des études et des résultats qui pourraient être utilisés ou servir d'inspiration pour répondre à ces deux questions. Il permet ensuite de justifier et de sélectionner certains des verrous identifiés. Ces verrous constitueront alors le cœur des contributions présentées dans la suite de ce manuscrit.

## **2.2. VERROUS CONCEPTUELS**

### **2.2.1. Manque de modèle générique pour la dépollution**

Ce verrou introduit/s'inscrit dans le contexte global des défis de la dépollution industrielle et souligne/introduit la nécessité d'avoir un modèle unifié ou standard pour gérer les projets de dépollution. En effet, la détermination de l'état final d'un site pollué est une tâche/mission délicate qui demande la prise en compte de multiples actions. La nature intrinsèquement complexe et multidisciplinaire conduit aujourd'hui à dépendre fortement de modèles pour la formalisation et l'analyse. Ces modèles aident à anticiper, prévoir et diriger efficacement un projet et dans ce contexte, deux défis majeurs, détaillés ci-après, apparaissent.

Premièrement, malgré les efforts substantiels pour capitaliser et valoriser les expériences précédentes de dépollution, et malgré l'existence de références telles

que le référentiel méthodologique national de gestion des sites et sols pollués (Ministre de l'environnement 2017) ou la norme NF X 31-620 (Afnor 2021), qui offrent des outils d'aide à la décision conformément à la réglementation en vigueur, il est difficile d'appliquer une solution générale à tous les projets de dépollution. La dépollution est abordée au cas par cas, et les modèles élaborés sont spécifiques à chaque situation, sans être génériques.

Deuxièmement, les modèles existants de dépollution fonctionnent de manière isolée et manquent d'interopérabilité lorsqu'ils sont mis en œuvre, que ce soit au niveau syntaxique, sémantique ou pragmatique. Cela rend difficile leur intégration pour former un modèle plus complet et fidèle (L. Liu 2005). On entend par fidèle un modèle qui serait capable de reproduire de manière précise et exhaustive la réalité de la situation de dépollution. Un modèle fidèle permettrait donc de mieux anticiper les résultats des actions de dépollution, de prendre des décisions plus éclairées et de mieux gérer les éventuels risques et défis associés à chaque projet de dépollution (Torlapati et al. 2012). Même s'il y a des outils pour administrer ces modèles, il n'y a pas encore de procédure ou d'outil uniformisé pour gérer de façon autonome les interfaces, les connexions et les restrictions parmi tous les modèles élaborés durant la planification et la réalisation des projets de décontamination (He, Huang, and Lu 2010). Les modèles sont actuellement réalisés sur différents supports (documents, outils informatiques peu interopérables, etc.) qui peuvent rendre difficile la compréhension lors de modifications de modèles individuels. C'est pourtant crucial pour faciliter la prise de décision et le suivi des projets (Qiu et al. 2012).

### **2.2.2. Absence de spécification formelle des métadonnées**

Étant donné la diversité d'usages futurs entre les différents sites industriels pollués, et compte tenu du fait que la majorité de ces sites, ont connu de longues périodes d'activité, chaque projet de dépollution est unique. Cette singularité est observable sur plusieurs fronts : les matières utilisées sur le site, sa typologie, sa taille, les entités d'exploitation et d'autorité de supervision, l'historique des modifications et des incidents, le type de polluants, entre autres. Pourtant, il n'existe actuellement aucun modèle standard qui décrit précisément la dépollution, ni même qui spécifie les données (comprennent les modifications apportées, les procédés mis en œuvre et l'historique des incidents) essentielles à recueillir pour chaque projet de dépollution.

Dans le contexte de la dépollution des sites industriels, il est important de mentionner les cas où un effet de reproductibilité pourrait être exploité. Ce pourrait être le cas pour des domaines d'activité spécifique, telles que les usines chimiques, par exemple (Vreeken et al. 1992). Une installation chimique suit généralement un processus opérationnel constant tout au long de sa vie opérationnelle, et les déviations possibles par rapport à cette norme sont habituellement identifiées, facilitant ainsi leur suivi. Cependant, la capacité à gérer une séquence consécutive dans les initiatives de décontamination n'est pas encore clairement définie, que ce soit en France ou sur la scène mondiale (Defregger 1995).

Il est néanmoins important de mettre en avant le manque de modèle de données spécifiquement pour la décontamination des zones industrielles. En effet, en surmontant ce défi, on pourrait réduire les problématiques liées au Big Data, étant donné les vastes référentiels associés à un site nécessitant une dépollution. Cela faciliterait la tâche de trier et de choisir les données, informations et savoir-faire essentiels selon les exigences (Steffi et al. 2022) et (Clark et al. 2007).

Les différents intervenants utilisant ces modèles ont des objectifs et des besoins variés concernant les détails et les informations à afficher, ce qui complique la mutualisation de ces modèles. Par exemple, un démolisseur utilise des détails géométriques précis, tandis qu'un responsable de dépollution se concentre davantage sur les métadonnées. Il est crucial d'ajuster les données du modèle selon l'utilisateur. Cette spécification est liée aux défis techniques de l'interopérabilité des outils et à la méthodologie de création des référentiels.

### **2.2.3. Difficulté de communication et coopération entre les parties prenantes**

La communication et la coopération entre les différentes parties prenantes dans un projet de dépollution peuvent s'avérer complexes et difficiles à réaliser. Cette complexité provient de la diversité des acteurs impliqués, chacun ayant ses propres intérêts, priorités et perspectives. Ces différences peuvent créer des obstacles à la communication et à la coopération efficaces. De plus, le langage technique utilisé dans ces projets peut être un autre obstacle, car tous les acteurs n'ont pas forcément la même compréhension des enjeux techniques. Enfin, la nature potentiellement conflictuelle des projets de dépollution avec des enjeux tels que la santé publique, l'impact environnemental et les coûts économiques peut également compliquer la communication et la coopération.

Pour faire face à ce verrou, il y a eu de nombreuses propositions comme (Oen et al. 2010) l'ont suggéré dans leurs travaux préliminaires. Ils ont proposé

d'inclure les personnes qui détiennent des informations importantes de gestion et une connaissance locale, même si elles n'ont pas beaucoup d'influence dans le processus décisionnel. Ce point souligne la nécessité d'une approche inclusive qui valorise toutes les contributions afin d'améliorer la communication et la coopération entre les différentes parties prenantes. Ils soulignent également l'importance d'engager et de motiver toutes les parties prenantes à participer dès les premiers stades de la planification de la dépollution. Cela peut aider à forger un consensus, à identifier et à résoudre les problèmes en amont, et à assurer que toutes les perspectives sont prises en compte.

Imdieke ajoute une autre dimension à cette discussion en soulignant que la nature, l'étendue et le calendrier d'une stratégie de dépollution peuvent influencer son succès (Imdieke 2022). Par conséquent, impliquer les parties prenantes dans la formulation de ces aspects peut réduire la probabilité d'une mauvaise communication ou collaboration.

Le verrou de la communication et de la coopération entre les parties prenantes est un obstacle majeur dans la gestion de projet de dépollution. Cette difficulté peut créer des retards, augmenter les coûts, et nuire à l'interaction et à la cohésion de l'équipe. En surmontant ce verrou, on peut améliorer l'efficacité du projet de dépollution, réduire les retards et les dépassements de coûts, et favoriser une meilleure collaboration et une plus grande satisfaction parmi toutes les parties prenantes.

#### **2.2.4. Ambiguïté sémantique et ontologique**

La dépollution est un secteur dynamique. En conséquence, les approches employées sont constamment mises à jour, et il en va de même pour le vocabulaire et les concepts qui définissent ce domaine. Le langage utilisé est en perpétuelle transformation, et les termes peuvent souvent sembler similaires ou se chevaucher dans leur signification. Bien qu'il existe des dictionnaires environnementaux qui fournissent des définitions pour les termes utilisés dans un projet de dépollution, la nature multidisciplinaire de ces projets peut parfois mener à des complications en termes de compréhension.

Pour illustrer cela, considérons le mot « contamination ». Pour un biologiste travaillant sur un projet de dépollution, « contamination » pourrait faire référence au développement de micro-organismes indésirables qui pourraient affecter les processus de bioremédiation. Cela pourrait inclure des bactéries ou des virus qui pourraient interférer avec les micro-organismes bénéfiques utilisés pour dégrader les polluants.

Cependant, pour un chimiste impliqué dans le même projet, « contamination » pourrait se référer à la présence de polluants chimiques dans le sol ou l'eau. Cela pourrait inclure une grande variété de substances, comme les métaux lourds, les Composés Organiques Volatils (COV), les hydrocarbures, etc.

Ainsi, bien que le mot « contamination » soit utilisé dans les deux domaines, son sens précis et son contexte d'utilisation peuvent varier considérablement en fonction de l'expertise professionnelle (Shah and Achlesh Daverey 2020).

Ce challenge ne concerne pas uniquement la communication entre les acteurs impliqués, car ces termes figurent dans les documents formels. Si la progression de ces termes lors de projets étendus n'est pas adéquatement tracée, des soucis d'interprétation peuvent survenir. À titre d'exemple, considérons la nomination des équipements de dépollution. Dans certains documents techniques, les équipements pourraient être mentionnés sous des noms commerciaux ou des sigles qui ne sont plus utilisés à ce jour. Par exemple, un système de « bioventing », anglicisme désormais peu utilisé, pourrait être maintenant désigné par une expression plus actuelle, tel que « système de ventilation biochimique ». Bien que les documents techniques ne soient pas automatiquement mis à jour pour refléter ces changements, et que la mise à jour manuelle de ces documents ne laisse pas de traces de modifications, il est essentiel d'avoir un suivi de ces évolutions pour éviter toute confusion ou malentendu (Wolfe and Delecki 2004).

Au-delà de son évolution constante, il faut noter que la terminologie utilisée n'est pas toujours identique entre les différentes parties prenantes impliquées dans des projets de dépollution. Par exemple, une entreprise spécialisée pourrait se référer à l'ensemble du processus comme « remédiation environnementale » tandis qu'un organisme gouvernemental pourrait utiliser le terme « gestion des sites contaminés ».

L'ambiguïté peut également surgir lors de la définition des étapes précises du processus de dépollution. La caractérisation du site (évaluation initiale de la contamination) pourrait être perçue différemment par différents acteurs, en fonction de leur perspective et de leur rôle dans le projet. Il est donc crucial de définir clairement les objectifs finaux de chaque terme employé, afin que tous les intervenants puissent comprendre et respecter les limites de chaque activité, minimisant ainsi le risque d'interprétation erronée (Priya et al. 2023).

En outre, la traduction de ces termes d'une langue à l'autre peut s'avérer délicate, en particulier lorsque des différences réglementaires existent entre les pays (considérons par exemple le cas de la classification des déchets, qui varie d'un pays à l'autre).

Malgré ces défis, il n'existe pas encore d'ontologie officielle et partagée pour le domaine de la dépollution. Toutefois, certains travaux de recherche (Samah, Florence, and Bernard 2016), ont abordé cette question et tenté d'y apporter des solutions. Ces études ont notamment mis l'accent sur l'importance de la gestion des données, informations et connaissances pour faciliter la gouvernance dans le domaine de la dépollution.

### **2.2.5. Absence d'indicateurs partagés entre les parties prenantes**

Évaluer l'efficacité d'un projet de dépollution à l'aide d'un indicateur partagé de performance est une tâche complexe, étant donné le nombre de facteurs qui peuvent influencer cet indicateur. Dans la littérature existante, on retrouve des indicateurs de risque ou de performance, mais ces indicateurs n'intègrent pas tous les facteurs pertinents.

Il est évident que la dépollution, avec sa diversité de projets, ne se prête pas toujours à une approche uniforme. Il est donc crucial de définir explicitement un indicateur partagé entre les parties prenantes, facilitant ainsi l'évaluation de la performance et évitant toute confusion parmi les intervenants (Battisti, Poeta, and Romiti 2020). La détermination des critères qui serviront à mesurer la performance des opérations de dépollution est loin d'être simple et notamment la création d'une fonction objective mathématique qui identifierait les éléments essentiels pour juger l'efficacité de ces opérations. Pareillement, il est tout aussi complexe de formuler une fonction objective mathématique pour évaluer la gestion de la dépollution et l'organiser entre les différentes parties prenantes (Hula and Rebecca Bromley-Trujillo 2010), (Bacot and Cindy O'Dell 2006).

Tendre vers un indicateur partagé est complexe, en particulier à cause des variations dans l'effet de chaque pollution, les changements continus dans les critères d'appréciation de l'impact de la pollution, et les progrès en recherche concernant les méthodes d'élimination et les innovations technologiques de dépollution. Cette dynamique rend leur classement ardu. Il devient donc essentiel de se conformer à cette dynamique des indicateurs de succès pour un projet de dépollution, en personnalisant leur définition pour chaque initiative, plutôt que d'essayer une standardisation constante. Ainsi, la vision et les indicateurs partagés entre toutes les parties prenantes permettraient d'assurer une gestion efficace et adaptée à chaque projet de dépollution.

## 2.3. Verrous méthodologiques

### 2.3.1. Mauvaise planification et gestion des imprévus

Les interactions dans les projets de dépollution peuvent engendrer l'apparition de propriétés et de comportements imprévisibles, qui ne peuvent pas être déduits ou observés au niveau de ses composants. Un projet de dépollution est soumis à des influences externes à diverses échelles provenant d'autres systèmes qui composent son environnement et sont eux-mêmes considérés comme complexes. Dans ses recherches, Ulibarri souligne que la complexité d'un projet de dépollution réside dans sa nature interdisciplinaire (Ulibarri 2015). La complexité interdisciplinaire de la dépollution nécessite donc une collaboration étroite entre les experts de différentes disciplines qui doivent évaluer les risques environnementaux et sanitaires, développer des stratégies de dépollution efficaces et durables, et surveiller les progrès réalisés pour assurer la réussite du projet de dépollution. Cette approche intégrée permet de mieux comprendre les interactions complexes entre les différents facteurs environnementaux et de développer des solutions adaptées aux défis spécifiques posés par chaque site pollué.

La complexité inhérente à la dépollution a été largement abordée dans de nombreuses études de recherche novatrices (Ulibarri et al. 2020), (Gilmore 2001). Price a développé une approche de gestion adaptative du site qui vise à surmonter cette complexité. Cette approche consiste à évaluer régulièrement les résultats des actions de dépollution mises en œuvre, à analyser les données recueillies et à prendre des décisions éclairées pour ajuster la stratégie de dépollution en conséquence. L'objectif est de permettre une adaptation aux défis spécifiques et aux contraintes rencontrées sur le site, ainsi qu'aux incertitudes éventuelles ou aux nouvelles informations qui peuvent émerger tout au long du processus de dépollution (Price et al. 2017).

D'autre part les divers processus de conception, ou de mise en œuvre de projet de dépollution complexes, requièrent généralement outre une vision partagée et holistique du système cible une multitude de compétences et donc une collaboration étroite des disciplines concernées. Cette collaboration doit permettre de trouver des compromis acceptables pour concilier la durabilité de la ressource, la productivité économique et l'intérêt social du système.

L'état de l'art montre que la dépollution de sites industriels est une tâche d'une complexité significative en raison de divers facteurs, dans lesquels les interfaces jouent un rôle crucial. Les interfaces, en termes de dépollution, se réfèrent aux points de contact entre différentes phases du projet de dépollution,

par exemple, la transition entre l'évaluation de la contamination et la mise en œuvre de techniques de dépollution spécifiques (Ivanova and Elsayah 2022).

De plus, Harclerode et al. ont signalé que la complexité des projet de dépollution va au-delà de la simple mise en œuvre de techniques de dépollution (Harclerode et al. 2016). Leur approche, développée dans le contexte des leçons tirées de la mise en œuvre de la dépollution sur des sites complexes, suggère que tous les sites en cours de dépollution devraient être considérés comme des systèmes complexes, avec une attention particulière portée aux interfaces entre les différentes phases du projet.

Critto et al. ont mis en évidence l'importance de sélectionner des technologies de dépollution en fonction à la fois des caractéristiques techniques et des exigences des technologies disponibles, ainsi que des conditions environnementales spécifiques au site concerné, telles que les niveaux de contamination chimique et les objectifs de dépollution (Critto et al. 2006). Cela souligne une autre dimension de la complexité des projets de dépollution : la nécessité de faire correspondre précisément la technologie de dépollution aux conditions spécifiques du site, ce qui peut être particulièrement délicat aux interfaces entre les différentes phases du projet.

En conclusion, ce paragraphe met en évidence la complexité intrinsèque des projets de dépollution, en particulier en ce qui concerne la gestion des interfaces entre les différentes phases du projet. Cette complexité nécessite une attention particulière et une planification minutieuse pour assurer une dépollution efficace et durable.

### **2.3.2. Absence de traçabilité des DIC**

La traçabilité des Données, Informations et Connaissances (DIC) est un enjeu crucial qui va des données sur les types et niveaux de contamination, aux informations sur les technologies de dépollution appropriées, en passant par les connaissances d'expertise sur les processus de dépollution.

L'absence d'un référentiel unifié et standardisé pour ces DIC peut entraîner plusieurs problèmes. Sans un modèle de données standardisé, il peut être difficile de comparer ou de fusionner des données provenant de différentes sources, ce qui peut limiter la compréhension globale de la contamination sur un site spécifique. Cela peut également rendre difficile l'évaluation de l'efficacité des différentes techniques de dépollution si les données ne sont pas recueillies ou analysées de manière cohérente (Dzombak et al. 1996).

De plus, sans une structure d'information unifiée, il peut être difficile de partager des informations entre les différentes parties prenantes impliquées dans un projet de dépollution. Cela peut entraver la collaboration et la coordination des experts de divers domaines.

En ce qui concerne les connaissances, l'absence d'un référentiel commun peut rendre difficile la capitalisation et la réutilisation des connaissances acquises lors de précédents projets de dépollution. Cela peut entraîner une perte de connaissances précieuses et limiter la possibilité d'apprendre de l'expérience passée pour améliorer les futures opérations de dépollution (Volchko et al. 2013).

En conclusion, la structuration et l'élaboration d'un référentiel unifié pour les DIC dans les projets de dépollution est un défi majeur qui doit être relevé pour améliorer l'efficacité et l'efficience de ces projets.

### **2.3.3. Limitation de la notion de gestion d'exigences**

Le défi majeur dans la gestion d'un projet de dépollution est la gestion des exigences, souvent nombreuses et parfois ambiguës. Ces exigences englobent des domaines variés comme la conformité réglementaire, les contraintes environnementales, les exigences de sécurité, ainsi que les attentes des parties prenantes.

Les contraintes réglementaires constituent une complexité majeure, avec des réglementations dynamiques qui évoluent constamment pour s'adapter aux progrès scientifiques, aux changements politiques et aux pressions de la société civile.

Prenons l'exemple des réglementations sur les déchets dangereux. Au fil du temps, les lois ont évolué pour devenir de plus en plus strictes en réponse à une meilleure compréhension des impacts environnementaux de ces déchets. Cela a entraîné des modifications dans les processus de dépollution, exigeant des technologies plus sophistiquées et des procédures plus rigoureuses pour garantir un traitement des déchets de manière sûre et efficace.

De plus, les changements réglementaires peuvent survenir en cours de projet, ce qui nécessite une réévaluation et une adaptation rapides des stratégies de dépollution. Par exemple, une modification de la réglementation relative à l'élimination des déchets chimiques pourrait nécessiter l'arrêt temporaire du projet, l'acquisition de nouveaux équipements ou la formation du personnel à de nouvelles procédures. Cela peut entraîner des retards et augmenter les coûts, mettant une pression supplémentaire sur la gestion du projet.

La dynamique de l'évolution réglementaire exige donc une veille constante et une flexibilité dans l'approche du projet de dépollution. Il est essentiel de disposer d'une équipe bien informée, capable de comprendre les implications des changements réglementaires et de prendre des décisions éclairées pour assurer la conformité tout en minimisant les perturbations du projet. En même temps, cela souligne l'importance de la communication avec les parties prenantes, y compris les autorités réglementaires, pour garantir une compréhension claire des exigences et pour faciliter une mise en œuvre réussie du projet.

Au-delà de la réglementation, il y a de nombreuses exigences provenant des différentes parties prenantes impliquées ayant leurs propres préoccupations, qui peuvent parfois être contradictoires. Cependant, l'importance relative des diverses exigences peut fluctuer en fonction du caractère et du rôle des parties prenantes impliqués/impactés/concernés dans la dépollution des sites et des sols. Le Tableau 4 présente cinq acteurs différents qui peuvent influencer un projet de dépollution. Il indique également les méthodes et les outils dont chacun peut se servir dans le cadre d'un projet de dépollution, ainsi que leurs préoccupations spécifiques.

*Tableau 4: Examen global des enjeux et des parties prenantes impliqués dans la dépollution des sites pollués en France. (Origo 2008).*

<i>Parties prenantes</i>	<i>Méthodes</i>	<i>Préoccupations</i>
<b>Europe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Politique environnementale de l'Union européenne</li> <li>• Réseau Natura 2000</li> <li>• Programme LIFE-environnement</li> <li>• Pacte vert pour l'Europe</li> <li>• Programme Horizon Europe</li> </ul>	Respect et amélioration de la qualité de l'environnement, mise en œuvre de l'Accord de Paris, atteinte de la neutralité climatique, protection de la biodiversité.
<b>Ministère de la Transition Écologique et autres administrations publiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planification stratégique pour la transition écologique</li> <li>• Mise en œuvre de la réglementation environnementale nationale</li> <li>• Initiatives de recherche et développement</li> <li>• Deux bases de données : Basol et Basias</li> <li>• Guides méthodologiques</li> </ul>	Garantir qu'une installation ne représente pas, ni ne représentera à l'avenir, de menaces pour la santé humaine et l'environnement.
<b>Collectivités locales et territoriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planification locale pour la durabilité</li> <li>• Programmes de réhabilitation des sites pollués</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconvertir des terrains en friche.</li> <li>- Prévenir une exploitation excessive des espaces non développés.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en œuvre de projets d'énergies renouvelables</li> <li>• Gestion des déchets</li> <li>• Promotion de l'économie circulaire</li> </ul>	- Contenir l'expansion périurbaine, promouvoir la diversité urbaine, répondre à une forte demande immobilière.
<b>Industriels/Exploitants</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recherche fondamentale et expérimentale</li> <li>• Outils, méthodes et techniques de dépollution</li> </ul>	Economiques : coût de la réhabilitation, valorisation du site.
<b>Riverains</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressions,</li> <li>• Pétitions,</li> <li>• Tracts</li> </ul>	- Sociaux : perte d'emplois. - Environnementaux : désagréments divers (olfactif visuel...) liés à la pollution.

Les différents outils, approches et techniques développés par les cinq groupes majeurs d'acteurs offrent un éclairage sur les préoccupations propres à chacun. La manière d'aborder le problème dépend des priorités : enjeux financiers, écologiques ou une vision axée sur la durabilité des terrains contaminés. Néanmoins, une entité peut envisager diverses perspectives sans adopter le même angle d'approche. Par exemple, pour les autorités locales et/ou régionales, les considérations financières peuvent être associées à une perte de revenus liée à la sous-évaluation ou au non-usage d'une parcelle. Cependant, pour les industriels ou les propriétaires de terrains, ce sont la baisse de la valeur de la propriété et les frais de décontamination qui dominent leurs inquiétudes.

L'objectif est de créer un système de management de la dépollution qui réponde aux besoins de tous les utilisateurs et parties prenantes, tout en respectant les contraintes de coûts et de temps. Le processus de gestion des exigences facilite la communication entre les parties prenantes, permet de gérer les changements et aide à minimiser les risques associés à l'implémentation de nouvelles fonctionnalités ou modifications du système. Dans un contexte plus large, la gestion des exigences est un élément clé pour assurer que le système final répondra aux attentes et fournira la valeur attendue.

## 2.4. VERROU FINANCIER

### 2.4.1. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts

La dépollution des sites industriels pollués entraîne souvent des coûts considérables, principalement en raison des services et méthodes complexes et

laborieux fournis par les entreprises d'ingénierie en charge de la dépollution des sites. Cependant, la dépollution ne se limite pas à la seule phase de traitement du site, et il en va de même pour les dépenses associées. Par conséquent, le coût total de la dépollution d'un site doit englober toutes les étapes, tant en amont qu'en aval du processus de traitement des polluants.

Selon l'étude réalisée par Smith et al., le coût de la dépollution des sites industriels peut varier considérablement en fonction de nombreux facteurs, notamment l'ampleur de la pollution, la taille du site, la nature des contaminants présents, la méthodologie de réhabilitation utilisée, ainsi que la réglementation environnementale en vigueur (Smith et al., 2022). L'étude a révélé que le coût moyen de dépollution d'un site industriel en Europe pourrait s'élever à plusieurs millions d'euros. Cependant, il est important de souligner que ces chiffres peuvent varier considérablement d'un site à l'autre. Les coûts associés à l'évaluation environnementale, la planification et la mise en œuvre des travaux de dépollution, l'analyse des sols et des eaux souterraines, le suivi post-dépollution et la restauration du site sont tous des éléments clés à prendre en compte dans le calcul du coût total de la dépollution d'un site industriel.

Selon Jacq, l'ensemble des coûts associés à une opération de dépollution de site se répartit en trois catégories distinctes, comme illustré dans l'opération suivante (Jacq 2000) :

$$\text{Coût Total de la Dépollution} = \text{Coût Total des Études} + \text{Coût Total des Travaux} + \text{Coût Total du Suivi}$$

Le **Coût Total des Études** est égal au coût total des études préalables plus le coût total des études diagnostiques.

Le **Coût Total des Travaux** est égal au coût total avant travaux plus le coût total assistance plus le coût total analyses pendant travaux plus le coût des technologies utilisées.

Enfin, le **Coût Total du Suivi** concerne tous les coûts de maintenance, de surveillance, des analyses en laboratoire ou sur site après travaux.

L'optimisation des coûts est un enjeu majeur dans les projets de dépollution et il est nécessaire d'identifier et mettre en œuvre des techniques, des méthodes et des processus plus efficaces afin de réduire ces coûts. Khalid et al. soulignent l'importance de bien comprendre les différentes options et procédures pour réaliser une dépollution avec moindre coût (Khalid et al. 2017).

Singh et Chakrabaty proposent un modèle de programmation multi-objectif avec des contraintes de chances et mettent en évidence le rôle significatif d'un temps de dépollution flexible pour optimiser les coûts de remédiation. Selon eux,

une économie importante des coûts de dépollution pourrait être réalisée en évitant l'utilisation de temps de dépollution incorrects (Singh and Chakrabarty 2011).

L'optimisation de coût peut agir sur les techniques de dépollution comme la présentent Soloway et al. dans une étude préliminaire sur la biodégradation in-situ des sols contaminés par des hydrocarbures, une technique qui offre une solution efficace et peu coûteuse pour la dépollution des sites (Soloway et al. 2001).

Enfin, Rust et Star présentent une étude de cas sur l'efficacité des coûts de la dépollution de ravines sur six propriétés dans le Fitzroy, mettant en évidence la variété de coûts et d'efficacité entre ces sites et soulignant l'importance de la sélection d'un mécanisme de politique approprié et la nécessité de mesures de dépollution ciblées (Rust and Star 2018).

Ces travaux témoignent de la multiplicité des approches disponibles pour optimiser les coûts des projets de dépollution et de la nécessité d'une compréhension approfondie des techniques et des processus pour leur mise en œuvre efficace.

## **2.5. VEROUS TECHNIQUES**

### **2.5.1. Manque d'outils interopérables**

Il est évident qu'une multitude d'outils existe pour traiter les données et les informations d'un projet de décontamination. Toutefois, l'interopérabilité entre ces outils laisse souvent à désirer. Par conséquent, les modèles qu'ils emploient nécessitent fréquemment des ajustements et des traductions pour s'intégrer à d'autres outils se focalisant sur divers volets d'un projet de décontamination. Il serait donc judicieux d'envisager le développement d'outils plus cohérents, privilégiant une démarche centrée sur les données au lieu des documents. Cette perspective est intrinsèquement liée à la présence d'un modèle de décontamination standardisé et partagé, dont l'élaboration simplifierait la création de ces outils.

### **2.5.2. Insuffisance de fiabilité des données**

La dépollution des sites industriels présente des défis importants en matière de fiabilité. Il peut s'avérer complexe de tracer avec exactitude les incidents et changements survenant durant la durée de vie d'un site. Même si les avancées

technologiques, notamment les outils numériques, peuvent améliorer la traçabilité, la garantie d'un suivi complet reste complexe.

La clarté et la fiabilité lors du transfert des données, des informations et des connaissances méritent aussi d'être optimisées. Une simplification des interfaces entre outils pourrait faciliter ce processus. Cependant, des obstacles économiques d'une part ou liés au fonctionnement opérationnel et à l'historique des sites d'autre part, peuvent rendre cette simplification difficile.

De plus, des défis techniques plus fondamentaux persistent, en particulier en ce qui concerne la collecte de données. Le manque d'accessibilité à certaines zones sur site lors de caractérisations et de mesures peut poser problème. Il peut être difficile d'atteindre ou de procéder à des mesures dans des zones fortement polluées ou difficiles d'accès. Ces défis soulignent la complexité inhérente à la gestion de la dépollution des sites industriels et l'importance d'innover continuellement pour améliorer les pratiques dans ce domaine.

## **2.6. VEROUS ORGANISATIONNELS**

Les défis organisationnels rencontrés par les projets de dépollution sont multiples et complexes, reflétant la nature interdisciplinaire et souvent multisectorielle de ces projets. Ces défis sont alimentés par une gamme de facteurs interdépendants, allant des ressources disponibles à la gouvernance d'entreprise, en passant par les normes et les cadres réglementaires changeants.

Hou soulignent l'importance du concept de « dépollution durable » comme point d'intervention critique pour façonner le champ de la dépollution (Hou and O'Connor 2020). Ce concept émergent soulève de nouveaux défis organisationnels en introduisant des normes et des standards supplémentaires que les praticiens doivent suivre. Par conséquent, les organisations doivent non seulement se conformer aux réglementations existantes, mais aussi intégrer les principes de durabilité dans leurs pratiques de dépollution, ce qui peut nécessiter des ajustements organisationnels et opérationnels significatifs. Bedard et al. démontrent que l'efficacité de la dépollution peut être affectée par une mauvaise allocation de ressources (financières, matérielles, humaines) et que cela dépend principalement de la qualité de la gouvernance du projet de dépollution (Bedard et al. 2012).

Selon Gatsios, la capacité organisationnelle à intégrer et à gérer des informations complexes et interdépendantes est un élément crucial pour réussir un projet de dépollution. Ils soulignent l'importance de cette compétence

organisationnelle pour naviguer efficacement à travers la complexité inhérente à ces projets (Gatsios et al. 2018). Pourabadehei et Mulligan soulignent que l'adoption d'une stratégie de gestion appropriée et une compréhension approfondie des processus techniques et environnementaux sont essentielles pour réussir les projets de dépollution. Cette stratégie pourrait réduire les coûts de la dépollution en identifiant les véritables points de contamination et en minimisant le risque de remobilisation des métaux traces (Pourabadehei and Mulligan 2016).

En résumé, un large éventail de facteurs organisationnels influence l'efficacité des projets de dépollution. Pour relever ces défis, les organisations impliquées dans la dépollution doivent faire preuve de flexibilité, de ressources suffisantes, d'une gouvernance solide et d'une capacité à gérer des informations techniques et environnementales complexes.

## **2.7. VEROUS ENVIRONNEMENTAUX**

Les projets de dépollution sont souvent confrontés à de nombreux verrous environnementaux qui résultent des défis posés par la complexité des interactions entre les systèmes naturels et les contaminants. Ces défis peuvent être exacerbés par l'absence de politiques claires et adaptées, le besoin d'équilibre avec les écosystèmes naturels et l'importance de promouvoir des méthodes de dépollution durables et respectueuses de l'environnement.

Nwozor et al. soulignent l'importance d'une politique nationale de remédiation claire pour faire face durablement à la dégradation de l'environnement. En effet, un projet de dépollution peut être entravé par des réglementations environnementales ambiguës ou contradictoires, ou par l'absence de directives claires sur les niveaux de dépollution requis (Nwozor et al. 2019). Prasad insiste sur le fait qu'une approche de dépollution durable doit être adoptée pour équilibrer l'environnement et la nature. Ceci suggère que les projets de dépollution doivent être conçus et mis en œuvre de manière à minimiser les impacts sur les écosystèmes naturels et à favoriser leur rétablissement. Une technique de dépollution qui détruit les habitats naturels ou perturbe les espèces locales pourrait s'avérer contre-productive à long terme. Dutta et al. affirment que la promotion de méthodologies propres en matière de dépollution est le meilleur moyen de relever les défis environnementaux futurs. L'adoption de technologies et de méthodes de dépollution propres et respectueuses de l'environnement est donc essentielle pour minimiser les impacts négatifs sur l'environnement et assurer la durabilité des efforts de dépollution (Dutta 2010). T. Zeng et al. présentent les résultats de leur étude comme une nouvelle opportunité pour améliorer la remédiation

environnementale. Cette recherche peut éclairer de nouvelles approches et technologies pour surmonter les défis environnementaux dans les projets de dépollution (Zeng et al. 2015).

Il est crucial de prendre en compte les verrous environnementaux lors de la conception et de la mise en œuvre des projets de dépollution. Il s'agit notamment de disposer de politiques claires, de promouvoir des approches durables, d'utiliser des méthodologies respectueuses de l'environnement et de profiter des nouvelles opportunités de recherche pour améliorer la dépollution.

## 2.8. CONCLUSION : VEROUS ADRESSES ET CONTRIBUTIONS PROPOSEES

Selon l'état de l'art réalisé dans ce chapitre, il est évident que certains verrous ont été largement explorés, faisant l'objet de nombreux travaux d'amélioration, tandis que d'autres ont reçu moins d'attention. Il est clairement difficile d'adresser tous les verrous existants, c'est pourquoi il est proposé de sélectionner des verrous spécifiques, nommés « verrous adressés ». Ce sont des points sur lesquels, il est possible de proposer des pistes d'amélioration, en vue d'atteindre les objectifs de cette thèse.

L'objectif principal de ces travaux est de faciliter la spécification, l'amélioration, le pilotage et le suivi des projets de dépollution, tout en capitalisant sur les connaissances acquises. Cet objectif est réalisé en adoptant une approche basée sur des modèles, afin de garantir la livraison des résultats attendus. Face à ces défis, la prochaine section présente une analyse comparative des différentes contributions pertinentes identifiées dans ce domaine, visant à fournir des pistes de solutions et des bonnes pratiques pour la réussite des projets de dépollution.

En considération de cet état de l'art, les efforts de recherche visent à apporter plusieurs contributions, synthétisées et alignées avec les verrous qu'elles abordent, comme illustré dans le Tableau 5.

*Tableau 5: Liste des contributions adressées par verrou étudiées dans ce travail de recherche*

<i>Contribution proposée</i>	<i>Verrous adressés</i>
Élaborer une liste détaillée des concepts clés tels que les activités types, les parties prenantes, les rôles à remplir et les responsabilités, dans le but de clarifier et définir la nature de la dépollution. Cela vise à assister et faciliter le travail des parties prenantes qui sont impliquées, concernées ou impactées par le projet de dépollution.	Absence de modèle générique pour la dépollution. Mauvaise planification et gestion des imprévus. Manque de traçabilité et de fiabilité des données. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts.

Suggérer/proposer l'adoption d'un langage précis et non ambigu pour décrire le processus de dépollution. Ce langage devrait être flexible, permettant l'intégration cohérente de nouveaux concepts adaptés aux spécificités et aux contextes variés des projets de dépollution.	Ambiguïté sémantique et ontologique. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts.
Favoriser une stratégie fondée sur des modèles en définissant des langages de modélisation, qu'ils soient spécifiques ou génériques, ainsi que les règles et les méthodes pour manipuler les modèles générés.	Difficulté de communication et de coopération entre les parties prenantes. Absence de notion de gestion d'exigence. Manque de modèle générique pour la dépollution. Ambiguïté sémantique et ontologique.
Encourager une approche systémique pour la dépollution.	Absence de notion de gestion d'exigence. Mauvaise planification et gestion des imprévus. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts.
Établir un référentiel d'expertises et de pratiques qui soit à la fois partageable et accessible, afin de favoriser une mise en œuvre efficace et cohérente des projets de dépollution.	Absence de traçabilité de DIC. Absence de spécification formelle des métadonnées. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts.
Élaborer des processus qui facilitent l'adoption efficace de la méthode par les parties prenantes pendant sa mise en œuvre dans le cadre de projets concrets.	Mauvaise gouvernance. Mauvaise planification et gestion des imprévus. Mauvaise optimisation de la gestion des coûts.
Suggérer des outils basés sur l'Ingénierie des Systèmes Basée sur les Modèles (MBSE) pour soutenir les parties prenantes tout au long de leur travail sur les projets de dépollution et pour réduire la complexité inhérente à ces projets.	Manque d'outils interopérables. Manque de communication et de coopération entre les parties prenantes. Manque de Modèle générique pour la dépollution. Insuffisance de la fiabilité des données.

Pour répondre à ces verrous, le chapitre 3 détaille le processus d'élaboration et de formalisation de ces contributions en une méthode baptisée « DEPOLLution model based System Engineering », désormais abrégée sous l'acronyme DEPOSE.

### **3. LA MÉTHODE DEPOSE (DEPOLLUTION MODEL BASED SYSTEM ENGINEERING)**

### 3.1. INTRODUCTION : VERS LA METHODE DEPOSE

La contribution de ces travaux est la méthode **DEPOSE** (**DEP**ollution model based **S**ystem **E**ngineering) présentée dans ce chapitre et illustrée dans le chapitre VII.

En synthèse, DEPOSE vise à aider et assister des partenaires du domaine de la dépollution de sites et de friches industrielles à se structurer, s'organiser et collaborer plus efficacement. Cette méthode supporte deux donc niveaux opérationnels.

- Elle vise en premier lieu la construction, la gestion et l'évolution d'un réseau de partenaires possédant des aptitudes, expériences et ressources dans ce domaine et recherchant des opportunités de collaboration dans le cadre de projets de dépollution. Ce niveau est appelé **Réseau de Dépollution** ou **Depollution Network** (DN) dans la suite.

- Elle vise ensuite à assister ces partenaires pour spécifier et valider différents projets de dépollution, les piloter, éventuellement en les adaptant donc en spécifiant à nouveau chaque projet en cours puis, lors de leur conclusion, en visant une réutilisation de tout ou parties pour de nouveaux projets lorsque cela s'avère pertinent. Ce niveau est appelé **Système de Dépollution** ou **Depollution System** (DS) dans la suite.

A chacun des niveaux, DEPOSE :

- Privilégie la modélisation, la vérification puis à la validation partielle (e.g. vérifier et tracer la conformité aux exigences des parties prenantes de la dépollution d'un site ou aux exigences réglementaires, vérifier la faisabilité de l'allocation et la disponibilité des ressources des différents partenaires, etc.) ou encore l'optimisation du tout pour rechercher une meilleure efficacité opérationnelle dans les opérations de dépollution ;

- Supporte des approches de gestion des risques, sur le terrain comme très en amont lors de la spécification des projets ou de la construction du réseau de dépollution ;

- Renforce la communication, la confiance et promeut la collaboration entre les différents partenaires ;

- Pousse ces mêmes partenaires à l'innovation et à l'amélioration continue en mettant en œuvre des processus de feedback et d'apprentissage organisationnel.

Sur ces bases, DEPOSE vise enfin à promouvoir des pratiques de dépollution durables et respectueuses de l'environnement et à faciliter la

reproductibilité des projets de dépollution. Cela ouvre la voie à une vision plus industrielle de la dépollution pour réduire les coûts, les risques et améliorer l'efficacité des projets quelle que soit la stratégie de dépollution devant être adoptée en fonction des caractéristiques des polluants en jeu, du site à dépolluer ou les attentes des autres parties prenantes de la dépollution.

Ce chapitre se concentre sur une vision d'ensemble de DEPOSE et fixe les bases de réflexion. Les chapitres IV et V décrivent respectivement et en détail les concepts de DS et de DN avant d'aborder la synthèse de la méthode au chapitre VI et de l'illustrer au Chapitre VII.

## **3.2. LA METHODE DEPOSE : VISION GLOBALE**

### **3.2.1. Principes de base**

Les projets de dépollution sont le fruit d'entreprises intéressées, susceptibles d'être ou étant réellement impliquées dans différentes activités. Elles souhaitent réaliser certaines activités et prendre certaines responsabilités et être rémunérées en retour. Elles cherchent cependant à rester dans leurs domaines de compétences les poussant à une certaine spécialisation mais aussi à un certain confort ou une certaine liberté d'action. Elles doivent pour cela accepter de partager certains risques dont les risques financiers, de sûreté et de sécurité et s'appropriier plus facilement, voire plus régulièrement, des opportunités d'autres projets avec les mêmes partenaires ou avec d'autres entreprises acceptant les mêmes contraintes et partageant leur vision.

Ces entreprises forment ainsi un environnement malheureusement encore peu formalisé, vu ici comme un système sociotechnique complexe baptisé Réseau de Dépollution ou Depollution Network (DN). En particulier, elles restent encore peu conscientes des possibles modèles d'organisations et de gouvernance qu'elles doivent adopter. Le Depollution Network se focalise donc sur la construction et l'évolution (e.g. entrée ou sortie d'un nouveau partenaire potentiel, arbitrages de diverses natures, ou définition de protocoles de partage de responsabilités ou de ressources), le management et la gouvernance d'un réseau unique rassemblant et fédérant l'ensemble des entreprises partenaires.

Chaque projet de dépollution, appelé Système de Dépollution ou Depollution System (DS), est également vu comme un système complexe impliquant plusieurs partenaires et caractérisé par divers facteurs de complexité présentés chapitre 1. Chacun est caractérisé par le nécessaire respect de diverses

contraintes physiques, techniques et chimiques de polluants ou de combinaisons de polluants, budgétaires, humaines, environnementales, organisationnelles, sociétales ou encore règlementaires. Tous les projets nécessitent donc de croiser plusieurs sources de connaissances et de compétences, allant par exemple des sciences environnementales à la technologie, de la gestion des risques à l'ingénierie et la gestion de projets et d'organisations complexes, des aspects économiques, logistiques à la communication interne (entre les partenaires) comme externe (avec les autres parties prenantes de la dépollution présentées plus loin). Ils nécessitent enfin une planification précise, une expertise technique et une gestion de projet rigoureuse pour définir puis mener à bien les opérations de dépollution. Le caractère imprévisible de certains facteurs, comme les conditions météorologiques, peut enfin complexifier davantage leur mise en œuvre. Par conséquent, leur spécification et préparation puis leur pilotage et leur gestion selon des dynamiques temporelles propres est souvent une tâche délicate qui nécessite une compréhension approfondie des dynamiques en jeu. Le Depollution System se focalise donc sur les étapes de préparation, validation, exécution et pilotage puis fin de vie d'un projet de dépollution.

### **3.2.2. Hypothèses**

Les différents facteurs de complexité vus dans les chapitres précédents et le choix des verrous adressés dans le chapitre 2 nécessitent de définir plusieurs hypothèses de travail. De fait, définir, formaliser et outiller la méthode DEPOSE implique de croiser là aussi plusieurs disciplines scientifiques :

- L'approche systémique et la pensée système fournissent les principes de base communs à la fois pour mieux maîtriser la formalisation puis la modélisation du Depollution Network comme de tout Depollution System et, enfin, de définir une méthode ;
- Les sciences des risques proposent des approches de caractérisation et de management des risques de toutes natures ;
- Puisqu'il s'agit au final d'ingénierie de projets comme de réseaux de partenaires complexes, et de promouvoir la modélisation comme vecteur de réflexion commune, de facilitation et de réactivité (Fosse 2016), il est proposé ici de s'inspirer fortement de l'approche Ingénierie Système et tout particulièrement de l'Ingénierie Système Basée Modèles (MBSE) (Lemazurier, Chapurlat, and Grossetête 2017) qui promeuvent respectivement :

- Des processus standardisés proposés par exemple dans l'ISO 15288 (ISO/IEC/IEEE 2015) ou dans l'ISO 29110 (29110 ISO 2016) aujourd'hui reconnus comme une base avérée d'organisation du travail d'ingénierie dans plusieurs domaines industriels ;
- Le rôle et l'importance de la modélisation, donc d'une approche d'Ingénierie Système Basée Modèles qui privilégie effectivement le rôle, la pertinence et l'usage des modèles à l'opposé d'une méthode d'ingénierie classique basée documents ;
  - o Enfin, la notion même d'organisation nécessite d'emprunter des concepts et des principes venant de la théorie des organisations (Hatch and Cunliffe 2009) et de la Modélisation d'Entreprise (Vernadat 2001).

### **3.2.3. Apports combinés de l'approche systémique et de la modélisation métier**

Selon Yatchinovsky (2004), contrairement à la pensée cartésienne qui sépare et décompose, la pensée systémique s'efforce d'unifier, de rassembler et d'appréhender les éléments dans leur ensemble et leurs relations mutuelles. Ainsi, la logique systémique nous pousse à percevoir les entités (nature, corps humain, infrastructures, etc.) dans leur intégralité et complexité, où chaque composant est pris en compte en relation avec les autres pour résoudre un problème donné. Ainsi, un « système » est défini comme un ensemble d'éléments interdépendants qui travaillent ensemble pour atteindre un objectif commun. Il se distingue par sa complexité, sa finalité, sa globalité et son ouverture (Probst and Bassi 2017).

Cette approche repose sur plusieurs principes, comme par exemple le fait qu'un système est plus grand que la simple somme de ses parties et qu'il est donc essentiel de comprendre comment ces parties interagissent pour aborder le problème dans son intégralité. Dans le contexte de la dépollution, l'approche systémique permet de mieux comprendre, à un niveau jugé suffisant pour aller vers la vision globale attendue des deux systèmes déjà annoncés, le Depollution Network et le Depollution System, quels sont et comment les différents facteurs de complexification les caractérisent, et s'influencent les uns les autres. Par exemple, dans un DS, un contaminant peut se propager à travers l'écosystème à travers l'eau, l'air, ou même par le biais des organismes qui vivent sur le site. En ne se concentrant que sur l'élimination du contaminant et non sur ses interactions, nous risquons de manquer des éléments cruciaux de la pollution et donc de ne pas résoudre le problème de manière efficace et durable.

Cette hypothèse systémique est de fait ici étroitement liée à l'hypothèse forte de travailler sur la base de modèles et non de documents. Cela nécessite de créer, manipuler et échanger des modèles qui traduisent cette vision système (e.g. modèles comportementaux de la migration de polluants, modèles de flux, mais aussi modèles dérivant l'organisation des DS comme du DN).

Enfin, les apports théoriques et pratiques doivent permettre de structurer l'ensemble du cycle de vie d'un DS comme d'un DN depuis leur création jusqu'à leur fin de vie, en passant par leur conception, leur implémentation, leur paramétrage constant et leur exploitation sur des périodes pouvant être très longues.

**Compréhension globale :** Cette approche nous aide à voir le système de dépollution dans son ensemble, plutôt que de se concentrer sur des éléments individuels. Cela permet une compréhension plus profonde des relations et interactions entre les divers composants du système.

**Identification des leviers d'actions :** En envisageant le système dans son ensemble, nous pouvons identifier les points où une intervention peut avoir le plus grand impact. Cela peut être crucial pour l'optimisation des ressources et l'efficacité des actions de dépollution.

**Prévision des conséquences :** L'approche systémique permet de modéliser et de prévoir comment des changements dans une partie du système peuvent affecter le reste du système. C'est essentiel pour éviter les conséquences imprévues et pour planifier de manière efficace.

**Adaptabilité :** En comprenant les dynamiques du système, nous sommes mieux préparés à adapter nos stratégies face à l'évolution du système ou à l'émergence de nouvelles informations ou de nouveaux paramètres.

**Intégration interdisciplinaire :** L'approche systémique favorise l'intégration des connaissances provenant de disciplines variées, ce qui est nécessaire étant donné la nature multidimensionnelle des systèmes de dépollution.

Compte tenu de la nature même de ces deux systèmes qui sont avant tout des systèmes sociotechniques, le concept de Système de Systèmes ou System of Systems (SoS) doit être clarifié pour sa pertinence au regard de la compréhension d'un DS comme d'un DN comme démontré et appliqué dans la suite. En effet, un SdS est défini par Maier comme « *Un système-de-systèmes est un assemblage de composants qui individuellement peuvent être considérés comme des systèmes, et qui possède deux propriétés supplémentaires : Indépendance opérationnelle des composants : Si le système-de-systèmes est démonté en ses systèmes composants, ces systèmes composants doivent pouvoir fonctionner utilement de manière indépendante. C'est-à-dire que les composants répondent aux besoins des utilisateurs-*



○ Un point de vue est une « *spécification des conventions de construction et d'utilisation d'une vue. Un modèle à partir duquel on peut développer des points de vue individuels en établissant les objectifs et le public d'un point de vue ainsi que les techniques de création et d'analyse* ». En d'autres termes, un point de vue tel que défini dans cette norme sera ici appelé Domain Specific Modelling Language ou DSML (Mayerhofer et al. 2013; Combemale et al. 2014; Nastov 2016).

La grille de la Méthode SAGACE (Penalva 1990) propose de modéliser tout ou partie des concepts systémiques essentiels vus plus haut au travers de trois vues et neuf points de vue synthétisés Figure 11 :

○ **Vue fonctionnelle** : Quel est le rôle du système dans son contexte ? Quelle est sa raison d'être, sa tâche principale et ses cibles ? Elle se concentre donc uniquement sur le « quoi ? » sans aborder le comment du système et intègre de fait un seul point de vue dit 'Fonctionnel' ;

○ **Vue structurelle** : Quelle est la composition du système ? Avec quels moyens, quelles configurations et quelle organisation le système opère-t-il ? Comment est-il agencé pour accomplir sa tâche ? Elle intègre trois points de vue appelés alors perspectives : « Activités » ou « programmes », « Organisation » ou « réseau logistique » et « Ressources » ;

○ **Vue comportementale** : Comment le système évolue-t-il et s'adapte-t-il ? Comment passe-t-il d'un état à un autre ? Quels sont les différents chemins possibles de son évolution ? Quelles sont les conditions et les dispositions des moyens du système permettant de passer d'un chemin à l'autre ? Elle intègre cinq points de vue : « scénarios », « configuration », et plus précisément les modes de « pilotage », « d'adaptation » et « d'anticipation » que le système utilise pour maintenir la performance, la stabilité et l'intégrité du système modélisé.

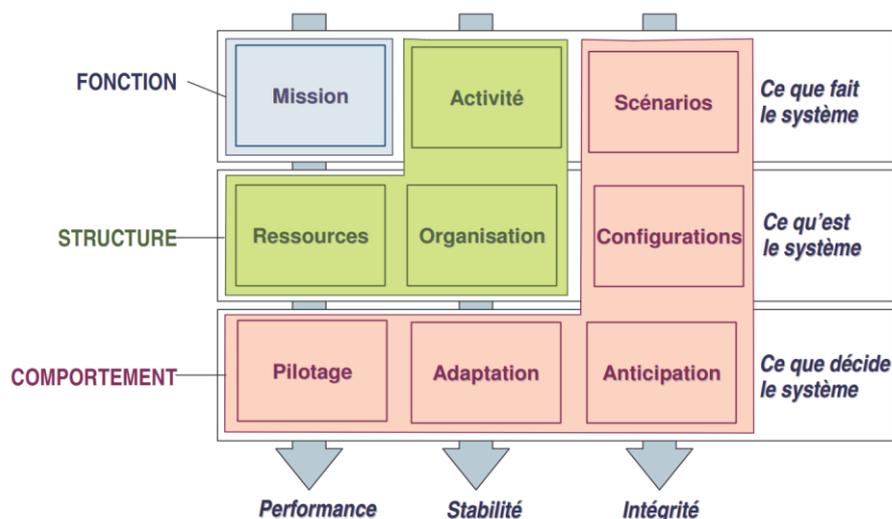


Figure 11: La grille SAGACE (Penalva 1990)

Le lien est donc nécessaire entre l'approche systémique, sa synthèse au travers de la méthode SAGACE qui fournit alors un premier cadre de référence pour la modélisation, et la modélisation elle-même, qu'elle réponde à des problématiques de modélisation pour l'Ingénierie de Systèmes comme le DS ou d'organisations complexes comme le DN, de gestion des risques ou de gestion de projets.

Cela nous amène à proposer un cadre de modélisation commun, assez général et classique de ces deux systèmes imbriqués que sont le Dépollution Network et le ou les Depollution Systems qu'il contient et gère. Ce cadre synthétise est donc la base conceptuelle de la méthode DEPOSE. La théorie générale de modélisation mentionnée a été adaptée et standardisée par l'ISO (ISO/IEC 2015) en intégrant les principes de l'Ingénierie Système et le caractère itératif des processus associés (INCOSE 2015). Elle se décline en sept points de vue : (1) Contextuel, (2) Cycle de vie, (3) Exigences, (4) Fonctionnel, (5) Organique, (6) Gestion des risques et (7) Gestion des données.

**Point de vue Contextuel :** décrire le système plus vaste dans lequel le système d'intérêt (DS ou DN) opérera sa mission et faisant donc apparaître clairement et sans ambiguïtés les frontières du Système d'Intérêt ou System of Interest<sup>1</sup> (SoI, ici le DS ou le DN), les systèmes avec lesquels il doit interagir et donc partager des flux de différentes natures (donnée, matière ou énergie), se connecter via des liens en charge d'assurer le transfert de ces flux et d'interfaces pour assurer la réelle prise en compte de ces liens et améliorer globalement l'interopérabilité native souhaitée de ce SoI. Dans chaque contexte, les services que le SoI est censé fournir en relation avec sa mission sont définis, tout comme les services qu'il sollicite pour réaliser cette mission. Ces services sollicités proviennent de systèmes avec lesquels le SoI est en interface, issus de son environnement. Par conséquent, cette perspective détermine également les flux d'entrée et de sortie généraux du SoI, ainsi que ses connexions physiques, délimitant ainsi la frontière du SoI.

**Point de vue Cycle de vie :** selon l'ISO 15288, le "life cycle" est défini comme « *l'évolution d'un système, produit, service, projet ou autre entité créée par l'homme, de la conception à la mise hors service* ». Cette perspective permet de détailler les diverses phases du système d'intérêt (DS ou DN) et de préciser les jalons essentiels pour passer d'une phase à la suivante.

---

<sup>1</sup> Le système d'intérêt (SoI) est "le système dont le cycle de vie est considéré" (ISO/IEC/IEEE 15288:2015).

**Point de vue Exigences :** identifier les préoccupations ou « *Concerns* » des parties prenantes i.e. besoins, exigences, valeurs et contraintes.

**Point de vue Fonctionnel :** modéliser les activités, les processus, les ressources et les capacités requises au sein du système d'intérêt (DS ou DN). Ce point de vue offre de même la possibilité d'illustrer comment le système d'intérêt devra fonctionner, en soulignant les processus clés, les activités requises et les ressources nécessaires. Il montre comment les fonctions sont agencées dynamiquement, leur séquence d'exécution, et comment les conditions pour le contrôle ou le flux de données sont prises en compte pour satisfaire le référentiel des exigences. Selon le principe de conception itérative, une telle architecture fonctionnelle peut évoluer en tenant compte des architectures ultérieures.

**Point de vue Organique (ou Structurel) :** représenter de manière statique la structure interne du SoI (DS ou DN), ses composants, son architecture et son organisation.

**Point de vue Gestion des risques :** représenter divers événements, imprévus et risques potentiels, et évaluer leur incidence sur le SoI (DS ou DN) et les ressources associées. Ce point de vue permet également de repérer des stratégies préventives et curatives, ainsi que d'évaluer et de gérer de manière proactive les risques associés.

**Point de vue Gestion des données :** présenter les différentes données, informations et connaissances (DIC) qui peuvent circuler et être échangées dans le SoI (DS ou DN).

### 3.2.4. DEPOSE est une méthode

Une méthode est classiquement composée de cinq éléments essentiels tels qu'utilisés par exemple par (Bourdon, Chapurlat, and Couturier 2022) et schématisés Figure 12.

**Les Concepts :** ce sont les principes qui régissent un domaine et qui sont nécessaires à sa compréhension et sa définition, les attributs, ainsi que les dépendances entre ces principes, formalisés sous la forme de relations, de règles et de contraintes. Comme dit plus haut, il y a ici plusieurs domaines qui se croisent : la systémique, la gestion des risques, l'ingénierie système, la modélisation, la modélisation d'entreprise et des processus, et la gestion de projets. Ils sont indispensables pour décrire et gérer efficacement un DN ou un DS. Ces concepts, ces relations et ces attributs forment ainsi la base d'un vocabulaire consensuel mais évolutif dans le domaine global de la dépollution.

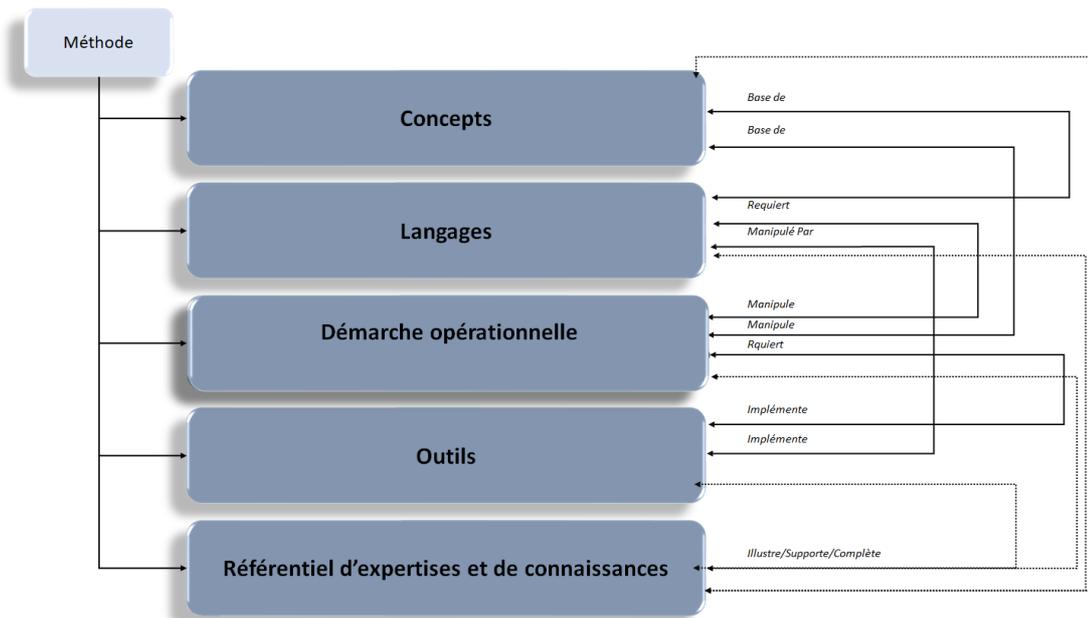


Figure 12: Les composants de la méthode

**Les Langages** : les langages métiers, dont les langages de modélisation, de simulation, d'optimisation, etc. permettant d'exprimer chaque point de vue. En termes de modélisation et de vérification, d'analyse et d'optimisation, nous visons ici des DSML qui seront présentés dans la suite. Ces langages permettent de manipuler les concepts, attributs et relations du méta modèle évoqué ci-dessus et sont donc conformes à la pyramide de l'OMG réinterprétée comme proposé Figure 13 par (Chapurlat et al. 2022).

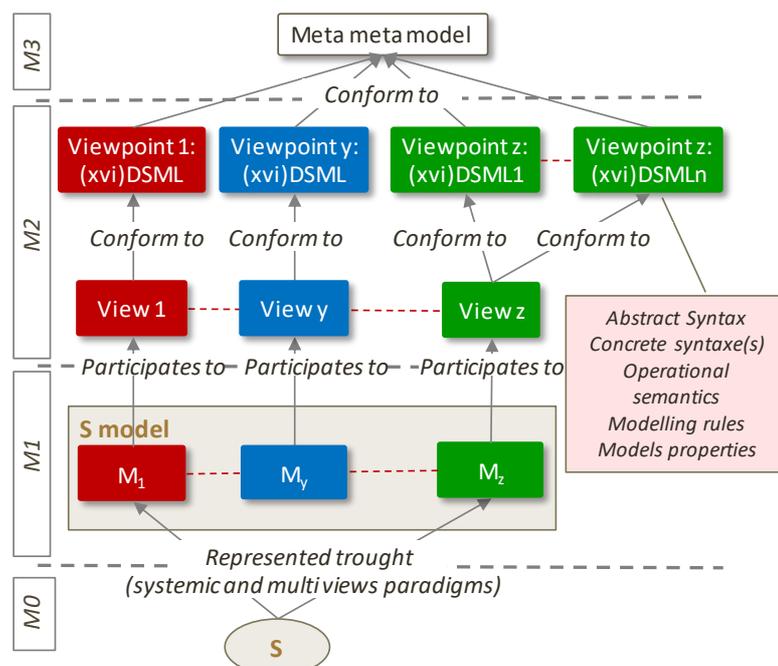


Figure 13: Pyramide de l'OMG interprétée avec l'inclusion de vues et de points de vue (Chapurlat et al. 2022)

La finalité de ces DSML est bien ici la création et la manipulation de modèles du DS ou du DN, c'est-à-dire ici de leur exécution et de leur analyse a minima dans l'optique de vérifier et valider leur pertinence.

Un DSML est défini pour un point de vue par :

- Une syntaxe abstraite conforme à tout ou partie du méta modèle : les concepts, attributs et relations d'un DSML sont donc choisis pour exprimer le point de vue attendu dans une vue.

- Une syntaxe concrète permettant de représenter graphiquement ou textuellement et sans ambiguïtés ces concepts et relations. Les DSML choisis dans la suite doivent posséder une syntaxe concrète facilitant leur mise en œuvre par des parties prenantes issues de différents domaines, qui ne sont pas nécessairement versées dans la modélisation ou même concernées par la totalité du DN ou du DS, qu'elles modélisent donc par parties. Cette syntaxe concrète n'est donc pas forcément unique pour une même syntaxe abstraite, car elle doit être adaptable aux préférences des modélisateurs. Elle peut prendre diverses formes, comme un tableau, un diagramme, une image, un texte, etc.

- Des règles de modélisation i.e. des règles de construction de modèles destinées à garantir leur conformité sémantique, au-delà de la simple conformité syntaxique, avec le méta-modèle.

- Une sémantique opérationnelle qui spécifie, le plus formellement possible pour éviter ensuite toute ambiguïté d'interprétation, comment le modèle évolue dans le temps et fournit ses extrants en réponse à des intrants. Cette sémantique opérationnelle traduit donc la dynamique du modèle.

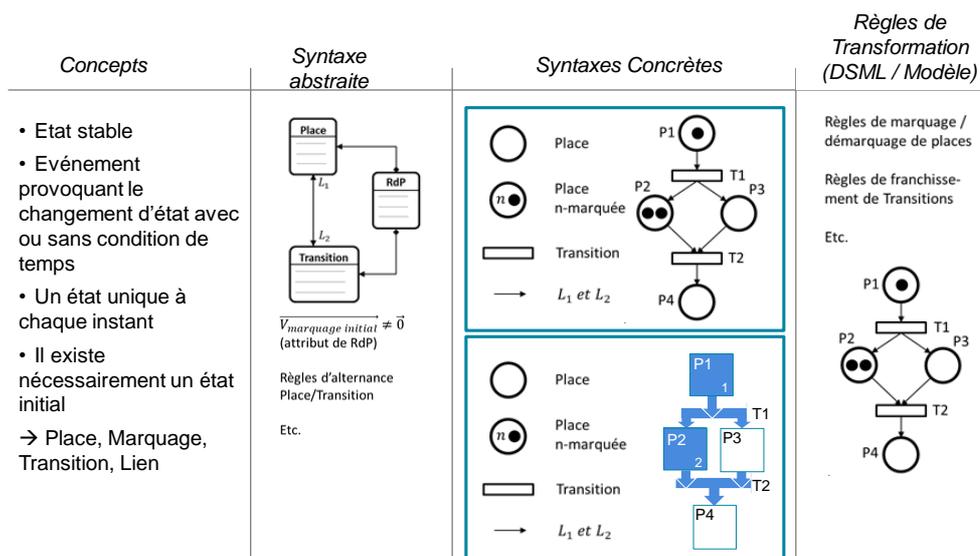


Figure 14: Exemple de syntaxes abstraite et concrète, de règles de modélisation et sémantique opérationnelle

A titre d'exemple, nous présentons ci-dessus Figure 14 le cas des réseaux de Petri, qui sont une représentation graphique utilisée pour modéliser le comportement dynamique de systèmes selon une approche à événements discrets.

**La Démarche opératoire :** la démarche opératoire dépeint la manière d'appliquer la méthode DEPOSE que les parties prenantes doivent suivre lorsqu'elles envisagent la dépollution d'un site (démarche dite Projet) ou gèrent le réseau (démarche dite Réseau). La démarche projet vise à guider ces utilisateurs pour préparer, concevoir et mettre en œuvre un DS. La démarche Réseau vise à guider ces mêmes utilisateurs (manager, responsables d'entreprises,...) pour construire, faire évoluer et maintenir le réseau d'entreprises, rester à l'écoute de potentiels clients et lancer un projet en réponse à ces derniers.

**Les Outils :** on entend ici des outils informatiques supports de DEPOSE implémentant diverses fonctionnalités pour utiliser les DSML (modéliser, vérifier, simuler, tester, évaluer, tracer les données, ...) et donc mettre en œuvre l'une ou l'autre démarche opératoire vues ci-dessus.

**Le Référentiel d'Expertises, de Connaissances et de Pratiques (RECP) :** il formalise, centralise et redistribue en les pérennisant toutes les données, informations et connaissances (El Alaoui et al. 2023) nécessaires ou résultantes de la mise en pratique de la méthode DEPOSE. C'est en quelque sorte une source d'acculturation, de partage et de réutilisation de tout ou partie d'éléments concrets de la méthode : les REX des parties prenantes, des patrons de modélisation comme proposé dans (Schindel 2005) et les modèles de référence, des guides d'utilisation, des modèles issus de projets passés et jugés éprouvés ou au contraire devoir être à éviter,...

### 3.3. CONCLUSION

Dans le cadre de notre thèse, nous avons développé la méthode DEPOSE, que nous envisageons d'appliquer aux niveaux DS et DN. Cette méthode a pour ambition de formaliser, modéliser et spécifier diverses exigences, qu'elles soient techniques, éthiques ou environnementales. Suite à cette modélisation, l'idée est de clarifier la stratégie de dépollution et les moyens nécessaires.

En utilisant ces modèles et en s'appuyant sur les informations de notre référentiel, nous espérons que les parties prenantes, au niveau DS ou DN, pourront mieux structurer et évaluer la pertinence de leurs projets. L'objectif serait de confirmer la faisabilité du projet, tant d'un point de vue technologique qu'organisationnel.

Dans le chapitre 4, nous approfondirons les concepts relatifs au niveau DS. Tandis que dans le chapitre 5, nous explorerons en détail les concepts et éléments pertinents associés au niveau DN.

## **4. NIVEAU DEPOLLUTION SYSTEM : CONCEPT**

## 4.1. INTRODUCTION : UN SYSTEME DE DEPOLLUTION EST UN SYSTEME DE SYSTEMES

Les sous-systèmes et composants du DS sont eux-mêmes de nature hétérogène et accomplissent une partie des activités de dépollution attendues, atteignant en même temps des objectifs globaux de dépollution et des objectifs propres (par exemple financiers, de performance, etc.). Chacun peut intervenir à un moment donné, en charge d'un ensemble spécifique d'opérations et sortira à un autre moment. Il peut également disparaître ou être remplacé par un autre sous-système en considérant la durée de la dépollution, qui peut être très longue. Ainsi, un système de dépollution, d'un point de vue organisationnel, comportemental et fonctionnel, évolue dans le temps (Gray-Cosgrove, Max, and Josh Lepawsky 2015), c'est-à-dire est dynamiquement affecté puis modifié, vérifié et reconfiguré à tout moment pour offrir les services attendus. Par conséquent, nous considérons l'hypothèse pour définir tout système de dépollution comme un Système de Systèmes (ou System of Systems - SoS) (Boardman and Sauser 2006),(Kozma and Varga 2021),(Dubaniowski and Heinimann 2021), c'est-à-dire une intégration d'un nombre fini de systèmes constituant le DS qui sont indépendants au niveau opérationnel et managérial, et qui sont interconnectés pendant une certaine période de temps pour atteindre un certain objectif supérieur (Maier 2009). En effet, un système de dépollution satisfait les caractéristiques attendues d'un SdS (DeLaurentis 2005).

- **Autonomie** : tous les composants du SdS restent indépendants, en termes de décisions opérationnelles et managériales, de tous les autres composants du SdS lorsqu'ils accomplissent la mission globale du SdS. Cela implique une autonomie administrative et organisationnelle lors de la réalisation des objectifs du système de dépollution. Par exemple, un système de transport en charge de l'évacuation des déchets prend des décisions managériales et opérationnelles indépendamment du système de dépollution, mais toujours dans le cadre de la réalisation de l'objectif de ce dernier.

- **Appartenance** : chaque sous-système accepte de remplir la mission commune, faisant ce qu'il sait faire d'un point de vue professionnel tout en étant autonomes et capables de changer de rôle à tout moment. Selon la revue de la littérature, les systèmes constituant le système de dépollution ont le droit et la capacité de choisir d'appartenir au SdS. Le choix est basé sur leurs propres besoins, croyances ou accomplissement. Par exemple, un système de dépollution nécessite la participation de laboratoires d'analyse pour analyser les échantillons de sol. Bien qu'il soit vrai que l'objectif des laboratoires d'analyse est de réaliser des diagnostics

et de fournir des résultats, dans le cadre du système de dépollution, leur objectif est le même que celui du SdS, qui est de réduire l'effet de l'industrie sur l'environnement.

○ **Émergence** : en raison des interactions et de l'autonomie des composants, le comportement global du système de dépollution reste difficile à caractériser formellement. De nouveaux comportements et de nouvelles propriétés, parfois imprévisibles, peuvent émerger à l'interface entre les composants et l'environnement. Par exemple, sur un chantier de dépollution, les méthodes de dépollution appropriées sont sélectionnées après avoir déterminé qu'une substance chimique est la cause de la contamination. Mais peut-on supposer que cette substance ne réagit pas avec l'eau ou d'autres constituants du sol pour créer un nouveau polluant nécessitant un traitement différent ? Par conséquent, un système de dépollution doit avoir une certaine agilité pour résister à des actions imprévisibles.

○ **Connectivité** : chaque composant doit être capable d'établir et de maintenir une connexion avec les autres, puis être interopérable. Les composants d'un système de dépollution doivent interagir, collaborer et communiquer harmonieusement avec tous les autres pour atteindre l'objectif global du SdS. Les sous-systèmes sont alors richement interconnectés à travers de multiples flux et liens, nécessitant même diverses interfaces.

○ **Diversité** : cette caractéristique met en évidence les différentes perspectives de fonctions des composants hétérogènes, souvent géographiquement distribués de DS. En effet, ces composants sont de nature significativement différente, avec des dynamiques différentes qui opèrent sur des échelles de temps différentes, et d'un point de vue stratégique, ils sont de tailles variées, avec des missions contrastées, et sont soutenus par divers équipements et systèmes d'Information et de Communication (ICT).

## **4.2. CARACTERISTIQUES DU SYSTEME DE DEPOLLUTION**

### **4.2.1. Finalité, missions et objectifs d'un système de dépollution**

Un système de dépollution doit accomplir une mission donnée ou un ensemble de missions (qu'est-ce que le système doit faire ?) pour un ensemble de

raisons (c'est-à-dire la raison pour laquelle il doit exister), et atteindre divers objectifs comme suit :

- **Finalité** (c'est-à-dire, la raison de l'existence de tout système de dépollution) : gérer la fin de vie de toute zone considérée comme polluée pour une utilisation future, par exemple transformer un site industriel pollué en un site pouvant accueillir un supermarché ou une école, permettant ainsi la continuité de l'activité.

- **Mission** : le système de dépollution est destiné à intervenir dans une zone complexe mais géographiquement délimitée afin de transformer l'état actuel pollué de cette zone en un nouvel état adapté à une utilisation future. Cette mission induit diverses activités à réaliser sur la zone polluée, à la fois techniques et administratives, afin d'atteindre l'état attendu dans lequel la plupart des substances dangereuses ont été réduites. Cinq missions principales peuvent ainsi être identifiées :

1. Le DS explore la zone supposée polluée, caractérise les substances et cartographie les polluants ;

2. Le DS réduit la contamination dans un espace spécifique, atteignant les gammes attendues définies par les parties prenantes et imposées par les normes et les standards réglementaires ;

3. Le DS rétablit une qualité sanitaire et écologique compatible avec les usages futurs de la zone nettoyée ;

4. Dans certains cas, le DS doit assurer la gestion des déchets, leur collecte, transport, récupération et élimination, ou cette mission peut alternativement être attribuée à un système externe ;

5. Le DS permet la gestion des indicateurs mesurables utiles pour le contrôle de l'opération de dépollution.

- **Objectifs** : un DS doit atteindre divers objectifs, comme illustré dans le Tableau 6, qui décrivent comment le système doit accomplir sa mission, notamment en termes de sécurité, de traçabilité, de performance, etc. Les objectifs doivent être quantifiables, mesurables, évaluables et partagés sans aucune ambiguïté par les parties prenantes.

*Tableau 6: Exemples de types d'objectifs*

Type	Description
Coût	Un objectif de coût financier convenant à toutes les parties prenantes.
Délais	Un objectif temporel qui convient à toutes les parties prenantes.
Performance	Un objectif de performance du système de dépollution.

Sûreté/ sécurité	Un objectif de prévention des risques professionnels et d'intervention contre ceux de nature accidentelle et malveillante.
Niveau de contamination	Un objectif de niveau de contamination, sur la base d'une estimation permettant de déterminer l'étendue de la pollution.
Performance environnementale	Un objectif de ne pas porter atteinte à l'environnement : la mise en service de l'activité de dépollution protège les personnes et leur environnement.

#### 4.2.2. Le DS dans son contexte

Lors de sa phase d'exploitation, un système de dépollution évolue au sein d'un environnement spécifique, décrit dans un modèle de contexte. Ce schéma se propose de répondre aux questions suivantes : « Quels sont les éléments et systèmes entourant le système de dépollution lorsqu'il fonctionne et réalise sa mission ? Quels services sont alors attendus en échange entre le système de dépollution et chacun de ces systèmes interfacés ? »

La Figure 15 présente ce modèle de contexte, mettant en évidence les systèmes classiquement rencontrés et les services généralement attendus.

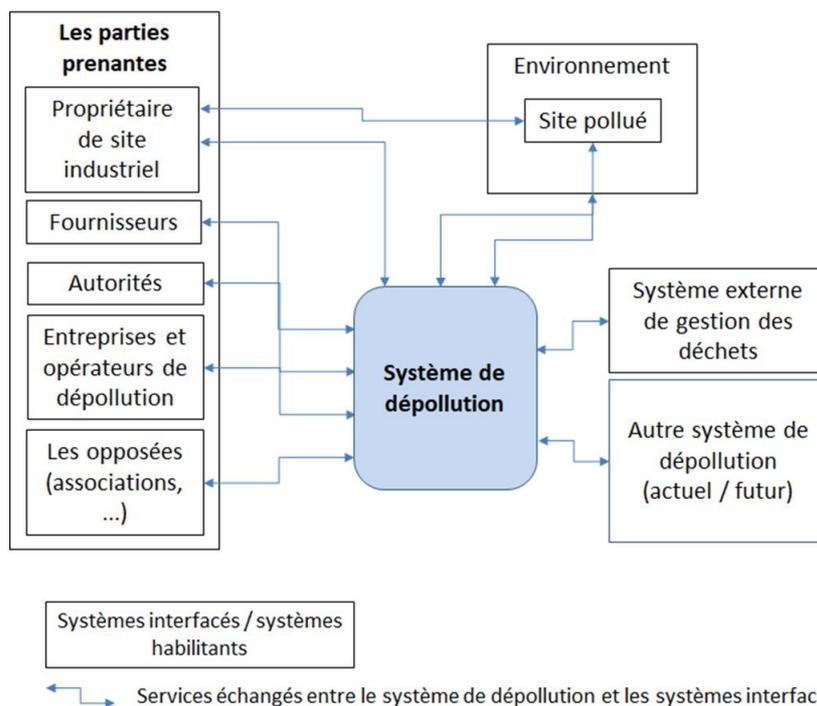


Figure 15 : Diagramme de contexte d'un système de dépollution générique

Plus précisément, ces systèmes sont :

- Le site pollué, partie intégrante du territoire, fournissant les services essentiels au bon fonctionnement du système de dépollution ;

- Le système externe de gestion des déchets, représentant diverses méthodes de traitement et d'élimination des déchets ;
- Les systèmes d'autorité, contrôlant la légitimité des opérations de dépollution et la qualité du résultat obtenu ;
- Les entreprises fournisseuses et les systèmes adverses ;
- D'autres systèmes de dépollution agissant sur le même territoire, influençant à leur tour le système de dépollution (SoI), à savoir le « système dont le cycle de vie est examiné » (ISO 2008).

Le système de dépollution interagit avec ces entités, échangeant des services pour réaliser sa mission. Ces services définissent les limites du système et montrent ses interactions avec d'autres. Chaque service englobe des flux (matière, données, énergie) et des liens facilitant ces échanges. Ces éléments soulignent certaines fonctions que le système de dépollution doit assumer, comme gérer les flux, traiter les données ou stocker de l'énergie. Ils nécessitent également une ou plusieurs interfaces pour assurer les échanges et maintenir l'interopérabilité du système au sein de son environnement.

En résumé, il est crucial de souligner qu'un système de dépollution doit opérer avec un objectif précis. Comme le montre la Figure 16, la situation S1 représente l'état initial du site industriel, soit la situation du territoire avant toute implantation industrielle. Par hypothèse, S1 est l'état idéal à atteindre après la dépollution. S2 représente la situation jugée suffisante par l'ensemble des parties prenantes en termes de sécurité, coûts, délais, etc. S2 diffère généralement de S1, ce parcours étant nommé trajectoire satisfaisante. Ces boucles sont indépendantes de l'évolution temporelle définie tant dans le modèle de cycle de vie que dans celui des modes opérationnels.

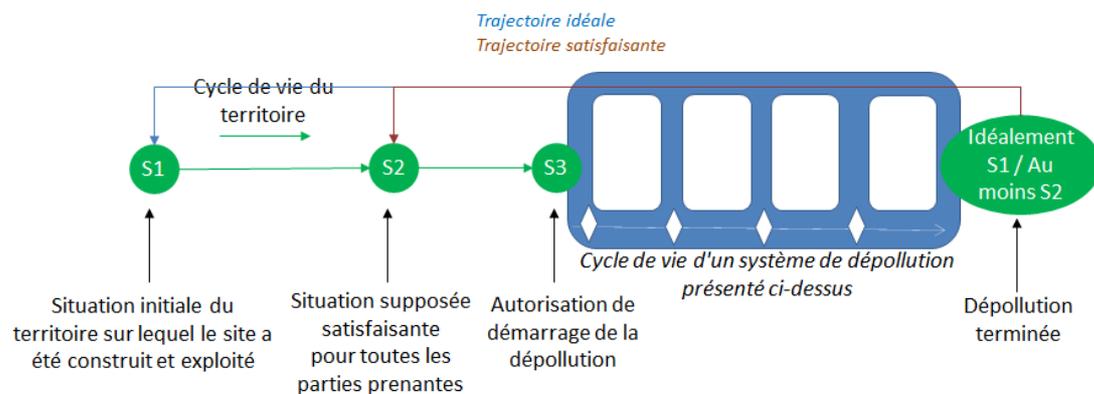


Figure 16: Le sur-système territorial d'un système de dépollution

### 4.2.3. Cycle de vie d'un système de dépollution

Tout système de dépollution passe par un ensemble d'états successifs qui doivent être clairement identifiés et suit des étapes d'évolution qui se chevauchent parfois à des degrés divers. Cela conduit à deux modèles complémentaires :

#### 1) Un modèle de cycle de vie

La Figure 17 détaille ce cycle de vie structuré en quatre phases principales, articulées autour de jalons génériques pour une gestion optimale d'un système de dépollution. Ce cycle de vie met également en lumière deux périodes clés pouvant se juxtaposer partiellement : Le « design time » (période de conception où le système de dépollution est imaginé, dessiné et planifié) et le « run time » (correspondant à l'exécution réelle du système). Les phases se déclinent comme suit :

**L'espace du problème :** Cette phase initiale a pour objectif la caractérisation complète du système de dépollution. Elle englobe l'identification des zones d'origine de pollution, une évaluation des risques toxicologiques et sanitaires, les données géologiques et hydrogéologiques pertinentes, et dresse le cadre des besoins et limites du système envisagé.

**L'espace des solutions :** Orientée vers la recherche de solutions, cette étape s'attelle à recenser les besoins des parties prenantes, puis à les transformer en exigences spécifiques. Il s'agit ici d'affiner le périmètre du système de dépollution, de rassembler les ressources nécessaires et d'identifier la solution la plus adéquate. Elle englobe la validation de la faisabilité technique et financière, la conduite de tests et essais, tout en se basant sur les informations de la phase précédente.

**La phase d'exécution :** Une fois la solution préliminaire approuvée, cette phase s'intéresse à l'implémentation concrète du système de dépollution. Elle nécessite une adaptabilité continue, car le système pourrait nécessiter des modifications, que ce soit en termes d'opérations, d'activités de surveillance, ou d'intégration de nouvelles parties prenantes. De plus, la nature dynamique de cette phase signifie que les projets de dépollution peuvent connaître des changements, tels que des pauses, des arrêts ou l'introduction de nouvelles initiatives.

**La fin de vie :** Marquant la conclusion du cycle de vie, cette phase intervient une fois tous les objectifs atteints. Elle se focalise sur la désintégration des composants du système de dépollution. Pour finir, un retour d'expérience final est établi, fournissant des enseignements précieux pour les futurs projets de dépollution.

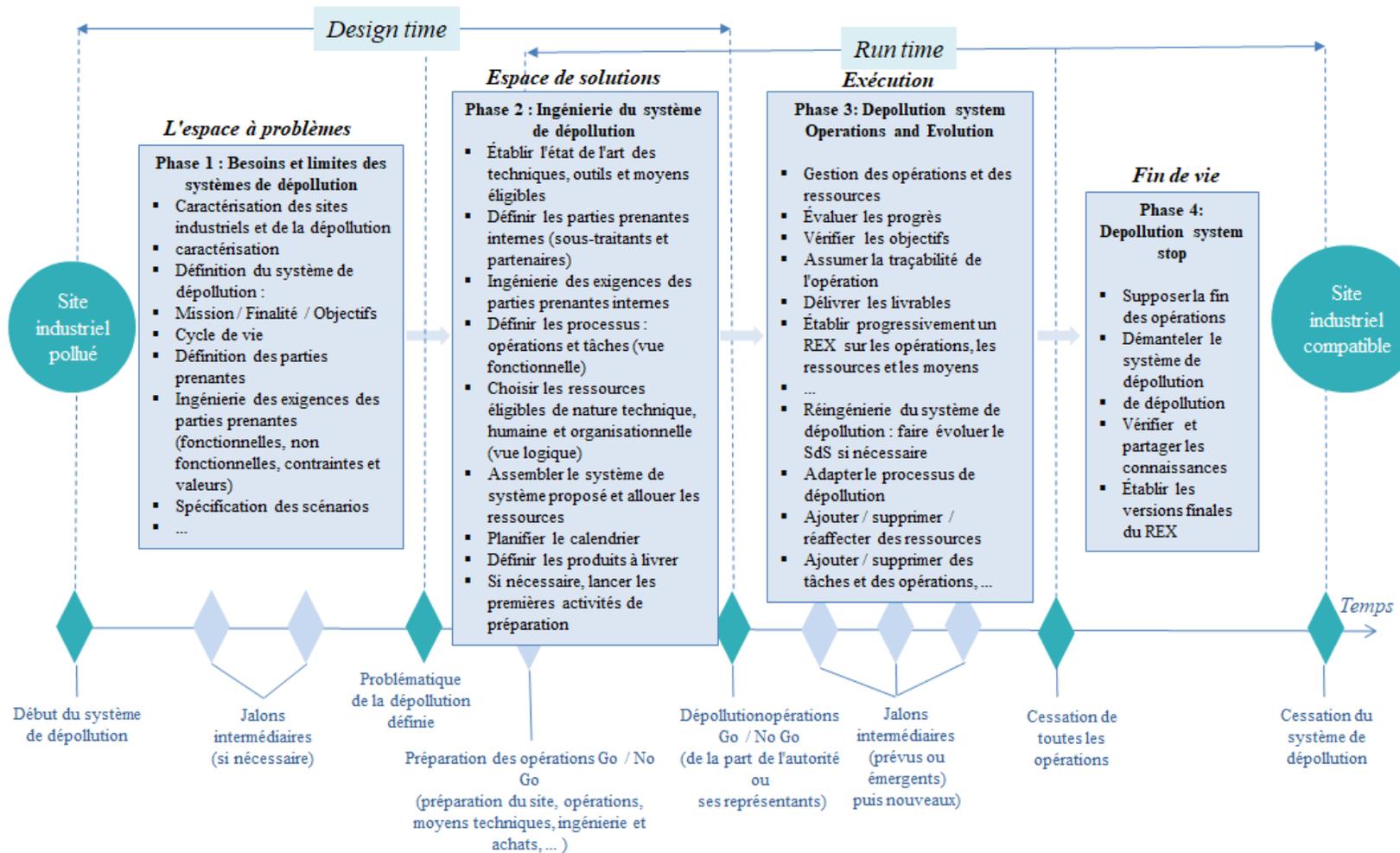


Figure 17: Phases d'évolution du système de dépollution (cycle de vie)

## 2) Un modèle de comportement

Il illustre les modes opérationnels typiques d'un système de dépollution. La Figure 18 offre un aperçu de ce modèle, mettant en avant quatre modes qui retracent la création, l'exécution, l'évolution, puis la dissolution d'un DS. À titre d'exemple simplifié, ce schéma présente une synergie spécifique entre deux composants, E1 et E2.

Tout débute avec le mode de création, qui se concentre sur l'identification des compétences requises. On sélectionne ensuite des organisations dont les capacités correspondent aux compétences ciblées, en tenant compte de critères tels que le coût et le calendrier. Ces entités sont par la suite structurées pour former une architecture optimale (Jaradat, Keating, and Bradley 2014).

Une fois ces composants identifiés et organisés, le mode d'opération est enclenché. Durant cette phase, les composants collaborent et coopèrent ensemble pour atteindre l'objectif premier du DS. Ils échangent et gèrent divers flux : données, informations, énergie, ressources humaines, etc., en harmonie et en respectant des normes d'interopérabilité (Mallek, Daclin, and Chapurlat 2012).

Après cette phase d'exploitation, le modèle entre dans le mode évolutif. Ce dernier met en exergue la flexibilité et l'adaptabilité du DS. C'est durant cette phase que des changements comme le remplacement du composant E2 par un nouveau composant, E3, se manifestent. Ces modifications illustrent le dynamisme inhérent à un SdS.

Finalement, le modèle se clôture avec la dissolution des composants une fois la mission globale achevée.

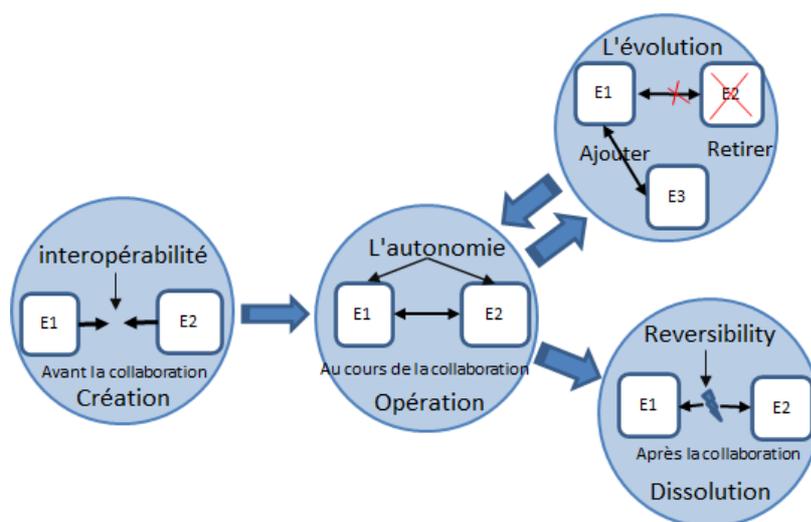


Figure 18: Modes opérationnels du système de dépollution

Les Figure 17 et Figure 18 montrent deux modèles complètement interdépendants, révélant deux points de vue sur le comportement attendu du système de dépollution. Le système de dépollution est impacté à la fois par les actions et la structure du premier modèle et l'organisation du second. La modification de l'un impact nécessairement l'autre.

#### **4.2.4. Les parties prenantes d'un système de dépollution**

Il est impératif d'identifier l'ensemble de ces parties prenantes afin de définir clairement leurs rôles et les interactions qui existent entre elles. Chaque élément du système de dépollution devrait être représenté par une ou plusieurs de ces parties prenantes. Chacune d'entre elles devrait également avoir la capacité de formuler clairement ses besoins, valeurs et contraintes. Ces acteurs proviennent de divers domaines disciplinaires, ce qui peut entraîner des complexités lors de collaborations multidisciplinaires. Il devient donc primordial de saisir, harmoniser et aligner les besoins, valeurs et perspectives de chaque acteur.

Dans cette optique, une classification des parties prenantes inspirée de (Gomez Sotelo et al. 2018) est suggérée. Cette classification comporte 11 catégories distinctes de parties prenantes. Chaque partie prenante, qu'elle soit concernée, impliquée ou impactée, se retrouve dans l'une de ces catégories. Classer les parties prenantes et les regrouper dans des catégories clairement définies dès le début enrichit la gestion d'un projet. Cette démarche apporte une organisation et une clarté qui facilitent la communication, tout en permettant une anticipation plus aisée des besoins spécifiques de chaque entité impliquée. Elle aide également à optimiser l'allocation des ressources, qu'elles soient temporelles, financières ou humaines, en fonction des besoins identifiés. De plus, la classification précoce des parties prenantes offre une meilleure anticipation des risques potentiels, comme les conflits ou désaccords, tout en simplifiant le processus de prise de décision grâce à une compréhension claire des impacts sur chaque groupe. Enfin, cette organisation facilite le suivi des interactions et feedbacks, assurant que les préoccupations de chaque partie prenante soient prises en compte tout au long du projet.

Cela pourrait être illustré par l'exemple de la dépollution des installations industrielles nucléaires en France. La classification des parties prenantes met en évidence : l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), la Cour des comptes et l'Agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) comme étant les "entités d'autorité" qui imposent les "exigences générales". On trouve aussi les associations

opposées à l'énergie nucléaire comme un autre type sous le nom de "opposants". Le reste des acteurs identifiés dans cet exemple sont répertoriés dans le Tableau 7.

*Tableau 7: Inventaire des parties prenantes établi à partir d'une liste générique (exemple de site nucléaire)*

<i>Type</i>	<i>Entité</i>
Législateur, autorité de régulation	ASN, IRSN, ANDRA, Cour des comptes, partenaires sociaux, comité d'entreprise
Propriétaire ou investisseur	Propriétaires d'installations classées pour la protection de l'environnement ICPE (activités nucléaires) et d'installations nucléaires de base (INB)
Chef de projet ou sponsor du projet	Pouvoir adjudicateur ou entrepreneur général
Consommateur	Opérateur nucléaire
Opérateur / utilisateur	Entité chargée de la mise en œuvre du projet = chef de projet
Chef de projet et équipe de projet	Maître d'ouvrage/Maître d'œuvre
Fournisseur principal	Entreprises spécialisées dans la dépollution
Fournisseurs secondaires	Entreprises spécialisées dans la fourniture d'équipements de dépollution
Suivi, contrôle, validation	Personnes compétentes en radioprotection
Public	Commission locale de l'information,
Personnes contre le système ou malveillantes	Associations opposées à l'électronucléaire

Une fois les parties prenantes correctement identifiées et classifiées pour une visibilité optimale, il est essentiel d'examiner les dynamiques d'influence entre elles. Dans certaines circonstances, une organisation peut avoir le pouvoir d'influencer les actions d'autres entités avec lesquelles elle est en relation. C'est ici qu'intervient le concept de la « sphère d'influenc », défini par l'ISO 26000 comme « l'ensemble des relations, qu'elles soient politiques, contractuelles, économiques ou autres, à travers lesquelles une organisation peut influencer les décisions ou actions d'individus ou d'autres organisations » (26000 ISO 2010).

Il est essentiel de cartographier l'étendue de l'engagement et le pouvoir d'influence des parties prenantes. Cette démarche offre une perspective complète sur l'ampleur des interventions, la capacité décisionnelle et la mise en œuvre d'initiatives, éclairant ainsi sur la manière d'opérer efficacement en collaboration. Pour représenter ces rapports d'influence, nous suggérons une méthode pondérée.

L'exemple suivant d'un modèle d'influence concerne un projet de dépollution nucléaire, mettant en évidence les acteurs clés (Mabrouk, Sperandio, and Girard 2014). L'approche propose une matrice 11x11 qui répertorie les parties prenantes précédemment identifiées, comme illustré à la Figure 19. Cela montre les influences, les dépendances et les implications de chaque type de parties prenantes, et donc les intérêts des organisations.

Chaque cellule  $X_{i,j}$  de la matrice indique le taux d'influence que la partie prenante associée à la ligne  $i$  a sur la partie prenante associée à la colonne  $j$ , selon une échelle qualitative de 0 à 2 :

- 0 si la partie prenante  $i$  n'a aucune influence sur la partie prenante  $j$ ,
- 1 si la partie prenante  $i$  a le pouvoir de remettre en question les processus opérationnels de la partie prenante  $j$ ,
- 2 si la partie prenante  $i$  a le pouvoir de remettre en question les processus décisionnels, voire l'existence de la partie prenante  $j$ .

Cette matrice montre que, le sponsor du projet est le plus dépendant, tandis que le législateur et le propriétaire sont les plus influents dans un DS.

Of \ On	Legislator, regulator	Owners / investor	Project manager / sponsor	Consumers	Operators or users	Project manager / team	Main supplier	Secondary supplier	Monitoring, control, validation	Public	Associations opposing	Direct influence
Legislator, regulator		2	2	2	1	1	1	0	2	1	0	12
Owners / investor	0		2	1	1	1	1	1	0	0	0	7
Project manager / sponsor	0	0		0	0	2	2	2	0	0	0	6
Consumers	0	0	2		0	0	2	2	0	0	0	6
Operators or users	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
Project manager / team	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	1
Main supplier	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
Secondary supplier	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
Monitoring, control, validation	0	1	1	1	0	0	0	0		0	0	3
Public	0	0	1	1	0	0	0	0	0		0	2
Associations opposing	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		2
Direct dependency	0	3	9	6	3	4	6	5	2	1	0	

Figure 19: Exemple de matrice d'influences directes pour la dépollution d'une installation nucléaire

L'évaluation du pouvoir des parties prenantes sert à déceler l'influence mutuelle entre ces acteurs, ainsi que l'impact de leurs actions et décisions les uns sur les autres. Cet outil est particulièrement pertinent pour identifier les obstacles à la modification des comportements, le renforcement des capacités et la lutte contre les déséquilibres. Il aide également à reconnaître qui pourrait être influençable, avec qui il pourrait être nécessaire de négocier, ou qui, éventuellement, pourrait devoir être mis à l'écart.

La pondération relative de chaque partie prenante influence tant la communication que l'évaluation de leurs valeurs, exigences et contraintes vis-à-vis

des initiatives de dépollution. Par conséquent, comprendre ces dynamiques au cours du projet permet de réduire les risques associés à une collaboration inefficace. Reconnaître cette pondération est crucial pour définir comment aborder la structuration du système de dépollution.

L'identification du concept de "parties prenantes" est d'une pertinence cruciale. En effet, la démarche consistant à identifier, classer et déterminer le pouvoir et l'influence mutuelle de chaque partie prenante renforce considérablement la gestion et la conception des projets de dépollution. Une compréhension claire des rôles et des dynamiques entre les parties prenantes permet d'anticiper les besoins, d'harmoniser les objectifs et d'optimiser les ressources, assurant ainsi la réussite et l'efficacité des initiatives de dépollution.

#### **4.2.5. Les exigences des parties prenantes**

Dans une approche d'ingénierie système, deux éléments clés sont essentiels pour orienter efficacement les parties prenantes :

1) L'établissement et le respect rigoureux d'un référentiel d'exigences, qui détaille les besoins, valeurs et contraintes de chaque partie prenante.

2) La réalisation de revues structurées, favorisant une progression coordonnée de toutes les parties prenantes durant les processus d'ingénierie. Ces revues, envisagées comme des moments d'échange privilégiés, doivent être méticuleusement organisées pour chaque projet.

Les exigences pour les approches d'ingénierie sont alors utilisées (Vierlboeck and Roshanak R. Nilchiani 2021), (Spichkova, Tawfeeq Alsonoosy, and James Harland 2021), fournissant le référentiel d'exigences attendu. Dans le domaine de la dépollution, articuler les exigences des parties prenantes est une tâche délicate en raison des défis associés à la gestion de nombreuses dimensions. Au-delà des prérequis standards pour l'élaboration d'une méthode comme décrit dans (Da Silva 2021), la méthode que nous proposons met l'accent sur une matrice présentée à la Figure 20. Cette matrice des Exigences vise à guider les parties prenantes pour exprimer plus facilement leurs exigences et rendre la communication plus abordable. En effet, il a été démontré que la dépollution dépend de plusieurs facteurs (historique d'un site industriel, type de polluant, futur usage du site, législation, etc.). Pour cette raison, une matrice à 4×3 dimensions a été définie, qui pourrait contenir les critères les plus pertinentes et rendre le problème complexe plus facilement compréhensible puis gérable. Cette matrice ne

comporte que quatre axes pour éviter de présenter trop de dimensions qui ne peuvent être gérées :

- **L'infrastructure** : Tout ce qui concerne le site industriel, y compris sa localisation, ses caractéristiques, son histoire et ses composants ;

- **Polluant** : Toute manifestation physico-chimique, niveau de toxicité et autres caractéristiques connexes des polluants qui peuvent avoir un effet sur les humains, la flore et la faune, et globalement sur l'environnement ;

- **Techniques de dépollution** : Les techniques adaptées à des contaminants particuliers, ainsi que celles qui doivent être combinées en fonction du polluant (excavation, oxydation in situ, etc.) ;

- **Environnement** : Tous les éléments qui entourent le système de dépollution (tout facteur qui ne correspond pas à l'une des dimensions précédentes peut être classé sous la dimension environnementale).

Les 4 lignes de la matrice situent le problème, et les parties prenantes le spécifient. Sur chaque axe, chaque exigence peut être fonctionnelle, non fonctionnelle, une contrainte ou de Vérification et de Validation (V&V). Par exemple, les contraintes externes sont liées à la ligne environnementale, tandis que les contraintes internes sont liées à la ligne d'infrastructure. Enfin, cette matrice doit permettre aux parties prenantes de raisonner sur les caractéristiques principales de l'exigence, qui peuvent être multiples, mais sont limitées ci-après à trois dimensions :

- **Temps** : L'exigence est définie en fonction du temps, en d'autres termes, cette exigence change-t-elle avec le temps ? À un moment donné  $t = n$ , avons-nous la même exigence que pour  $t = 0$  ? Par exemple : En raison des réactions chimiques avec son environnement, la composition chimique d'une substance polluante varie avec le temps, nécessitant des changements de technique de dépollution à tout moment.

- **Espace** : De la même manière, les parties prenantes expriment leurs exigences en fonction de l'espace. En effet, le changement d'espace nécessite parfois un changement d'exigences. Par exemple, sur le même site industriel, il existe différents types de sols (argile, sable, etc.) ; leurs caractéristiques modifient le comportement du système de dépollution.

- **Conditions** : Évidemment, les exigences doivent dépendre de conditions spécifiques, notamment des conditions opérationnelles. Par exemple, un périmètre strictement défini est nécessaire pour protéger l'environnement de la dépollution, mais les sorties de secours doivent être facilement accessibles en cas d'incident.

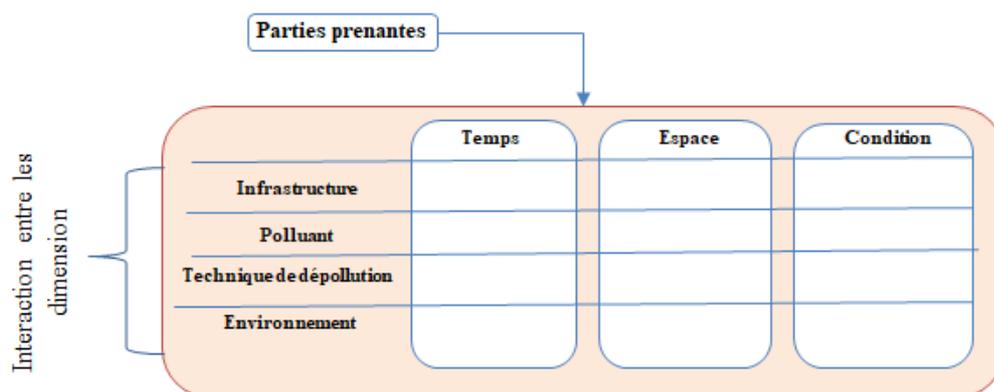


Figure 20: Matrice des exigences

Il est essentiel de disposer de la matrice des exigences, mais il est tout aussi crucial d'avoir des scénarios appropriés. En effet l'existence d'incertitudes, la multiplication des interdépendances, l'accélération du changement dans certains domaines (industriel, politique, technologique, etc.), la complexité et l'émergence possible de comportements et de propriétés inattendus (par exemple, manque de sécurité) d'un système de dépollution sont autant de facteurs qui ont une incidence sur toute exigence proposée par les parties prenantes. Pour cette raison, la mise en œuvre d'une méthode de scénario est cruciale dans le but de concevoir des futurs possibles et d'explorer les chemins qui y mènent afin de clarifier les exigences proposées. Sous la forme de scénarios, il est possible de décrire l'évolution du système de dépollution, et d'identifier, à partir d'une situation présente et des tendances dominantes, une série d'événements conduisant de manière logique (nécessaire) à un futur possible. Trois types de scénarios sont ainsi retenus, focalisant l'attention des parties prenantes :

- Nominal : décrit le fonctionnement normal attendu dans une situation optimale.
- Incidentel : décrit le fonctionnement dégradé causé par une intervention interne.
- Accidentel : décrit le fonctionnement dégradé causé par une intervention externe.

Durant l'ingénierie des exigences, il est primordial d'identifier des concepts pertinents pour la détermination des exigences, en accordant une importance particulière à l'expression des besoins des parties prenantes. Il est également essentiel de définir les scénarios requis, ce qui nous permettrait de répondre à de nombreux problèmes déjà identifiés au chapitre 1. En procédant de cette manière, non seulement nous pouvons réduire les coûts, directement ou indirectement, mais les processus de dépollution seront également plus structurés et organisés. De plus,

cela facilite une meilleure coordination entre les parties prenantes, assure une mise en œuvre plus fluide des projets, et renforce l'efficacité globale des interventions.

#### **4.2.6. Les interfaces**

Les interfaces sont un élément central de tout système, permettant son interaction efficace avec d'autres systèmes tout au long de son cycle de vie. On définit une interface comme la « *frontière, qu'elle soit logique ou physique, établie entre deux ou plusieurs composants ou entre un système et son environnement. Elle facilite les échanges, garantit une communication fluide et préserve l'intégrité durant tout le cycle de vie du système* » (Fosse and Delp 2013). La détection et la conception des interfaces revêtent une importance cruciale pour tout Système de Systèmes (SdS) et, plus spécifiquement, pour un système de dépollution. En effet, des interfaces de natures diverses (qu'elles soient purement techniques, organisationnelles, ou qu'elles prennent la forme de protocoles de communication) jouent un rôle essentiel pour assurer la circulation de l'information et tisser des connexions entre les composants, sous-systèmes du système de dépollution, et les autres systèmes environnants. L'objectif est de garantir que l'ensemble du système opère en parfaite harmonie et efficacité. Indépendamment de leur nature ou de leur degré de complexité, les sous-systèmes doivent pouvoir interagir de manière fluide. Il est par conséquent primordial de concevoir des systèmes de dépollution intrinsèquement interopérables.

L'interopérabilité peut poser des défis lors des échanges, en particulier si des lacunes de communication se manifestent à divers niveaux : entreprise, processus et activité (Panetto and Boudjlida 2006). Pour garantir des interactions fluides, sans nécessiter d'efforts d'interfaçage spécifiques et pour assurer une dynamique harmonieuse, il est impératif de prendre en compte l'aspect de l'interopérabilité. Afin de sensibiliser les parties prenantes à ces potentielles difficultés, la méthode DEPOSE met en avant un modèle détaillé dans le Tableau 8. Ce modèle distingue clairement trois niveaux distincts d'analyse :

- Le premier niveau s'articule autour des entreprises. Il se penche sur leur mode de communication, leurs capacités, ainsi que leurs interfaces organisationnelles.

- Le deuxième niveau se concentre sur les processus : leurs entrées/sorties, leurs objectifs, ainsi que leurs indicateurs de performance comme le coût, la qualité et la durée.

- Enfin, le troisième niveau traite des activités, évaluant leurs entrées/sorties, les ressources requises et leurs indicateurs de performance spécifiques.

De plus, le modèle met en évidence trois catégories de flux : DIC, matière et énergie. Les interactions varient en fonction des phases du cycle de vie du système de dépollution. C'est pourquoi, pour une gestion efficace des interfaces, il est essentiel de traiter séparément les phases de conception (Design time) et d'exécution (Run time).

Tableau 8: Guide de caractérisation des interfaces

Qu'est-ce qui est échangé ? En quelle phase ? À quel niveau ?	Données / Informations / Connaissances		Matière		Énergie	
	Design time	Run time	Design time	Run time	Design time	Run time
Entreprise	Interfaces	Interfaces	Interfaces	interfaces	interfaces	interfaces
Processus	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces
Activité	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces	interfaces

Par exemple, les spécifications représentent une interface essentielle entre le propriétaire d'un site industriel (entreprise P) et le prestataire en charge de la dépollution (entreprise Q). Elle traduit les exigences et les contraintes pour répondre aux attentes des parties concernées. De par sa nature, cette interface est intrinsèquement complexe. Pour mettre en pratique notre modèle, le Tableau 9 met en évidence la concordance des capacités entre ces deux entreprises.

Identifier et comprendre le concept des interfaces est primordial dans la gestion et la conception des projets de dépollution. En effet, ces projets, souvent complexes, rencontrent plusieurs défis : incompatibilités techniques entre les différentes technologies de dépollution, coordination entre divers acteurs et parties prenantes, et respect des réglementations environnementales changeantes. Une interface bien conçue et gérée sert de point de jonction efficace entre ces différents éléments, assurant une communication fluide et une intégration harmonieuse des systèmes. Par exemple, face à un problème d'intégration d'une nouvelle technologie de dépollution, une interface bien définie permettrait une intégration en douceur avec le système existant, évitant ainsi des coûts de reconfiguration élevés. De plus, en assurant une gestion efficace des interfaces, on facilite la coordination entre les différents acteurs, réduisant ainsi les risques d'incompréhension et de retards dans le projet. En somme, maîtriser la notion d'interface est une clé pour faire face aux problèmes courants des projets de dépollution et garantir leur réussite.

Tableau 9: Exemple de l'utilisation du Guide de caractérisation des interfaces

<i>Entreprise P</i>	<i>Entreprise Q</i>
(Niveau, flux, phase) = (Entreprise, DIC, design time)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Précisez et définissez les objectifs ainsi que la finalité du projet.</li> <li>• Élaborez le contexte du projet en détaillant les contraintes techniques, les parties prenantes, les exigences spécifiques, la charte graphique, le livrable attendu, etc.</li> <li>• Énumérez l'ensemble des besoins et des spécificités du projet.</li> <li>• Identifiez les contraintes, les acteurs, ainsi que les interactions, qu'elles soient internes ou externes au projet.</li> <li>• Compilez tous ces éléments dans un document unique pour garantir une information homogène à toutes les parties prenantes.</li> <li>• Répartissez les missions entre les différents intervenants.</li> <li>• Favorisez les consultations pour stimuler la compétition entre les différents prestataires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprendre le contexte du projet, l'environnement, le système industriel (se déplacer, rechercher des documents, enquêter, évaluer...).</li> <li>• Cerner les besoins du projet.</li> <li>• Définir les capacités nécessaires et acceptables pour l'entreprise.</li> <li>• Spécifier les livrables.</li> <li>• Estimer les coûts et les délais.</li> <li>• Dimensionner l'offre commerciale.</li> <li>• Rédiger la proposition.</li> <li>• Négocier l'offre.</li> <li>• Planifier en interne les ressources du projet (Humaines / Techniques).</li> <li>• Proposer des alternatives potentielles pour démontrer son engagement en matière de qualification et de certification.</li> </ul>

#### 4.2.7. Architecture générique d'un système de dépollution

Une opération de dépollution est décrite par une combinaison ou un agencement de plusieurs fonctions. Cet agencement de fonctions correspond à une configuration spécifique, un intervalle d'activité, l'origine du polluant, l'infrastructure, etc. Notre proposition est la décomposition du système de dépollution jusqu'à l'obtention de fonctions généralisables (Lemazurier, Chapurlat, and Grossetête 2017). Comme le montre la Figure 21, la fonction est définie comme une activité de transformation. Le flux d'entrée est transformé en flux de sortie (matière, énergie, information). La fonction est caractérisée dans un cadre de référence de : temps, espace et forme. Elle est contrainte par des moyens de contrôle. L'activité est assurée par un flux de ressources. Chaque fonction élémentaire  $F$  est définie par une transformation (notée  $F$ ) :

$$O = F (I, t, R, C) \quad (1)$$

Après une revue de littérature de plusieurs projets de dépollution (terrains affectés par le mercure, zones touchées par les produits chimiques, pollution par le pétrole, etc.), nous avons pu identifier des fonctions génériques qui peuvent être utilisées dans différents projets de dépollution. L'objectif de ces fonctions génériques est de décontaminer un site à travers un processus en 7 étapes : identifier le polluant / évaluer les risques / sécuriser le site / mesurer et analyser / dépolluer / gérer les déchets / contrôler, comme le montre le Tableau 10. Ces fonctions ont été développées dans le but d'industrialiser le processus du système de dépollution.

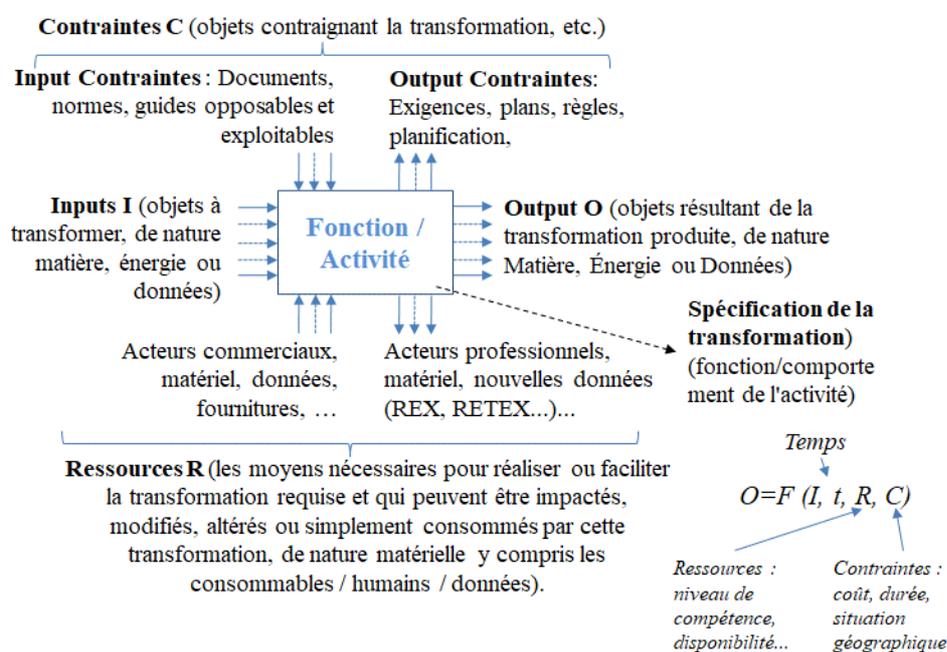


Figure 21: Représentation des flux, des contraintes et des ressources de la fonction F

Dès l'identification d'un polluant, il est impératif d'évaluer le danger et le risque qu'il représente, en mesurant ses impacts potentiels sur les individus et l'environnement. Suite à cette évaluation des risques, une réflexion s'impose sur les stratégies à adopter pour maîtriser ces menaces, dans le but de sécuriser le site concerné. Une analyse approfondie de la situation permettra ensuite de sélectionner la méthode de dépollution la plus adéquate. Les résidus résultant de ce traitement seront traités dans le cadre de la fonction « gestion des déchets ». Enfin, l'efficacité de la solution mise en place sera rigoureusement surveillée et validée.

Tableau 10: Inventaire des fonctions élémentaires d'un système de dépollution

<i>Fonction</i>	<i>Description</i>
Identifier le polluant	La fonction d'identification du polluant consiste à collecter, gérer et accroître les connaissances, les informations et les données.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identifier les polluants éventuels et les caractériser : analyse des données historiques (documents officiels, cartes, plans) ;</li> <li>○ Déterminer la cause et la source de la pollution : pollution accidentelle ou chronique, durée de la contamination, etc. ;</li> <li>○ Caractériser les conditions physico-chimiques et hydrogéologiques du site : analyse des cartes géologiques disponibles, caractérisation des différentes couches géologiques présentes sur le site, identification et caractérisation de la nappe phréatique.</li> </ul>
Évaluer les risques	<p>Il s'agit d'évaluer le risque causé par la pollution du site industriel. Ce type d'étude permet d'établir une certaine hiérarchie des risques et donc d'évaluer la priorité de traitement. Les trois facteurs clés de cette analyse sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La source de pollution : la nature physico-chimique du polluant, sa quantité, sa toxicité, etc.</li> <li>○ Vecteurs : il s'agit des voies de transport et de dispersion du polluant.</li> <li>○ La cible : elle peut être située sur le site lui-même ou autour de celui-ci. Selon la nature du polluant, la cible peut être la population environnante ou l'écosystème.</li> </ul>
Sécuriser le site	Déterminer le programme de gestion des risques nécessaire pour les risques identifiés concernant le polluant. Assurer la sécurité des employés, construire des barrières, des bandes d'avertissement, des barrages routiers, etc.
Mesurer et analyser	Cette étape consiste à déterminer les mesures pertinentes à collecter pour bien comprendre l'ampleur du problème à résoudre. Quantifier concrètement le problème, l'objectif de performance ou la productivité actuelle, choisir les indicateurs qui répondent aux objectifs et aux résultats attendus. Il est ensuite nécessaire d'analyser ces mesures afin d'évaluer l'écart entre la situation actuelle et les objectifs définis.
Dépolluer	<p>Le choix d'une technique de dépollution fait intervenir de nombreux critères, tant techniques qu'économiques. En résumé, l'étude de faisabilité et le choix d'une méthode de dépollution représentent un processus complexe, qui doit prendre en compte différents facteurs souvent contradictoires. Cette fonction assure les tâches suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Choisir la solution technique la plus adaptée pour réduire la pollution.</li> <li>○ Sur la base d'un diagnostic aussi exhaustif que possible et d'une analyse précise des risques.</li> <li>○ Combiner plusieurs techniques pour traiter la variabilité éventuellement observée afin de gérer le projet efficacement.</li> </ul>
Gérer les déchets	Les déchets pollués et toxiques sont générés par la fonction de dépollution. La gestion de ces déchets fait partie du système de dépollution. Cette fonction prend en compte non seulement le tri, le transport, le stockage, le conditionnement et le traitement des déchets mais elle assure également l'orientation vers la valorisation ou l'élimination des déchets.
Contrôler	Contrôler la mise en œuvre de la solution et vérifier que les objectifs fixés dès le départ sont atteints, puis donner la possibilité de rectifier les processus mis en place si les résultats escomptés ne sont pas obtenus.

## • Architecture fonctionnelle = {fonctions, flux}

Le système de dépollution est vu comme un arrangement dynamique de ses fonctions et flux pour fournir les services attendus. L'objectif de cette architecture fonctionnelle est de représenter le « Quoi ? » du système mais pas le « Comment ? » du système, car la solution viendra plus tard (architecture physique). L'architecture fonctionnelle du système de dépollution est modélisée avec un EFFBD (Enhanced Functional Flow Block Diagram) (Campean and Yildirim 2017). La Figure 22 représente les fonctions exécutées par le système de dépollution et l'ordre dans lequel l'exécution doit avoir lieu. Cette figure représente également les flux échangés entre les fonctions, dont certains correspondent aux services représentés dans le modèle contextuel montré Figure 15.

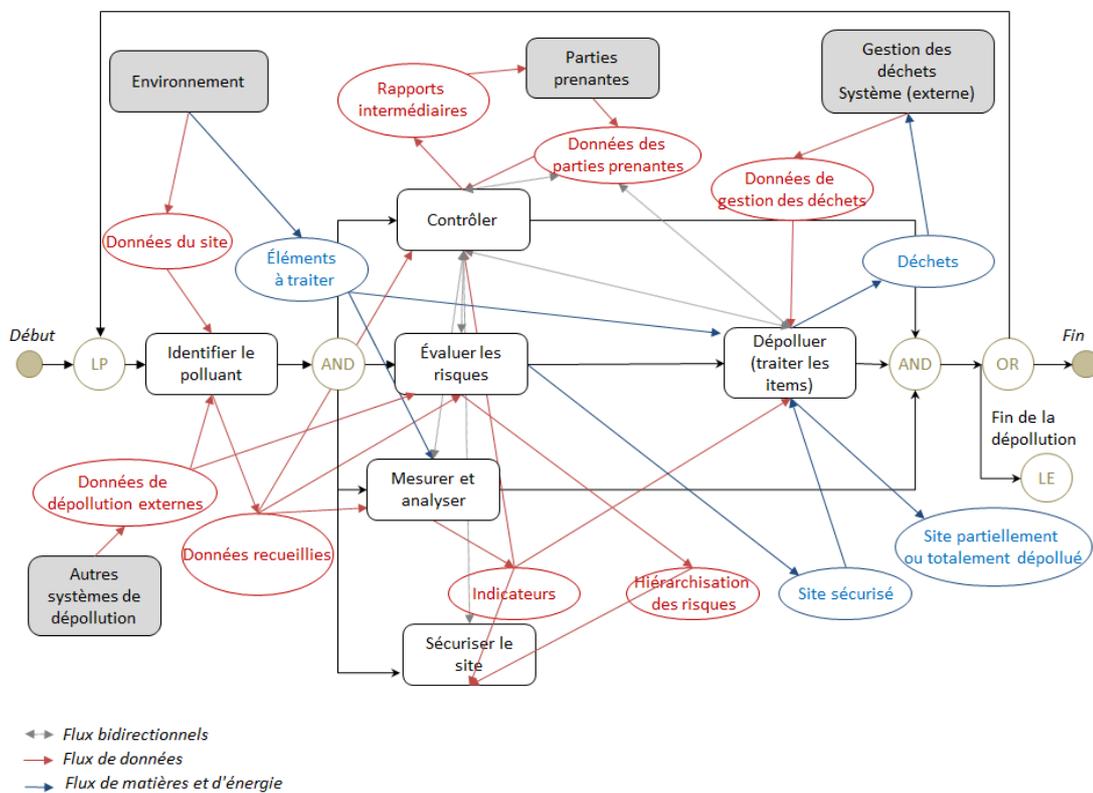


Figure 22 : Architecture fonctionnelle du système de dépollution

## • Architecture physique = {composants, liens}

Après avoir formalisé l'architecture fonctionnelle, nous allons définir les composants du système et leurs interrelations. L'architecture physique est en effet perçue ici comme un ensemble de composants physiques (tels que des systèmes, des sous-systèmes, des équipements, des logiciels, etc.) qui sont interconnectés et interagissent pour réaliser les services du système. L'architecture physique doit

alors respecter l'architecture fonctionnelle, en ce sens qu'elle doit s'assurer que les fonctions sont fournies comme défini précédemment.

En d'autres termes, cela représente l'organisation fondamentale d'un système de dépollution à travers ses composants, ses liens et ses interfaces, favorisant ainsi une vision constructive du système pour maîtriser sa complexité en le décomposant en éléments interdépendants de même nature. La Figure 23 illustre un modèle d'architecture logique générique qui est cohérent avec l'architecture fonctionnelle fournie dans la Figure 22. Pour cette modélisation, le langage de modélisation PBD (Physical Block Diagram) (Xu, Xing, and Robidoux 2009) a été utilisé. La Figure 23 montre 10 blocs dont 6 décomposent notre système (Système de contrôle, Système de traitement...) et 4 représentent les systèmes d'interface (Territoire, Entreprises...). Ces composants sont reliés par des liens (protocole, capteurs...) et rendus cohérents avec le diagramme contextuel montré dans la Figure 15.

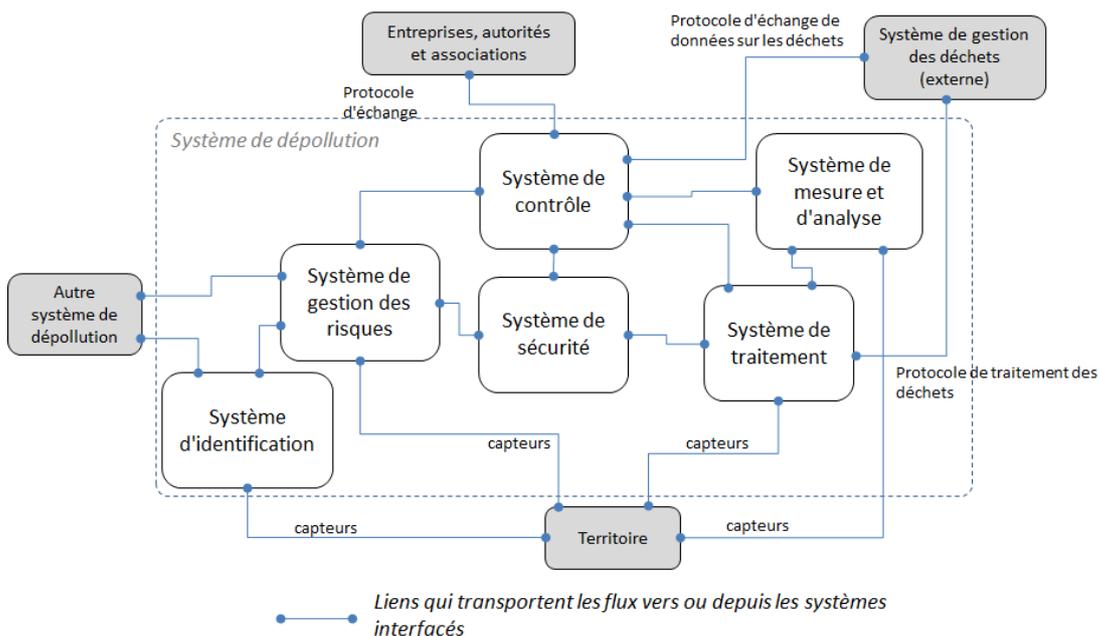


Figure 23: architecture physique d'un système de dépollution

### • **Les architectures allouées**

Les architectures fonctionnelles et physiques ne mettent pas en évidence le fait qu'un système de dépollution est un SdS. L'architecture allouée permet de souligner et de faire ressortir les caractéristiques d'un SdS. Conceptuellement, les architectures allouées (Wasson 2005) découlent du processus suivant :

1) Définir comment chaque fonction, à savoir processus, activité, opération et tâche apparaissant dans l'Architecture Fonctionnelle, peut être réalisée ou

assumée par (c'est-à-dire allouée à) des composants qui ont été sélectionnés et apparaissent alors dans chacune des différentes alternatives des architectures logiques. Ceci conduit à définir comment les flux d'entrée et de sortie de chaque fonction sont eux-mêmes transportés par des liens logiques connectés aux composants alloués. Cette allocation fonctionnelle peut demander l'ajout de nouvelles exigences, essentiellement fonctionnelles, en fonction des choix d'allocation ;

2) Définir comment chacun de ces composants et liens logiques peut ensuite être identifié puis concrétisé sous la forme de composants et liens physiques, ici des entreprises, ou plus précisément des ressources techniques ou applicatives, des processus, des protocoles d'échange, etc. fournis par ces entreprises. Ces composants physiques émergent dans chacune des alternatives des architectures physiques. La deuxième étape d'allocation peut demander l'ajout de nouvelles exigences, fonctionnelles ou non fonctionnelles, en fonction des choix d'allocation et peut induire des changements plus ou moins importants dans l'architecture fonctionnelle proposée. Ainsi, le processus d'allocation reste itératif et sera complété pas à pas. Avec cette architecture allouée, toute conception du développement de l'architecture allouée du système dans laquelle il n'y a pas de schéma clair d'attribution de la "responsabilité" exclusive de chaque composant physique pour satisfaire les exigences fonctionnelles allouées, est considérée comme une mauvaise conception qui peut entraîner des difficultés à déterminer les composants physiques spécifiques qui ont échoué à satisfaire une exigence fonctionnelle donnée.

La Figure 24 met en avant un exemple d'allocation de fonctions à des entités physiques. Cette allocation met en évidence les caractéristiques d'hétérogénéité, de réseaux et d'indépendance du SdS de dépollution. Afin d'accomplir les fonctions du système de dépollution et de spécifier les partenaires potentiels, un appel d'offres est nécessaire. Les partenaires sont choisis en fonction de leurs capacités, comme la compétence, les moyens et les ressources. Trois fonctions peuvent être accomplies par l'entreprise C1. Elle a donc la capacité de fournir des ressources matérielles et immatérielles pour dépolluer. De plus, C1 fonctionne indépendamment avec sa propre fonctionnalité pour identifier le polluant, mesurer les paramètres et contrôler le processus. Comme le système de dépollution évolue, ses besoins et ses exigences peuvent changer. D'où la possibilité que l'entreprise C1 n'ait plus les capacités requises pour fournir les fonctions nécessaires au système de dépollution. Pour cette raison, ces fonctions seront attribuées à une nouvelle entreprise C2.

L'apparition de C2 entraîne une collaboration nécessaire avec C1. Cela est indicatif du caractère hétérogène et connecté d'un SdS. Les fonctions qui peuvent

être fournies à l'origine de manière indépendante par C1 sont maintenant fournies conjointement par C1 et C2. En plus de la perte d'indépendance de C1, cette nouvelle configuration génère de nouveaux flux pour réaliser toutes les fonctions nécessaires au SdS.

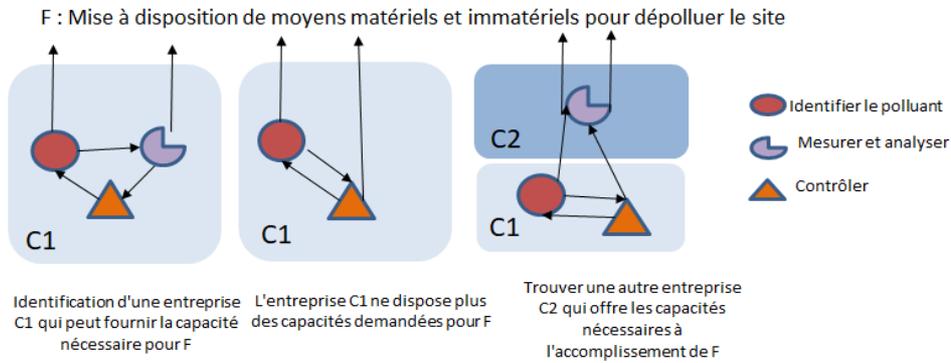


Figure 24: Exemple d'attribution de fonctions à une entité physique d'un système de dépollution

### 4.3. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

La Figure 25 récapitule les concepts discutés précédemment relatifs à un système de dépollution, adressant directement plusieurs des verrous mentionnés au chapitre 1. Un travail identique pour le Depollution Network est proposé au chapitre 5.

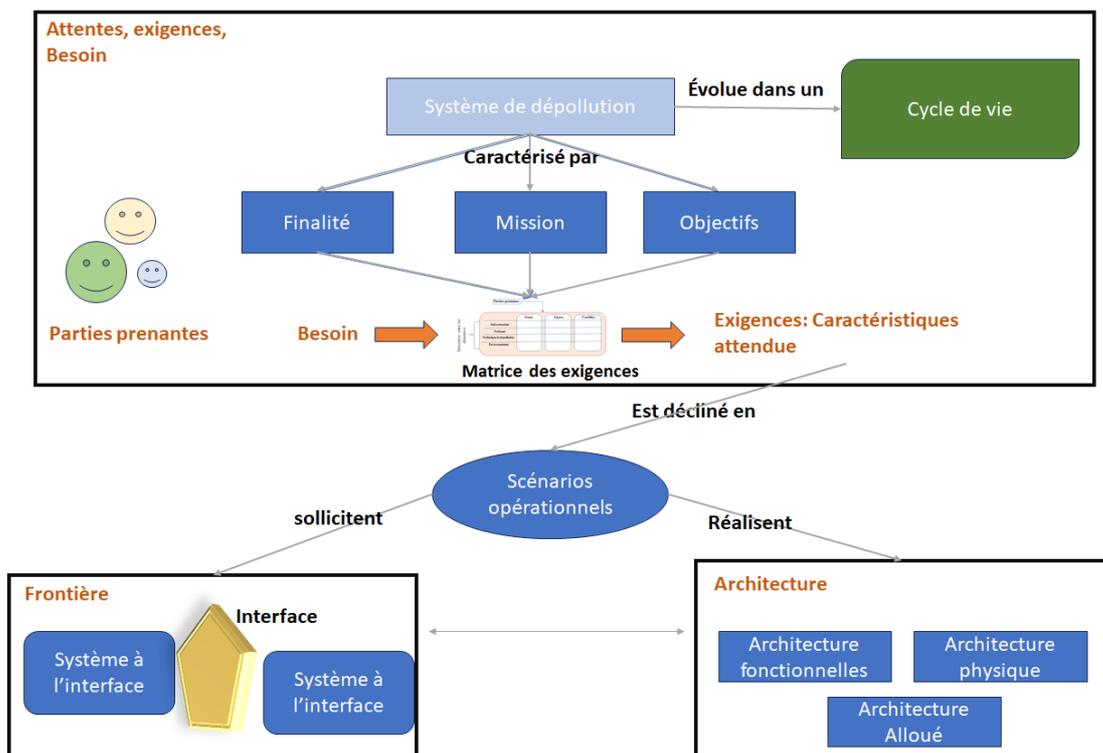


Figure 25: les Concepts identifiés pour un système de dépollution (DS)

## **5. NIVEAU DEPOLLUTION NETWORK : CONCEPT**

## 5.1. INTRODUCTION

Un réseau de dépollution (ou Depollution Network - DN) est formalisé ici comme le système appelé à gérer plusieurs DS, c'est-à-dire le système dans lequel divers DS sont spécifiés puis exploités. Le DN est un ensemble organisé et structuré d'entreprises souhaitant collaborer et partager des valeurs communes dans une concertation totale et harmonieuse, en charge de la préparation, de l'exécution, de la clôture et de la traçabilité de différents DS réalisés éventuellement en parallèle ou en complémentarité les uns avec les autres. DN vise à industrialiser la dépollution qui est encore souvent considérée comme artisanale ou au cas par cas. En l'état, l'objectif principal de tout DN est d'assurer une collaboration multi-partenaire, les partenaires souhaitant rester dans leur domaine d'expertise, de connaissance et de pratique. Cet objectif inclut la garantie de la rentabilité pour chaque partenaire, le respect des attentes en matière de sécurité et de sûreté, l'adhésion aux règles environnementales et réglementaires, ainsi que la traçabilité et la fourniture de livrables vérifiables attestant de la réalisation de tous les objectifs. Enfin, le DN permet de confirmer les transferts de sites industriels dans un état transitoire répondant aux attentes des composantes impliquées. Ses composantes sont donc des entreprises partenaires dont les capacités (techniques, organisationnelles, financières, R&D, etc.) sont jugées pertinentes par rapport aux besoins actuels ou futurs des DS. En fonction du projet, du type de polluant ou de la complexité du site, ces entreprises sont appelées à s'impliquer dans la préparation, l'exécution, la clôture, l'organisation, le pilotage et/ou la traçabilité des projets de dépollution.

## 5.2. DEFIS

Cependant, la dépollution est un domaine où les facteurs de complexité et les défis sont nombreux et variés (Selvakumar et al. 2018). Il s'agit notamment, mais pas exclusivement, de la multiplicité des parties prenantes avec des conflits d'intérêts potentiels, des différents types de pollution et des conditions d'infrastructure, des événements imprévisibles, de l'utilisation et de la maîtrise simultanées de plusieurs techniques de dépollution au sein d'un même projet, des exigences élevées en matière de finances et de ressources, de la complexité des technologies et des méthodes, de l'évolution constante de la législation et de la nécessité avérée d'un suivi régulier et d'une évaluation des risques pendant toute la durée des projets (Ulibarri et al. 2020; Price et al. 2017).

Les impacts potentiels sont nombreux et comprennent : des retards dans l'achèvement du projet (par exemple en raison d'erreurs de planification, de coordination, de budgétisation, de prise de décision ou d'une mauvaise gestion des ressources humaines), un contrôle incertain des coûts et des dépassements de budget, un manque d'engagement et de participation des parties prenantes et un impact environnemental insatisfaisant à la fin des projets (Gray-Cosgrove, Max, and Josh Lepawsky 2015; Leprond 2016).

Pour organiser et gérer efficacement le DN au fil du temps, dans le but d'exécuter simultanément de nombreux DS, il est essentiel de reconnaître que le DN constitue un système de systèmes. Pour parvenir à une gouvernance réussie, Il est nécessaire de revisiter les deux caractéristiques fondamentales qui sous-tendent ce système de systèmes, mais cette fois-ci du point de vue DN (Maier 2009; Boardman and Sauser 2006) :

- **Indépendance opérationnelle** : L'indépendance opérationnelle et managériale est une caractéristique essentielle des composantes de DN (c'est-à-dire les entreprises et organisations partenaires ou membres de DN). Chaque composante fonctionne de manière autonome, avec son propre ensemble de règles, d'objectifs, de priorités et de contrôles opérationnels (Gheorghe et al. 2018). Par conséquent, la communication et la collaboration entre ces composantes peuvent être limitées, ce qui rend difficile la prise de décisions communes et la résolution efficace des problèmes ;

- **Développement évolutif** : l'arrivée ou le départ de composants au fil du temps pour diverses raisons a nécessairement un impact sur les capacités du DN (Vaneman and Jaskot 2013). L'intégration de nouveaux composants peut effectivement étendre et enrichir l'éventail des capacités et des ressources du DN. Cependant, elle pose des défis importants en termes d'interopérabilité et de sécurité. Inversement, la suppression d'un composant créera des lacunes dans la chaîne des compétences, des services, de la coordination des activités et des interactions avec d'autres composants.

L'examen de ces défis montre clairement que l'organisation et la gestion d'un DN n'est pas une tâche facile. Les décideurs doivent trouver un équilibre entre le maintien de l'indépendance opérationnelle inhérente à chaque composante et la coordination de ces composantes pour atteindre les objectifs du DN. Ils doivent être capables de modifier et d'adapter rapidement l'organisation et la gouvernance du DN de manière réactive afin d'optimiser ses performances (par exemple, en réévaluant les règles et les protocoles d'interaction, de communication et de prise de décision collective). En fin de compte, cela doit être réalisé en utilisant des composants nécessaires et pertinents qui évoluent de manière

indépendante, formant une structure dynamique et cohésive (Probst and Bassi 2017).

L'objectif est de proposer une structure organisationnelle et un modèle de gouvernance pour un DN, dans le but d'améliorer la conception et la gestion des projets de dépollution. Ce modèle répondra aux divers défis et complexités associés à ces projets, tout en promouvant la collaboration et l'efficacité entre les composantes participantes.

La conceptualisation de ce modèle s'inspire à la fois du modèle de l'entreprise virtuelle et du modèle de l'entreprise étendue, tant du point de vue de son organisation (ses architectures, ses parties prenantes, ses composants) que de sa gestion (sa gouvernance) (Keating and Katina 2019).

### **5.3. RESEAU D'ENTREPRISES : CONGRUENCE ENTRE L'ENTREPRISE ETENDUE ET L'ENTREPRISE VIRTUELLE**

Byrne définit l'entreprise virtuelle comme « [...] un réseau temporaire d'entreprises indépendantes (fournisseurs, clients, voire rivaux..) reliées par les technologies de l'information pour partager les compétences, les coûts et l'accès aux marchés des uns et des autres. Elle n'aura ni bureau central ni organigramme. Il n'y aura pas de hiérarchie, pas d'intégration verticale » (Byrne 1993).

L'entreprise virtuelle est une organisation qui réunit des partenaires indépendants au sein d'un réseau de collaboration virtuelle pour atteindre un objectif commun (Introna and Petrakaki 2007). Cette forme d'organisation permet de réunir des compétences complémentaires pour mener à bien des projets complexes, tout en réduisant les coûts et les risques liés à l'investissement dans des ressources internes (Appel, Behr, and Wi 1996). En effet, nous nous sommes inspirés du modèle de l'entreprise virtuelle, mais notre approche va plus loin et englobe également le concept d'entreprise étendue (Defélix and Picq 2013).

L'entreprise étendue implique une collaboration entre des entités indépendantes qui conservent leur autonomie tout en travaillant ensemble pour atteindre un objectif commun. Cette forme d'organisation crée un système intégré et cohérent tout en permettant aux entreprises de conserver leur indépendance.

Ainsi, un DN, par ses besoins en matière d'organisation et de gouvernance, emprunte des caractéristiques à l'organisation d'une entreprise étendue (Kumar and Naidu 2018) et au fonctionnement d'une entreprise virtuelle (Browne and

Zhang 1999) convergeant en fait vers un réseau d'entreprise, point d'équilibre entre ces deux modèles comme le résume la Figure 26 (Sadigh et al. 2016).

En combinant les principes organisationnels de l'entreprise virtuelle et de l'entreprise étendue, il est possible de proposer une organisation efficace du réseau d'entreprises de dépollution (Bertoni, Johansson, and Larsson 2011).

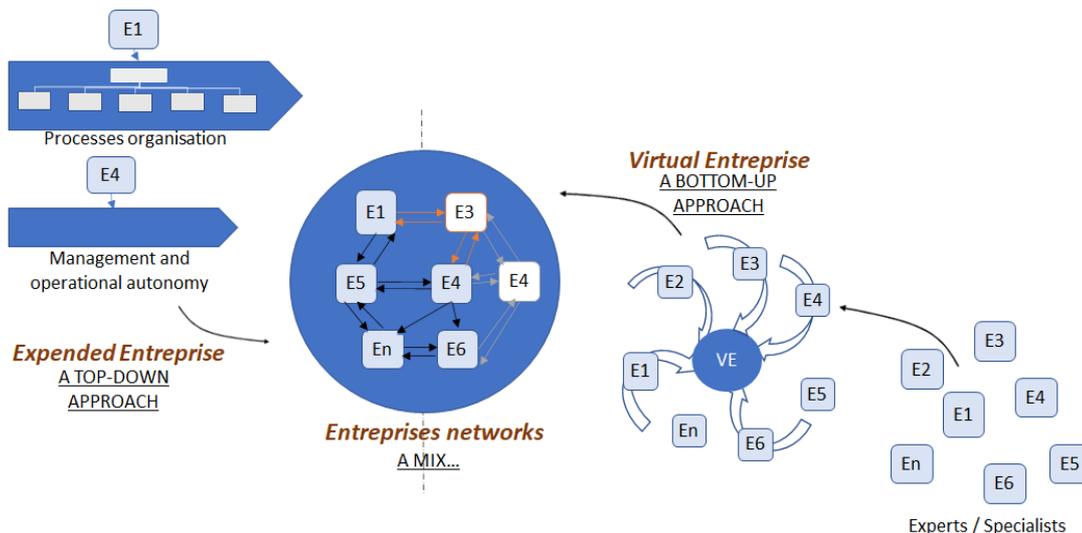


Figure 26 : Croisement des modèles d'entreprise étendue et d'entreprise virtuelle

L'organisation et la gouvernance du DN doivent en effet assurer la continuité de la mission du DN et essentiellement, dans le cadre volontairement restreint de cet article, répondre aux besoins spécifiques suivants :

- Partager des objectifs communs sous forme d'exigences : rentabilité, industrialisation, sécurité, sûreté, respect des cadres environnementaux et réglementaires.

- Anticiper et gérer les risques inhérents (par exemple, les risques techniques, environnementaux, économiques, réglementaires, mais aussi les conflits entre les composantes de la propriété, les connaissances ou le savoir-faire, les opportunités de marché, etc.).

- Promouvoir une collaboration étroite des composantes autour de cette vision partagée des objectifs communs, des projets, de l'organisation, des risques encourus, etc.

- Créer et entretenir un climat de confiance et de reconnaissance mutuelle des composantes autour d'une complémentarité reconnue et avérée des compétences et des connaissances.

- Prendre des décisions communes et piloter de manière raisonnée, voire adaptée, en fonction de l'opportunité et des spécificités de chaque projet (ex : type

de polluant, site, complexité, exigences des parties prenantes impliquées, concernées ou impactées par le projet).

- Respecter l'indépendance managériale et opérationnelle des composantes, anticiper sa dynamique, évaluer ses impacts et maîtriser ses effets.

- Assurer une bonne communication entre les composants et, dans un sens plus large, l'interopérabilité (Chapurlat and Daclin 2017) dans tous les échanges de données, d'informations, de connaissances, de matériel ou d'énergie entre ces composants.

Il est à noter que les différents acteurs impliqués dans les projets gérés par le DN, tels que les autorités publiques, les organisations non gouvernementales ou les citoyens, ne sont pas membres du réseau mais sont impliqués projet par projet selon les besoins de l'ingénierie de ces projets suivant une approche d'ingénierie système par exemple.

## **5.4. IDENTIFIER LES ROLES ET LES RESPONSABILITES**

L'objectif de cette identification est d'améliorer la coordination et la collaboration entre les parties prenantes. Il s'agit ici d'éviter les silos de décision et de responsabilité, de prévenir les conflits, d'aider à comprendre les valeurs et les attentes des membres de l'entreprise élargie, d'établir des objectifs communs et ensuite de mettre en place des projets rentables et responsables pour chaque partie prenante.

La Figure 27 résume la vision adoptée ici sous la forme d'une pyramide de responsabilités, de rôles et de besoins et met ainsi en évidence les relations qui doivent être établies et maintenues par chaque entreprise partenaire. Cela exige de chacune de ces entreprises qu'elle réfléchisse au-delà de ses frontières organisationnelles traditionnelles. En tant que tel, ce modèle est souvent utilisé pour décrire la complexité de la gestion des chaînes d'approvisionnement mondiales, qui impliquent souvent des fournisseurs, des partenaires commerciaux, des sous-traitants et d'autres parties prenantes (Marius 2010).

Ce modèle définit quatre niveaux qui sont les suivants.

- **Niveau 1 : Membres et responsabilités**

Ce niveau identifie les différents acteurs impliqués dans le réseau et leurs rôles respectifs. Les entreprises membres principales sont les principaux acteurs et orientent la stratégie et les projets. Les partenaires d'innovation principaux fournissent des idées et soutiennent la R&D. Les partenaires de soutien principaux

gèrent la logistique et les processus opérationnels. Les nouveaux membres et les entreprises associées contribuent à l'expansion et à l'adaptation du réseau aux évolutions du marché.

### ○ Niveau 2 : Réglementation, capacité et marché

Ce niveau fournit un cadre pour la collaboration entre les membres en formalisant les règles, les compétences et les objectifs du réseau. Le modèle de gouvernance de la collaboration formelle établit les règles de fonctionnement et de communication. Le profil des capacités met en évidence les compétences et les ressources qui peuvent être partagées par les membres. L'identité et l'objectif du marché unique définissent l'identité commerciale commune du réseau.

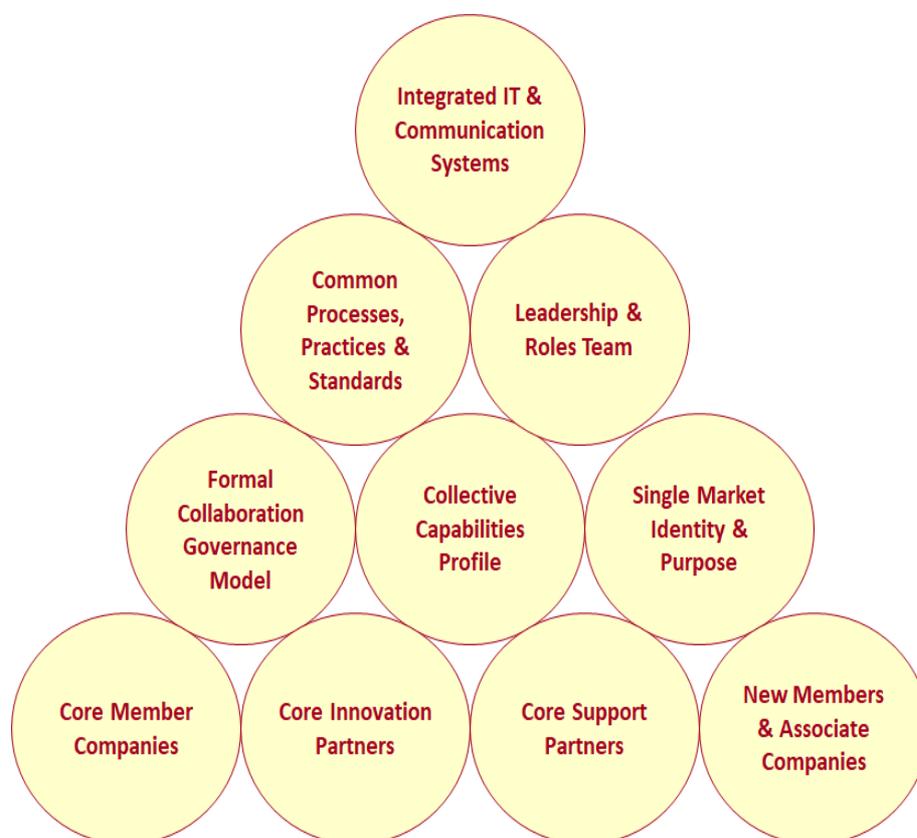


Figure 27 : Principaux besoins et rôles de la gouvernance des DN en tant qu'équilibre (Marius 2010)

### ○ Niveau 3 : Exploitation du réseau

Ce niveau garantit la cohérence et l'efficacité des processus de collaboration et des rôles des membres. Les processus, pratiques et normes communes harmonisent et font évoluer les processus de travail en commun. L'équipe "Leadership et rôles" attribue des responsabilités spécifiques aux membres afin de faciliter la collaboration et l'efficacité au sein du réseau, en tenant compte des compétences et des besoins de chaque projet.

- **Niveau 4 : Communication et partage d'informations**

Ce niveau concerne les systèmes intégrés d'information et de communication qui permettent aux membres de collaborer efficacement. Les systèmes intégrés d'information et de communication fournissent des outils permettant d'échanger des informations, de partager des applications commerciales et de travailler ensemble, quelle que soit la situation géographique des membres. Cette infrastructure facilite également l'interopérabilité des outils de travail et favorise la continuité numérique au sein du réseau.

## **5.5. CARTOGRAPHIE COLLABORATIVE DES PROCESSUS EN TANT QU'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE**

Plusieurs bonnes pratiques, une approche conceptuelle et une cartographie des processus applicables sont proposées par le projet « Cadre Référentiel Ingénierie Système Entreprises Étendu » (CRISEE) (GIFAS 2017) qui s'est concentré sur le développement d'un cadre de référence pour l'ingénierie système dans les entreprises étendues, dans le but d'améliorer la collaboration et l'intégration entre les différentes organisations impliquées dans le développement de systèmes complexes. Le projet CRISEE visait également à promouvoir l'utilisation de normes communes (telles que ISO 15288 (ISO/IEC/IEEE 2015), le Nasa HandBook (NASA 2007)) et des méthodologies pour l'ingénierie des systèmes, tout en les adaptant au contexte spécifique d'une entreprise étendue).

En nous inspirant du projet CRISEE, nous proposons un processus de cartographie de la gouvernance pour les DN qui vise à organiser et à structurer leur gouvernance, comme illustré dans la Figure 28. Comprenant trois catégories principales de processus, cette approche offre plusieurs avantages, notamment l'amélioration de la communication et de la collaboration grâce à des processus clairement définis, la rationalisation de la prise de décision, la résolution efficace des conflits et la promotion de l'amélioration continue et de l'innovation. En fournissant une vue d'ensemble de la gouvernance du DN, ces processus favorisent l'engagement des parties prenantes, ce qui conduit à une gestion plus efficace du réseau. Ces processus sont décrits ci-après :

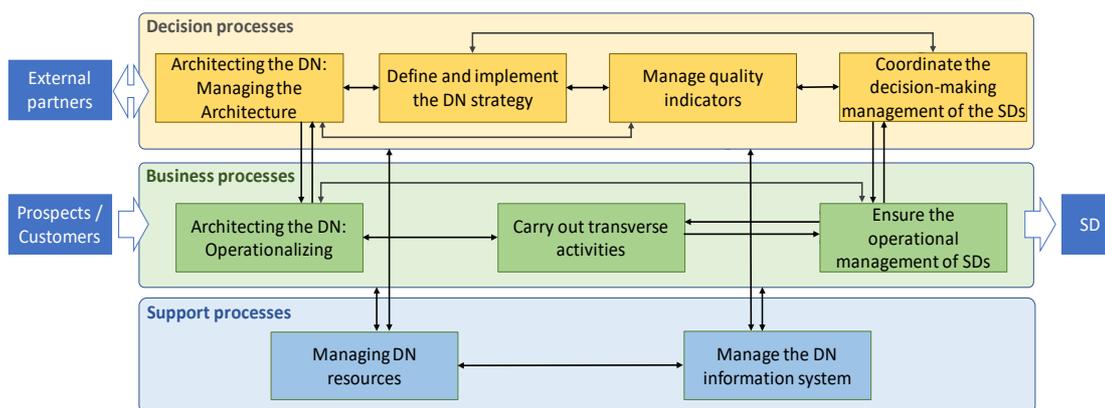


Figure 28: Cartographie simplifiée des processus du DN

### Processus de décision (Decision processes)

1. Architecturer le DN : Manager l'architecture.
  - a. Valider l'évolution de l'architecture du DN.
  - b. Valider l'entrée d'un nouveau membre ou le départ d'un membre existant.
2. Définir et appliquer la stratégie du DN.
  - a. Valider les objectifs du DN : identifier les objectifs commerciaux et les résultats attendus de la collaboration entre les entreprises.
  - b. Déterminer la stratégie de gestion et de partage de ressources communes.
  - c. Déterminer et valider les termes et les conditions de la collaboration entre les entreprises membres du DN.
3. Manager les indicateurs qualité.
  - a. Définir la stratégie qualité et les indicateurs de pilotage de la qualité.
  - b. Elaborer et piloter un plan d'actions amélioratives du DN.
4. Coordonner le management décisionnel des DN.
  - a. Valider la demande concernant un DS : valider l'objectif et les besoins des parties prenantes et lancement de l'étude préliminaire d'un DS (analyse de mission et de faisabilité, d'intérêt, etc.).
  - b. Valider l'offre d'un DS : chaque offre de DS est validée en interne pour être ensuite diffusée aux parties prenantes, et le DS est donc en attente de la validation des parties prenantes d'un DS, définir les indicateurs de pilotage DS.
  - c. Autoriser le lancement d'un DS : décision de passage d'un DS validé par les parties prenantes à sa phase de mise en œuvre (exécution du DS) et mise en place des indicateurs choisis.

### Processus métier (Business processes)

1. Architecturer le DS : Opérationnaliser.
  - a. Prospecter de nouveaux membres.
  - b. Prospecter des entreprises et organismes clients de DS.

- c. Évaluer les capacités, les ressources partagées et les compétences des entreprises membres ou candidates.
  - d. Gérer le guichet des appels d'offre de DS.
2. Assurer le management opérationnel des DS.
  - a. Ingénierie d'un DS (conception et planification détaillée des projets).
  - b. Exécution d'un DS (adapter et exécuter le DS).
  - c. Clôture d'un DS (assurer la fin des opérations et tracer les REX).
3. Mener à bien des activités transverses.
  - a. Établir des protocoles de communication interne et externe.
  - b. Développer des nouveaux moyens et ressources : mener à bien une R&D collaborative avec des parties prenantes éventuellement extérieures pour aller vers une innovation technologique ou organisationnelle commune (pour des projets voisins, des besoins voisins, etc.).
  - c. Concevoir et exécuter des activités particulières et temporaires, par exemple, pour atteindre un objectif commun à plusieurs DS ou valoriser un résultat particulier auprès de potentiels prospects de DS.

### **Processus support (Support processes)**

1. Gérer le système d'information du DN
  - a. Développer et maintenir en conditions opérationnelles un système d'information étendu et partagé entre les membres du DN
  - b. Gérer la communication du DN.
  - c. Etablir, tracer et partager des REX
  - d. Evaluer régulièrement des indicateurs de performance, de sécurité, de sûreté, etc. concernant résultats de la collaboration entre les entreprises.
  - e. Déployer une culture et les bonnes pratiques du DN : culture de sécurité, de sûreté, de partage, de confiance, ...
2. Gérer les ressources du DN
  - a. Gérer les ressources matérielles, humaines, et applicatives mises à disposition et partagées par les entreprises membres en fonction de la stratégie de gestion des ressources déterminée.
  - b. Gérer les ressources financières
  - c. Former les nouveaux entrants

Cette cartographie des processus est ensuite projetée dans un modèle de gouvernance qui favorise une vision partagée, une prise de risque acceptée et une prise de décision commune plus éclairée et alignée sur les objectifs de le DN.

## 5.6. MODELE DE GOUVERNANCE : MISE EN ŒUVRE DE L'HOLACRACY

L'approche de gouvernance chargée de piloter le DN à travers la gestion de ces processus est basée sur les principes de l'holacracy (Krasulja, Radojević, and Janjušić 2016). Cette approche permet de redistribuer l'autorité et le leadership aux entreprises membres, afin de maximiser l'écoute et la prise en compte des avis et des propositions de décision.

En effet, dans le cadre des systèmes de dépollution, une structure de gouvernance hiérarchique peut ne pas convenir en raison de la nature complexe et dynamique des tâches à accomplir. Une structure de gouvernance circulaire est plus adaptée à un DN. En fait, le choix d'un modèle basé sur l'holocratie met l'accent sur la communication, le partage de l'information et la prise de décision collective entre les parties prenantes, qui sont organisées de manière non hiérarchique. La mission de chaque composante de le DN est alors centrée sur une compétence spécifique associée à la finalité du SdS. Le principe est de positionner le pouvoir de décision au plus près de l'action. Il s'agit d'attribuer chaque mission, activité ou responsabilité au niveau le plus approprié pour la mener à bien. Pour ce faire, l'organisation sera structurée en cercles dont chacun a une finalité qui contribue à la finalité globale tout en restant autonome dans son fonctionnement.

Le modèle de gouvernance proposé est illustré à la Figure 29, qui se compose de trois couches coordonnées.

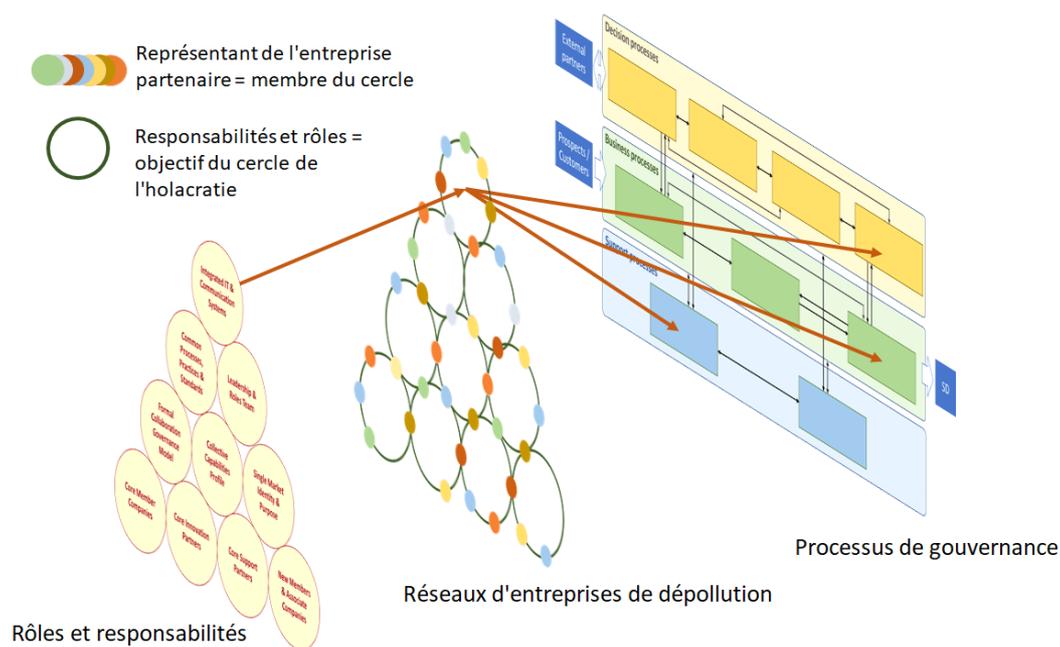


Figure 29 : De l'application holacracy à la gouvernance DN

La première couche décrit tous les rôles et responsabilités, présentés sous la forme d'une pyramide qui n'implique pas de relation hiérarchique. Cette première couche se projette sur le DN, la deuxième couche, où chaque rôle et chaque responsabilité sont assumés par des représentants des entreprises participant au DN (représentés par des points de couleur dans la figure). Les entreprises collaborent pour remplir les rôles et responsabilités requis en fonction de leurs compétences et se positionnent dans les cercles organisationnels appropriés. Ces cercles permettent à tous les représentants des entreprises partenaires de fonctionner de manière holocratique, c'est-à-dire qu'ils travaillent de manière autonome tout en se coordonnant collectivement pour atteindre des objectifs communs. Les entreprises peuvent participer à plusieurs cercles, et le nombre d'entreprises dans chaque cercle peut varier. Cependant, il est essentiel que toutes les entreprises participent à la création du système d'information.

Ces cercles se projettent ensuite sur la troisième couche de la figure, où chaque rôle et responsabilité est lié à un ou plusieurs processus. Cette disposition indique que chaque cercle peut contribuer à la gestion d'un ou plusieurs processus.

En résumé, cette figure représente trois perspectives coordonnées du modèle de gouvernance. Ce modèle permet aux entreprises de collaborer efficacement et de manière autonome pour atteindre des objectifs communs. Les différentes parties prenantes travaillent ensemble pour remplir leurs rôles et responsabilités, en fonction de leurs compétences, selon une approche holocratique.

L'approche proposée dans cet article est bien adaptée pour traiter les problèmes spécifiques liés à la gouvernance dans le contexte de la décontamination et du démantèlement des sites industriels, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, en reconnaissant le DN comme un système de systèmes, elle prend en compte la complexité inhérente et les défis associés à la coordination de multiples parties prenantes, de diverses techniques de dépollution et de conditions d'infrastructure variables. Inspiré des principes de la gestion des systèmes et de la modélisation d'entreprise, il fournit un cadre structuré pour la prise de décision. Il favorise la collaboration et l'efficacité, en aidant à surmonter les conflits d'intérêts et à optimiser la gestion des ressources. Evolutif, il s'adapte à l'arrivée ou au départ des acteurs, aux changements législatifs et aux risques. Il assure ainsi une gestion robuste des défis du démantèlement industriel, en valorisant la collaboration, la flexibilité et l'adaptabilité.

## **5.7. SYNTHÈSE ET CONCLUSION**

Ce chapitre visait à proposer un modèle de gouvernance du réseau d'entreprise (DN), à clarifier les rôles et responsabilités de chacune des parties prenantes du réseau i.e., essentiellement ici, des entreprises partenaires puis à proposer une cartographie des processus inspirée de l'holocratie. L'approche globale proposée aujourd'hui privilégie une organisation centrée processus et une responsabilisation répartie entre les acteurs. En incorporant ces paradigmes de gouvernance, notre objectif est d'industrialiser la démarche de dépollution. Cette orientation, méthodique et ancrée dans la recherche, aspire à standardiser et dynamiser les projets de dépollution, répondant de ce fait aux besoins critiques précédemment identifiés. La prochaine section se focalise exclusivement sur le développement de la méthode DEPOSE au niveau DS. Quant au niveau DN, il sera abordé ultérieurement en tant que perspective.



## **6. FORMALISATION DE LA METHODE DEPOSE POUR LE DEPOLLUTION SYSTEM**

## 6.1. CONCEPTS : CONSTRUCTION D'UN META MODELE

Les concepts identifiés précédemment sont formalisés par une approche de méta modélisation qui amène de fait à formaliser en quelque sorte le vocabulaire des projets et du réseau de dépollution : on peut alors parler d'une ressource ontologique importante pour la suite des travaux.

Le langage de méta modélisation choisi ici est Ecore<sup>2</sup> sous environnement Eclipse Sirius<sup>3</sup>. Le résultat est un méta modèle unique mettant en évidence les concepts modélisés sous forme de classes et d'attributs, et les relations entre les concepts sous forme de relations et de contraintes. Ce méta modèle pourra être enrichi par l'ajout de nouveaux concepts et de nouvelles relations ou attributs au fur et à mesure de la maturation de la méthode.

La construction de ce méta modèle suit un processus classique qui vise à lever les ambiguïtés syntaxiques, sémantiques et pragmatiques classiques.

Le méta modèle est structuré de manière très classique autour d'une classe *PlatformFramework\_NamedObject* : Cette classe modélise donc un concept abstrait formalisant certains attributs et relations partagés, dont tous les autres concepts pourront ensuite hériter. A ce titre, chaque élément du méta modèle sera par exemple caractérisé par un nom, un identifiant unique, et éventuellement, d'un commentaire explicatif qui présente les attributs de cette classe comme le montre la Figure 30.

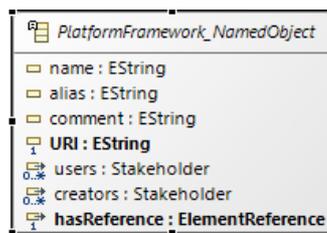


Figure 30: Le concept de *PlatformFramework\_NamedObject*

D'autres classes abstraites, synthétisées dans la Figure 31, permettent de compléter cette structuration :

1) *PlatformFramework\_Entity* : Cette classe est la base pour toutes les fonctionnalités liées à la création, la manipulation et la gestion des modèles. De cette classe dérivent plusieurs autres, notamment :

<sup>2</sup> Voir <https://wiki.eclipse.org/Ecore> et le métamodèle eCore est défini sur <https://download.eclipse.org/modeling/emf/emf/javadoc/2.6.0/org/eclipse/emf/ecore/package-summary.html>

<sup>3</sup> Voir <https://projects.eclipse.org/projects/modeling.sirius>

1.1) *ModellingElement* : Il s'agit d'une classe abstraite qui offre une description de tous les éléments constituant les modèles du système.

1.2) *Characteristic* : Également une classe abstraite, elle fournit toutes les informations concernant un objet de modélisation utilisé. Cela comprend les propriétés, les objectifs, etc.

1.3) *Connexion Interaction* : Cette classe abstraite propose un concept permettant de représenter, de manière graphique ou textuelle (selon la syntaxe concrète du DSML), une relation d'entrée / sortie entre deux éléments de modélisation (par exemple, processus, activité, fonction, place d'un réseau de Petri, etc.)

1.4) *FlowConnectibleElement* : Il s'agit d'un autre concept abstrait permettant de représenter un élément de modélisation qui possède des relations d'entrée / sortie avec d'autres éléments de modélisation de même nature.

1.5) *ViewPointDSML* : Tous les concepts qui dérivent de cette classe représentent des points de vue spécifiques.

2) *Container* : Il s'agit d'un conteneur logique pour les données. Cette classe comprend les sous-classes suivantes :

2.1) *Document file* : Il s'agit d'une classe pour gérer les fichiers de documents.

2.2) *Folder* : Il s'agit d'une classe pour gérer les dossiers ou les collections de fichiers ou d'éléments.

2.3) *RECP* : Cet acronyme signifie Répertoire d'Expertises, de Connaissances, et de Pratiques. Il s'agit d'une classe pour gérer un répertoire de ressources et de connaissances.

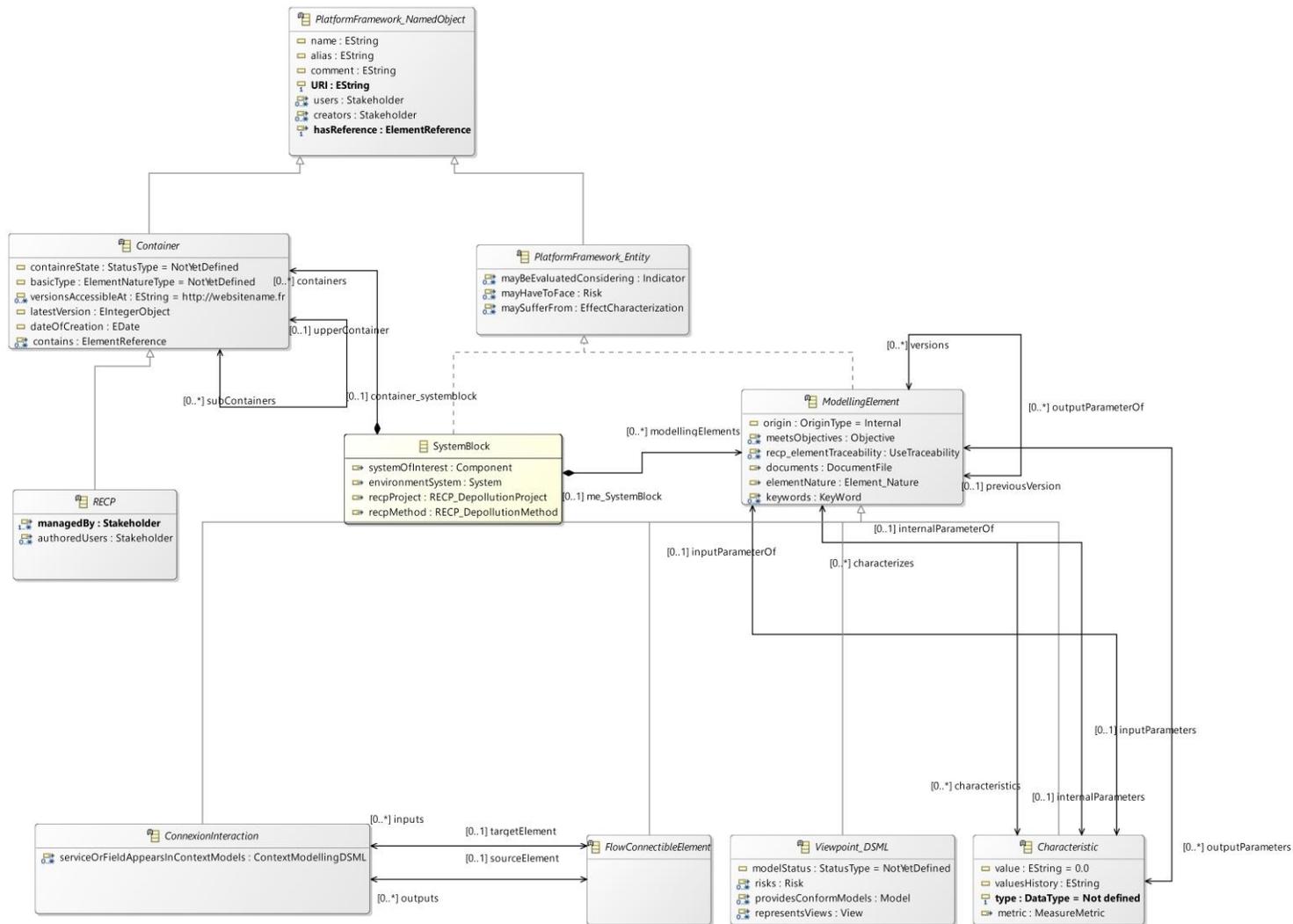


Figure 31: Classes abstraites de structuration

## 6.2. LES VUES DE MODELISATION ET LES DSML ASSOCIES

Avant de décrire cette démarche opératoire, nous précisons dans la Figure 32 le principe de modélisation d'un DS (ou d'un DN, non détaillé plus avant ici mais basé sur les mêmes principes de modélisation système multi-vues et multi-DSML) (24641 ISO 2020) et les différentes connexions existantes entre les différents DSML élaborés.

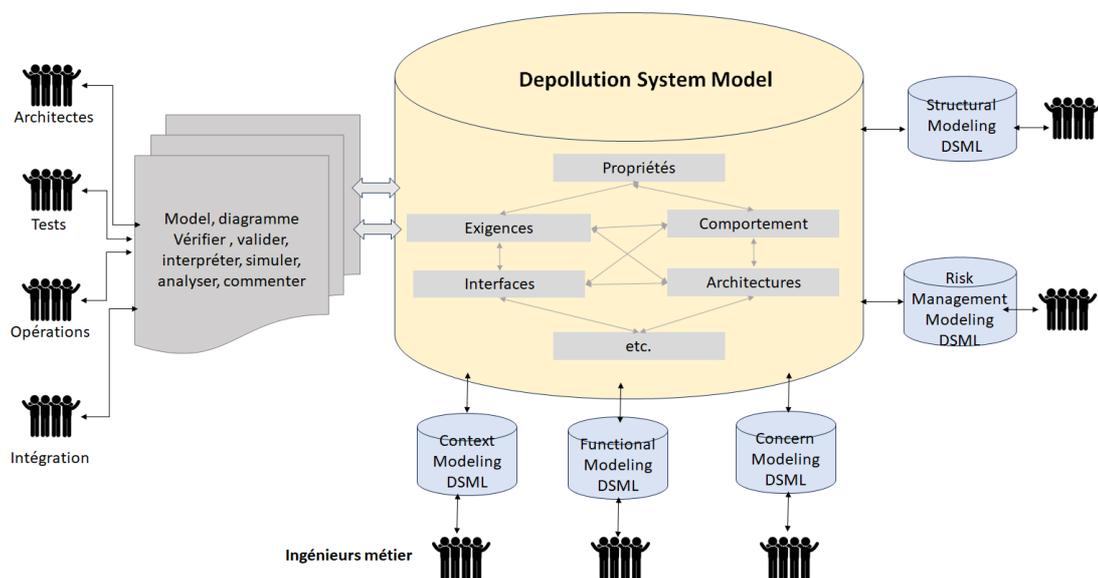


Figure 32: Principe du modèle de système (ISO 24641)

La Figure 33 détaille les DSML utilisés pour produire ce modèle de système DS, leurs interconnexions et leurs positions respectives au sein de chaque vue retenues plus haut.

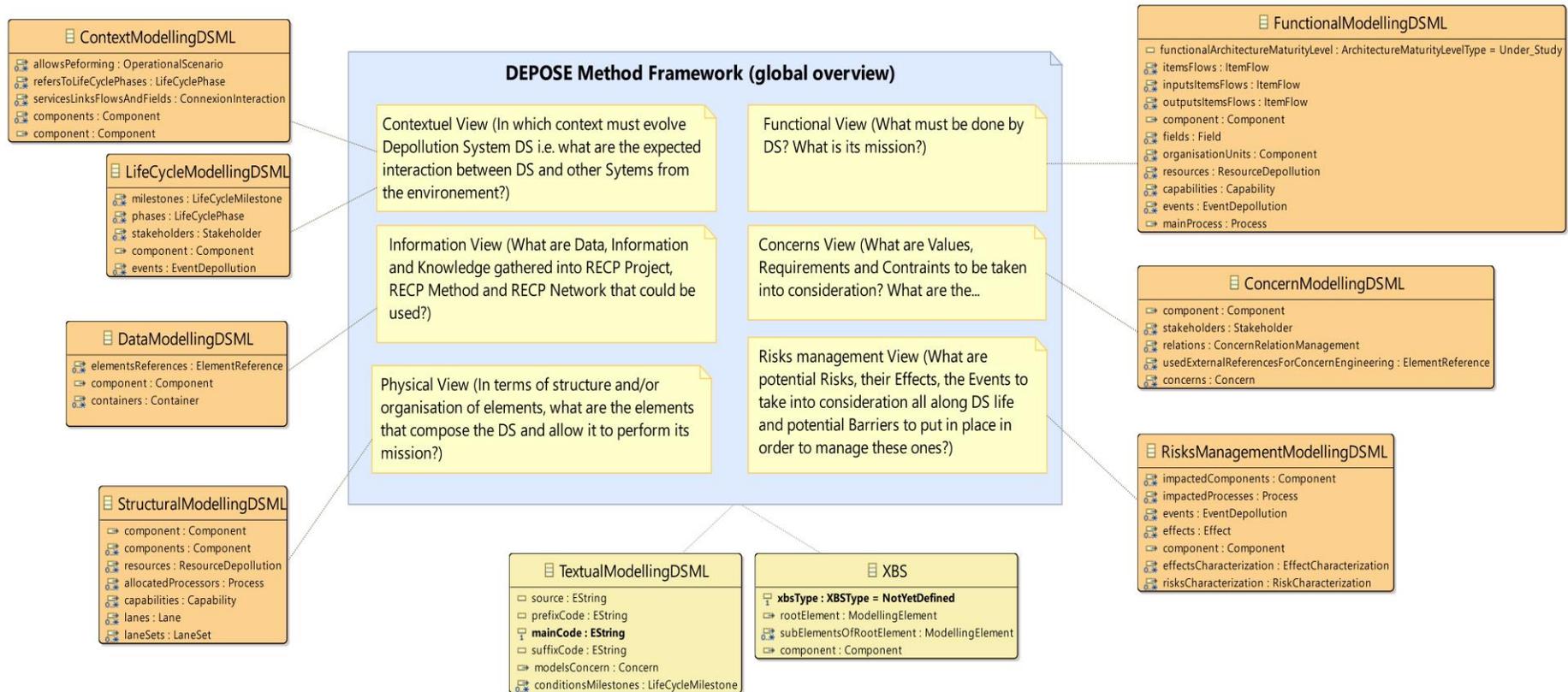


Figure 33: Toutes les vues de modélisation et les DSML associés

## 6.3. LES DSML

L'objectif de cette partie est de présenter les langages de modélisation spécifiques à un domaine (DSML) que nous avons soit conçus, soit adaptés des approches préexistantes et ensuite incorporés dans notre méthode. Nous associons un DSML particulier à chaque vue évoquée dans la section 3.2. Nous introduisons chaque DSML en utilisant un format d'identification structuré comme décrit ci-après :

**Nom du DSML** : le nom donné au DSML.

**Objectifs de Modélisation** : les motivations sous-tendant la création de ce DSML et la manière dont il facilite la représentation modélisée.

**Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML** : Ce que l'utilisateur est censé accomplir avec le DSML.

**Place et cohérence dans le Cycle de Vie** : comment il s'insère dans le cycle de vie d'un système de dépollution

**Syntaxe abstraite** : Il s'agit des concepts et des relations essentiels à la définition des DSML. Ces éléments doivent naturellement être intégrés au méta-modèle unifié, qui constitue la base de la méthode.

**Syntaxe(s) Concrète(s)** : Il s'agit de la définition des objets graphiques (syntaxe graphique) ou textuels (syntaxe textuelle) qui représentent les concepts et relations essentiels au DSML.

**Exemple de modèle** : Exemple de modèle conforme à ce DSML.

### 6.3.1. Context Modelling DSML

**Nom du DSML** : Context Modeling DSML

#### Objectifs de Modélisation

Ce DSML servira à illustrer les interactions du SoI (dans ce cas, le DS) avec son environnement, qui est constitué de systèmes à l'interface. Certains de ces systèmes jouent également le rôle de systèmes contributeurs. Ce sont des acteurs externes ou d'autres éléments extérieurs qui, bien qu'ils n'interviennent pas directement dans son fonctionnement, peuvent influencer ou modifier son état et ses opérations. À travers ce DSML, on vise à mettre en évidence :

1. le système de dépollution ;

2. les systèmes à l'interface ;

3. les interactions entre les systèmes à l'interface et le système de dépollution. Ces interactions permettent aux utilisateurs de visualiser les flux de matières, d'énergie et de données, ainsi que les services qui matérialisent le lien entre chaque système à l'interface et le système de dépollution.

### **Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Le rôle principal de l'utilisateur est de repérer tous les acteurs et systèmes susceptibles d'affecter la performance ou la condition du système de dépollution. Certaines de ces interactions peuvent être imprévisibles et, par conséquent, peuvent être intégrées à n'importe quelle étape du processus de modélisation.

### **Place et cohérence dans le cycle de Vie**

Le diagramme de contexte touche principalement les 3 dernières phases de cycle de vie d'un système de dépollution 4.2.2. En effet Lors de la phase « *problem space* », le système de dépollution n'existe pas concrètement, il n'est donc pas possible de représenter les systèmes à l'interface ainsi que les relations entre ces systèmes et le système de dépollution.

On considère encore à ce niveau le système de dépollution comme une boîte noire, caractérisé par des entrées et sorties. Les services sont spécifiés compte tenu des exigences, tout en conservant le point de vue boîte noire.

### **Syntaxe abstraite**

Les classes utilisées dans ce DSML (Figure 34) sont les suivantes :

**Component** : Entité architecturale d'un système qui permet de représenter un élément (système, sous système, composant, mécanisme etc.)

**Service** : Un service est ici perçu comme une interaction ciblée entre le système de dépollution et les systèmes constituant son environnement. Pour qu'un service soit opérationnel, il faut non seulement des interfaces des deux côtés, mais également des flux et des connexions pour transporter ces flux. Si un service est dirigé vers le système, c'est parce qu'il est nécessaire au bon fonctionnement et à l'accomplissement de la mission du système de dépollution.

**Link** : C'est un lien matériel permettant le transfert de flux, établi entre deux interfaces, pour matérialiser un service entre deux systèmes.

**Flow** : Représente un flux spécifique, qu'il soit de matière, d'énergie ou de données. Ce flux est, selon les suppositions, involontaire mais identifié, car déjà observé et potentiellement préoccupant.

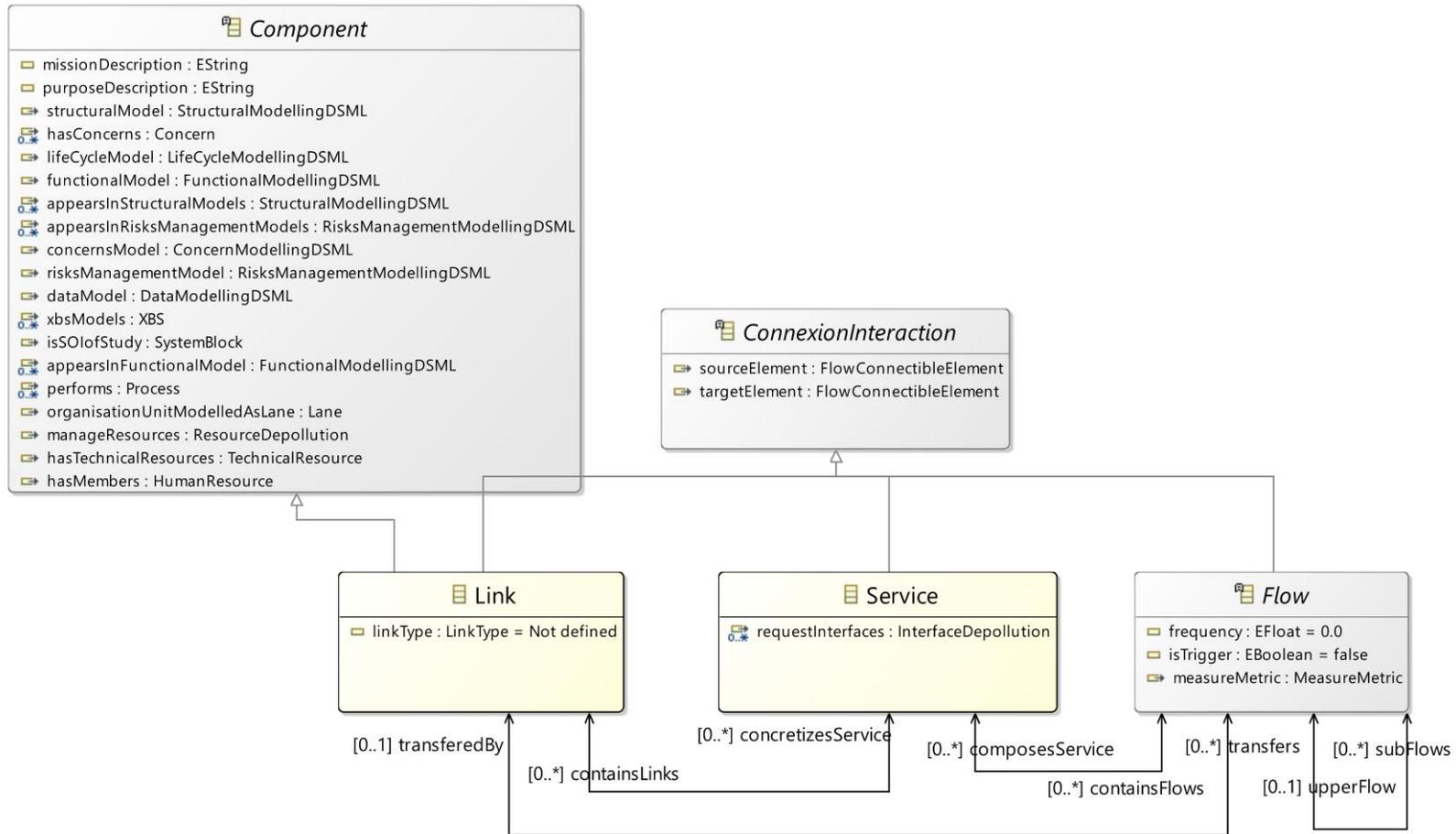
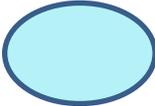


Figure 34: Context Modeling DSML

## Syntaxe Concrète

Les objets graphiques utilisés pour présenter le diagramme de contexte sont illustrés dans le Tableau 11.

Tableau 11: Syntaxe concrète du Context Modeling DSML

Eléments graphiques	Description de l'élément graphique
	Système de Dépollution (SD)
	Systemes à l'interface
	Services échangés entre les systèmes d'interface et le SD
	Flux (Matière, Energie, Data) échangés entre les systèmes à l'interface et le SD

### Exemple de diagramme de contexte

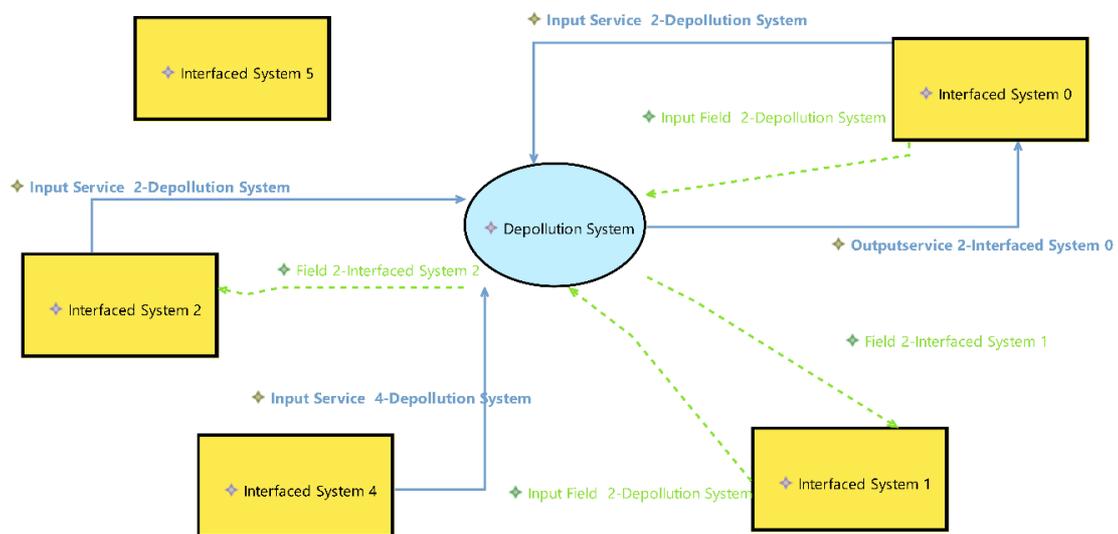


Figure 35: Exemple d'un diagramme de contexte

## 6.3.2. Functional Modeling DSML

**Nom du DSML :** Functional Modeling DSML

**Objectif de modélisation**

L'objectif de ce DSML est de faciliter la représentation des processus et activités que le système de dépollution doit accomplir, en mettant également en

évidence les éléments traités et échangés. Il sert à déceler et à organiser des constantes fonctionnelles parmi divers processus ou activités. Il est essentiel que ce DSML offre des modèles exécutables. Grâce à une évaluation formelle, il devient envisageable de caractériser et de simuler le comportement souhaité des processus représentés, de valider différentes suppositions, et d'anticiper divers scénarios où ces processus demeurent efficaces, tout en respectant les délais, les cibles de performance et les restrictions liées à l'utilisation des ressources.

### **Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Chaque acteur métier qui souhaite utiliser le DSML a un rôle et des objectifs spécifiques en fonction de ses besoins. Pour l'utilisateur qui souhaite établir une architecture fonctionnelle, le DSML fonctionnel est un outil précieux. Dans un scénario BPMN (Corradini et al. 2018), par exemple, l'utilisateur est amené à concevoir la séquence des fonctions et à établir les flux correspondants. Ce travail de modélisation permet une visualisation claire et ordonnée des interactions entre les différentes fonctions, facilitant ainsi la compréhension et l'optimisation des processus.

#### **Place et cohérence dans le cycle de vie du système de dépollution**

Le diagramme présenté trouve sa place et sa cohérence dans le cycle de vie du système de dépollution. Il s'inscrit en premier lieu dans la phase 2, celle de l'ingénierie des systèmes de dépollution.

Durant cette phase, l'objectif est de concevoir et de structurer le système de manière à optimiser les processus de dépollution. Le diagramme sert à illustrer et à organiser les différentes composantes du système, ainsi que leurs interactions, ce qui facilite l'ingénierie du système de dépollution.

Ensuite, le cycle de vie se poursuit avec la phase 3, celle de l'exécution. Durant cette étape, le système de dépollution conçu est mis en place et opérationnel. Les différentes activités de dépollution sont alors exécutées conformément à ce qui a été prévu et illustré par le diagramme.

Finalement, la phase 4, appelée "end of life", marque la fin du cycle de vie du système de dépollution. Cette phase consiste en la déconstruction ou le démantèlement du système, et peut nécessiter une nouvelle intervention de dépollution pour minimiser l'impact environnemental du système lui-même à la fin de son utilisation.

Le diagramme, tout au long de ces phases, permet d'assurer une meilleure gestion et une meilleure compréhension du système, en illustrant de manière claire les différentes étapes et procédures du processus de dépollution.

### Syntaxe abstraite

Les principales classes utilisées dans ce DSML synthétisées Figure 36 sont présentées dans ce qui suit :

**Process** : Ensemble des processus coordonnés qui, à l'aide de ressources et dans le cadre de contraintes spécifiques, transforme des entrées en sorties.

**RessourceDepollution** : élément ou actif mis à disposition, utilisé ou consommé lors de l'exécution d'un Processor, permettant à celui-ci de fonctionner et d'atteindre ses objectifs.

**HumanRessource** : Référence aux individus ou groupes d'individus disposant de compétences et de connaissances spécifiques.

**TechnicalRessource** : Se rapporte aux outils, équipements, logiciels, ou tout autre matériel ou technologie.

**Stakeholder** : Personne ou entité qui possède un enjeu, une implication, une préoccupation ou une participation relative au système de dépollution.

**Capability** : Représente et structure la compétence ainsi que le degré d'expertise nécessaire pour réaliser une activité donnée (se référer à 'capabilityType')

**Lane** : Représente un participant majeur dans un processus, souvent une entité organisationnelle.

**LaneSet** : Sous-section du Lane, représentant des rôles ou sous-participants spécifiques au sein d'un Lane.



### Syntaxe concrète

Ici, le langage BPMN a été choisi comme syntaxe concrète, mais de manière simplifiée. L'utilisation d'un diagramme simplifié offre une perspective différente à l'utilisateur. Ici, l'accent est mis sur la définition des flux entre les différentes fonctions et processus, permettant à l'utilisateur de se concentrer sur l'interaction et la coordination entre les éléments, sans avoir à se préoccuper des détails spécifiques de chaque fonction. Cela peut être particulièrement utile pour avoir une vue d'ensemble du système ou du processus.

### Exemple de Diagramme fonctionnel

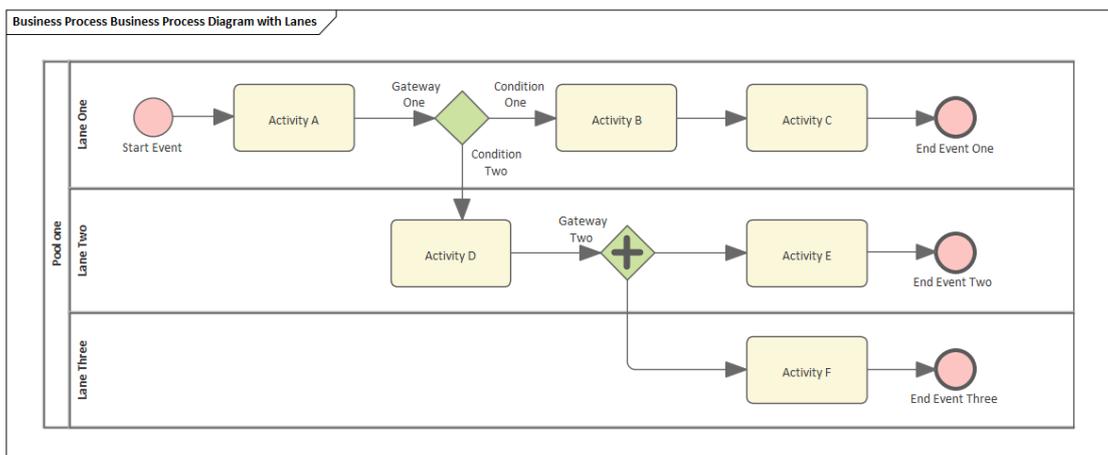


Figure 37: Exemple d'un diagramme Fonctionnel

### 6.3.3. Structural Modelling DSML

**Nom du DSML :** Structural Modeling DSML

#### Objectifs de Modélisation

L'objectif de ce DSML est de fournir un moyen efficace pour illustrer l'agencement organique du système de dépollution. Il facilite notamment la représentation de la structure physique du système de dépollution, incluant ses ressources, qu'elles soient techniques, humaines ou informationnelles. En outre, il met en évidence leur structure hiérarchique ainsi que les divers flux d'éléments susceptibles d'être échangés.

**Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Parmi les acteurs qui peuvent profiter de l'utilisation du DSML structurel, on trouve généralement l'ingénieur système ou le concepteur du SD. Son rôle et son objectif consistent à élaborer une représentation détaillée et précise de la

structure interne du système de dépollution, en mettant en évidence la hiérarchisation des ressources, qu'elles soient techniques, humaines ou informationnelles, ainsi que les flux d'éléments pouvant être échangés en interne.

Les chefs de projets peuvent également trouver une utilité dans Ce DSML pour comprendre et planifier efficacement l'allocation et l'utilisation des ressources, la planification du travail et la coordination des différentes composantes du système. Le DSML peut également servir d'outil de communication clair et visuel pour décrire la structure du système à toutes les parties prenantes, y compris les clients, les sous-traitants et le personnel.

En outre, les dirigeants d'entreprise et les responsables opérationnels peuvent utiliser ce DSML pour comprendre la structure organisationnelle du système et pour prendre des décisions stratégiques en matière d'investissement, d'amélioration des processus et de réduction des risques.

Dans un environnement complexe et en constante évolution, le DSML offre la flexibilité nécessaire pour modifier et adapter la représentation de la structure du système en fonction de l'évolution des besoins et des conditions. Cela facilite l'adaptation et l'évolution du système tout au long de son cycle de vie.

### **Place et cohérence dans le cycle de Vie**

Le DSML structurel trouve son utilité à travers trois phases du cycle de vie du système de dépollution :

Phase 2 : C'est au cours de cette phase que le DSML structurel prend toute son importance. En effet, lors de la phase d'ingénierie du système de dépollution, le DSML structurel est utilisé pour concevoir, visualiser et optimiser la structure du système, y compris les ressources, les relations et les flux d'éléments. Le DSML structurel sert d'outil pour la prise de décisions dans la conception du système.

Phase 3 : Pendant l'exploitation et l'évolution du système de dépollution, le DSML structurel continue à être utile pour suivre et ajuster la structure du système en fonction des changements dans l'environnement, la technologie ou les objectifs. Cela peut inclure l'ajout ou la suppression de ressources, la modification des flux d'éléments ou l'ajustement de la structure organisationnelle.

Phase 4 : Même lors de l'arrêt du système de dépollution, le DSML structurel peut être utilisé pour planifier et gérer la dissolution et le démantèlement du système de manière structurée et organisée.

### **Syntaxe abstraite**

Les principales classes utilisées dans ce DSML (Figure 39) sont présentées dans ce qui suit :

**System :** Comme le définit la norme ISO/IEC 15288 : un système est un ensemble d'éléments interagissant organisés pour atteindre un ou plusieurs objectifs définis

**Link :** Élément physique permettant le transfert et l'échange de flux ou d'items entre deux systèmes ou composants, en se connectant via leurs interfaces pour réaliser un service ou une interaction spécifique.

**Barrier :** Élément ou dispositif mis en place pour répondre et contrer les risques. Les barrières peuvent être de différents types, tels que préventives, pour anticiper et éviter un risque, ou curatives, pour y remédier après son occurrence.

**InterfaceDepollution :** Représentation de la connexion entre deux systèmes, conçue pour faciliter le transfert d'un ou de plusieurs services. Cette connexion peut être de nature physique, organisationnelle, homme-machine ou logique.

### Syntaxe Concrète

Tableau 12: Syntaxe concrète du structural Modeling DSML

Eléments graphiques	Description de l'élément graphique
	Système physique
	Lien entre les systèmes physiques
	Interface
	Flux (Matière, Energie, Data) échangés entre les systèmes physiques

### Exemple d'un diagramme structurel

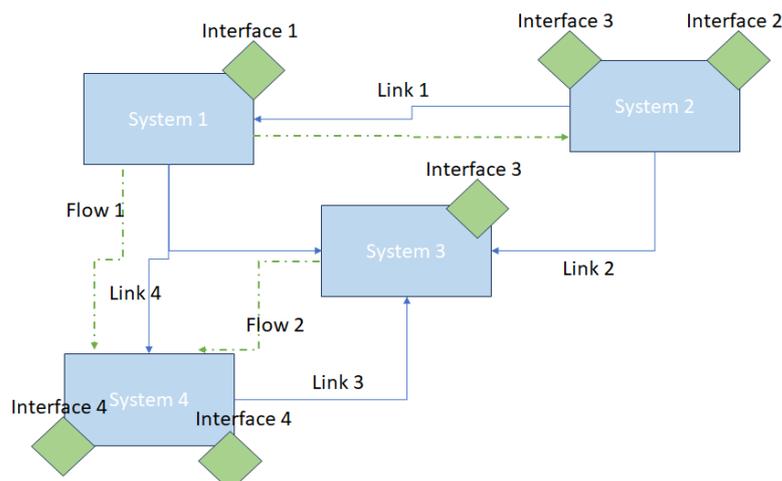


Figure 38: Exemple d'un diagramme structurel

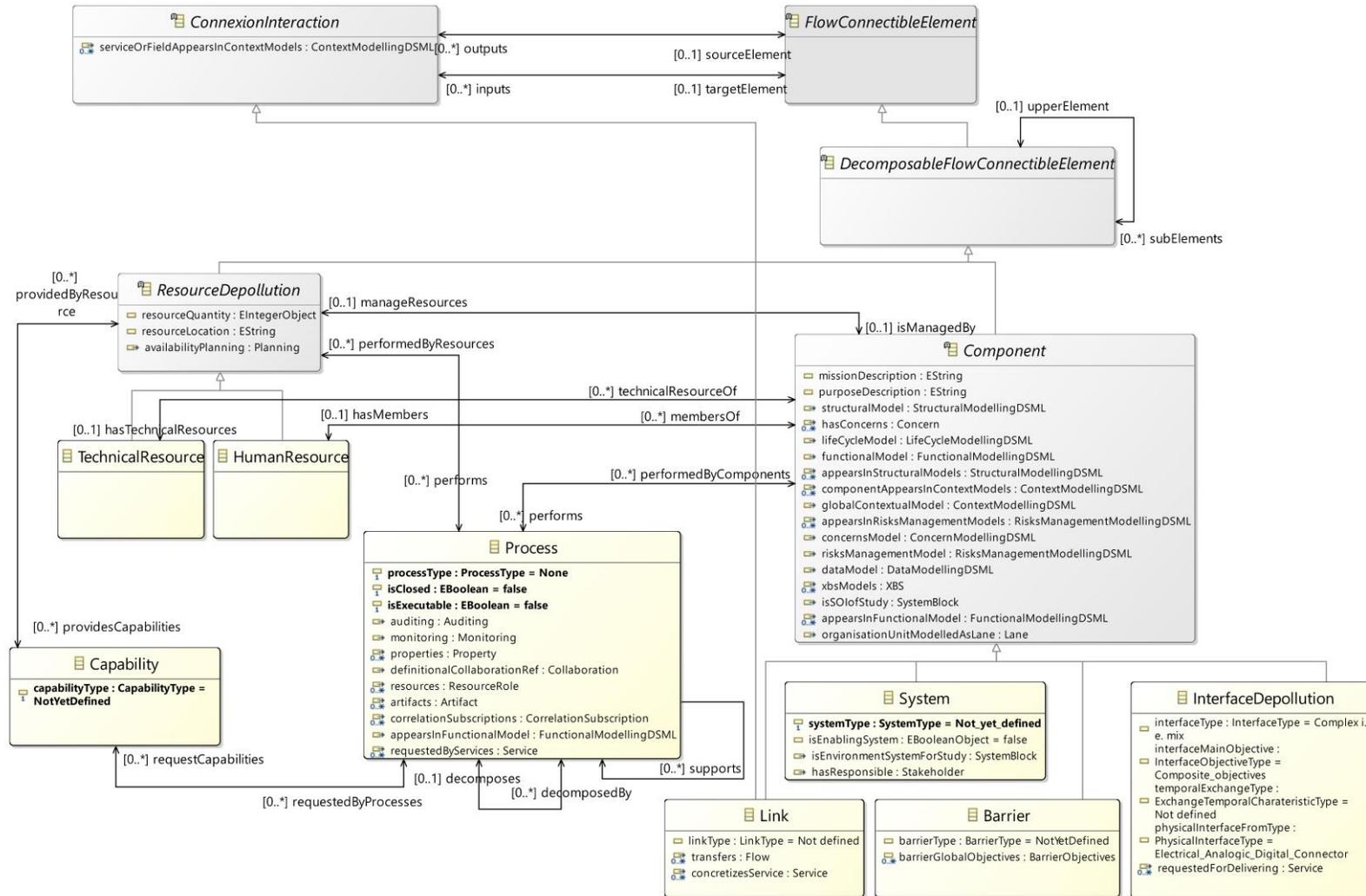


Figure 39: structural Modeling DSML

### **6.3.4. Concern Modeling DSML**

**Nom du DSML :** Concern Modeling DSML

#### **Objectifs de Modélisation**

Le DSML de la Modélisation d'exigences a pour but principal de formaliser, structurer et suivre l'ensemble des exigences dans un projet de dépollution. Il vise à définir clairement les attentes, les spécifications techniques et les contraintes auxquelles le système de dépollution doit répondre. Il aide à visualiser et à comprendre les relations entre les différentes exigences, et peut faciliter la gestion des modifications au cours du cycle de vie du projet. En outre, ce DSML peut soutenir la traçabilité des exigences, ce qui est crucial pour vérifier que toutes les exigences sont prises en compte et que les modifications sont correctement gérées. Enfin, le DSML pour la Modélisation d'Exigences peut faciliter la communication entre toutes les parties prenantes du projet, en offrant un langage commun pour discuter et comprendre les exigences.

#### **Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Dans un projet de dépollution, divers acteurs peuvent trouver une utilité à utiliser le DSML pour la Modélisation d'Exigences dont, par exemple :

1. Les gestionnaires de projet : Ils peuvent utiliser ce DSML pour établir des exigences claires et précises au début du projet et pour surveiller leur mise en œuvre tout au long du cycle de vie du projet.
2. Les ingénieurs système : Ils peuvent utiliser le DSML pour s'assurer que les exigences sont prises en compte lors de la conception et de la mise en œuvre des systèmes de dépollution.
3. Les équipes qualité : Elles peuvent utiliser le DSML pour surveiller la conformité aux exigences tout au long du projet, et pour effectuer des audits et des analyses de la qualité.

En outre, l'utilisateur joue un rôle central dans l'utilisation de ce DSML, car il est responsable de la création, de la modification et de la gestion des exigences qui seront ensuite référencées dans le référentiel d'exigences. Il intervient activement à différents niveaux du processus de gestion des exigences, comme le raffinement des exigences, l'établissement de liens et la traçabilité des exigences.

#### **Place et cohérence dans le cycle en Vie**

Ce DSML pour la modélisation des exigences est essentielle au stade initial du cycle de vie d'un système de dépollution, qui couvre l'ingénierie des exigences. Pendant cette étape, les nécessités issues des parties prenantes sont rassemblées dans le référentiel des exigences du Système de dépollution. À ce point, les acteurs considèrent le système de dépollution d'un point de vue de "boîte noire", en mettant l'accent sur l'identification du problème à traiter, plutôt que sur la mise en avant de solutions fonctionnelles ou technologiques.

Ces nécessités sont par la suite affinées, dérivées, décomposées ou reformulées en différentes exigences en fonction des besoins spécifiques du projet. Certaines de ces exigences sont expressément associées et attribuées aux sous-systèmes du système de dépollution. Par conséquent, cette DSML est également employée pour décrire le système d'un point de vue de "boîte blanche", où l'accent est mis sur les processus internes du système.

Par conséquent, le DSML de la modélisation des exigences occupe une position centrale dans le processus de dépollution, en permettant une caractérisation précise du problème et en alignant efficacement les exigences avec les sous-systèmes concernés. Cela facilite une transition sans heurts vers les phases ultérieures de résolution du problème et d'implémentation.

### **Syntaxe abstraite**

Les principales classes utilisées dans ce DSML (Figure 40) sont présentées dans ce qui suit :

**Concern** : La préoccupation portée à un système en relation avec un ou plusieurs de ses parties prenantes.

**Value** : Mesure quantifiée ou évaluation représentant le résultat ou l'aboutissement de la mise en œuvre d'un objectif.

**OperationalScenario** : Scénario qui décrit un ensemble spécifique de conditions ou d'activités opérationnelles sous lesquelles un système ou une solution est censé fonctionner.

**Requirement** : Énoncé exprimant un Besoin ou une nécessité, accompagné des conditions et des contraintes qui lui sont liées.

**ConcernRelationManagement** : Exprime qu'une préoccupation peut être raffinée, décomposée et reformulée.

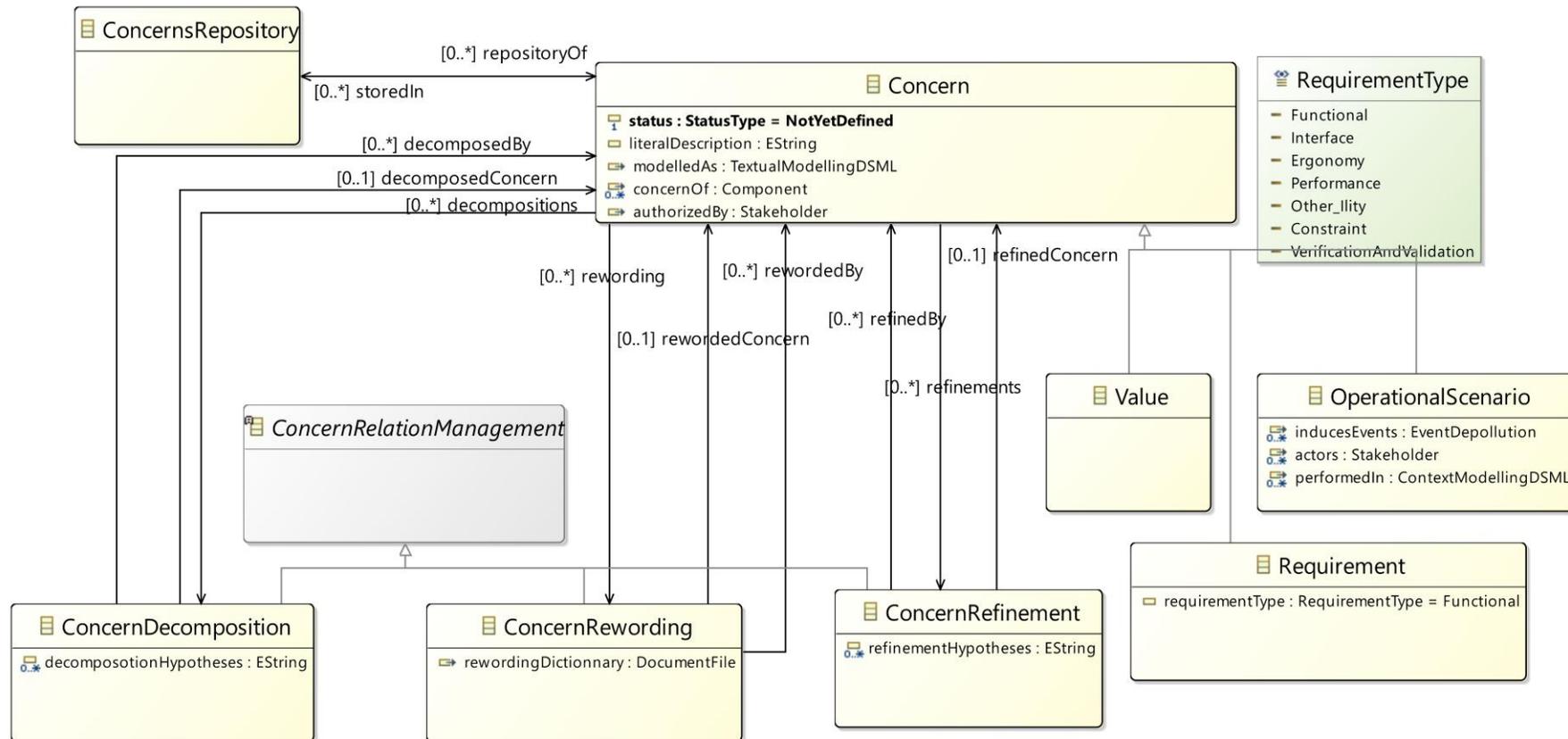


Figure 40: Concern Modeling DSML

## Syntaxe Concrète

Ici, il ne sera pas question de développer une syntaxe graphique, mais plutôt une syntaxe textuelle en utilisant des boilerplates (Johannessen 2012). Ces derniers se décomposent en trois éléments principaux : le Main, qui constitue la partie centrale de l'exigence ; le Prefix, servant d'introduction à l'exigence ; et le Suffix, qui clôture l'exigence. L'utilisation des boilerplates permet d'instaurer une structure uniforme aux exigences. Ce format standardisé facilite la compréhension et l'interprétation des exigences, assurant ainsi qu'elles soient claires, cohérentes et bien définies.

Les boilerplates, en fournissant une structure préétablie, réduisent les ambiguïtés et les malentendus potentiels. Cela est dû à leur nature prescriptive qui établit un format répétable. En conséquence, lorsque les exigences sont rédigées en utilisant des boilerplates, elles deviennent plus lisibles et plus faciles à interpréter par toutes les parties prenantes, favorisant ainsi une meilleure compréhension et coordination entre les équipes.

## Exemple d'un modèle d'exigence

Le DSML suggéré est un instrument de formulation d'exigences élaboré à partir de la plateforme Xtext d'Eclipse. Ce DSML spécialisé pour les exigences offre des fonctionnalités telles que la création d'exigences, la validation instantanée des boilerplates et des suggestions de complétion automatique pour optimiser le processus de rédaction. La Figure 41 illustre la manière dont une exigence est formulée à l'aide de l'outil Xtext.

The screenshot displays the Eclipse IDE with the Xtext editor. The main editor shows a DSL grammar for requirements, and the bottom panel shows the Xtext Syntax Graph.

```

grammar org.xtext.example.mydsl.MyDsl with org.eclipse.xtext.common.Terminals

generate myDsl "http://www.xtext.org/example/mydsl/MyDsl"

Besoins: stakeholder$llis += stakeholder$exigences*

;
stakeholder$exigences: 'Stakeholder' name=ID exigences += exigence ;

exigence: exigencesFonctionnelles|exigencesNONfonctionnelles | contraintes;

exigencesFonctionnelles: 'le' 'système de dépollution' 'doit' fonction = STRING 'avec la condition';
exigencesNONfonctionnelles: 'le' 'système de dépollution' 'a' caractéristique = STRING 'afin de';
  
```

The Xtext Syntax Graph visualizes the grammar rules. It shows a tree structure where 'Besoins' is composed of 'stakeholder\$exigences'. 'stakeholder\$exigences' is composed of 'Stakeholder', 'ID', and 'exigence'. 'exigence' is composed of 'exigencesFonctionnelles' or 'exigencesNONfonctionnelles' and 'contraintes'. 'exigencesFonctionnelles' is composed of 'le', 'système de dépollution', 'doit', 'STRING', and 'avec la condition'. 'exigencesNONfonctionnelles' is composed of 'le', 'système de dépollution', 'a', 'STRING', and 'afin de'. 'contraintes' is composed of 'suivre', 'regle', and 'STRING'.

Figure 41: L'éditeur développé sous Xtext

Cette exigence se décompose en une partie initiale conditionnelle et une partie centrale. Son contenu est structuré grâce à des séparateurs comme "le système de dépollution doit" ou "le système de dépollution a". Bien que les rédacteurs soient tenus d'adopter les structures préétablies, ils bénéficient également d'un soutien pendant la rédaction, notamment grâce à des outils d'auto-complétion non détaillés ici.

### **6.3.5. Risks Management DSML**

**Nom du DSML :** Risks Management DSML

#### **Objectifs de Modélisation**

Le DSML de gestion des risques sera utilisé pour les besoins spécifiques de la vue des risques. Dans cette perspective, ce DSML est conçu pour décrire et gérer les risques potentiels associés au système de dépollution, ainsi que les effets de ces risques et les mesures prises pour les contrer.

Dans cette vue, l'objectif est de faire apparaître :

1. Le risque : Les risques spécifiques qui peuvent avoir un impact sur le projet ou le système sont modélisés. Chaque risque est défini par sa nature, sa probabilité d'occurrence et la gravité de son impact potentiel.

2. L'effet : L'effet potentiel de chaque risque est également modélisé. Cela peut inclure des impacts sur les coûts, les délais, la qualité, la performance ou tout autre aspect pertinent du projet de dépollution. L'objectif est d'identifier clairement les conséquences possibles de chaque risque afin de pouvoir les gérer de manière proactive.

3. Les Barrières : Les mesures prises pour contrer les risques sont modélisées en tant que barrières. Cela peut inclure des actions pour réduire la probabilité d'un risque, minimiser son impact s'il se produit, ou récupérer plus rapidement et plus efficacement. Les barrières peuvent également comprendre des stratégies pour transférer ou partager le risque.

Ainsi, ce DSML de gestion des risques offre un cadre complet pour comprendre, évaluer et gérer activement les risques tout au long de la vie d'un système de dépollution. Il offre aux utilisateurs la possibilité de visualiser les risques, de comprendre leurs impacts potentiels et de planifier les mesures nécessaires pour les gérer efficacement.

**Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

L'utilisateur principal du DSML de gestion des risques a pour rôle et objectif d'identifier, d'évaluer et de gérer les risques associés au système de dépollution.

Les gestionnaires de projets, par exemple, peuvent utiliser le DSML pour identifier les risques potentiels dès le début du projet, afin de pouvoir planifier en conséquence. Ils peuvent continuer à utiliser le DSML tout au long du projet pour surveiller les risques et prendre des mesures proactives pour les gérer.

Les ingénieurs système peuvent utiliser le DSML pour évaluer les risques associés à différentes conceptions de systèmes, technologies ou approches. Cela peut aider à prendre des décisions éclairées sur le choix des technologies à utiliser, les conceptions à adopter et les approches à suivre.

Les dirigeants de l'entreprise peuvent également trouver une utilité dans le DSML pour comprendre les risques globaux auxquels leur organisation est confrontée et pour prendre des décisions stratégiques en matière de gestion des risques.

La gestion des risques est une tâche qui évolue constamment et qui nécessite des ajustements réguliers. L'utilisation du DSML permet donc d'intégrer la gestion des risques dans les processus opérationnels quotidiens, de manière à pouvoir réagir rapidement et efficacement aux changements dans le profil de risque.

### **Place et cohérence du DSML de gestion des risques dans le cycle de vie d'un système de dépollution**

Le DSML de gestion des risques est applicable à toutes les phases du cycle de vie d'un système de dépollution.

- Phase 1 : Lors de cette phase initiale, avant que le système de dépollution ne soit conçu et développé, le DSML de gestion des risques peut être utilisé pour évaluer les risques potentiels associés aux différentes options de conception et aux différentes technologies disponibles. Cela peut aider à guider le choix des technologies et des conceptions à utiliser.

- Phase 2 : Pendant la phase d'ingénierie du système de dépollution, le DSML de gestion des risques peut aider à identifier et à gérer les risques associés au processus de développement lui-même. Par exemple, des risques tels que les retards de développement, les dépassements de coûts, les problèmes techniques imprévus, etc.

- Phase 3 : Lors de la phase d'opération et d'évolution du système de dépollution, le DSML de gestion des risques peut aider à identifier et à gérer les risques opérationnels. Cela peut inclure des risques tels que les pannes

d'équipement, les problèmes de conformité environnementale, les risques pour la santé et la sécurité, etc.

- Phase 4 : Lors de la phase de fin de vie du système de dépollution, le DSML de gestion des risques peut aider à gérer les risques associés au démantèlement et à la mise au rebut du système. Par exemple, cela pourrait inclure des risques tels que la contamination environnementale, les coûts de démantèlement imprévus, etc.

### **Syntaxe abstraite**

Dans un projet de dépollution, les concepts choisis pour le DSML (Figure 42) de Gestion des Risques sont étroitement liés les uns aux autres, permettant une gestion efficace des risques grâce au DSML.

**Risk** : sont identifiés et caractérisés en fonction de leur nature, de leur gravité et de leur probabilité.

**Effect** : les conséquences directes ou indirectes des risques.

**RiskCharacterization** : caractérisation du risque en fonction de la situation.

**EffectCharacterization** : caractérisation de l'effet en fonction de la situation.

**EventDepollution** : des événements ou des situations qui peuvent déclencher ou renforcer ces risques.

**Indicator** : des indicateurs utilisés pour suivre l'évolution de ces risques et l'efficacité des actions mises en œuvre pour les gérer.

Ainsi, les concepts choisis pour le DSML de Gestion des Risques sont interdépendants et complémentaires, offrant une vision globale et structurée de la gestion des risques dans les projets de dépollution. En considérant les interactions entre ces concepts et en les intégrant dans une approche cohérente, il est possible de mieux identifier, analyser et atténuer les risques associés à ces projets. Figure 42 illustre les diverses interactions entre ces classes et démontre les différentes connexions nécessaires pour former DSML complet pour la gestion des risques.

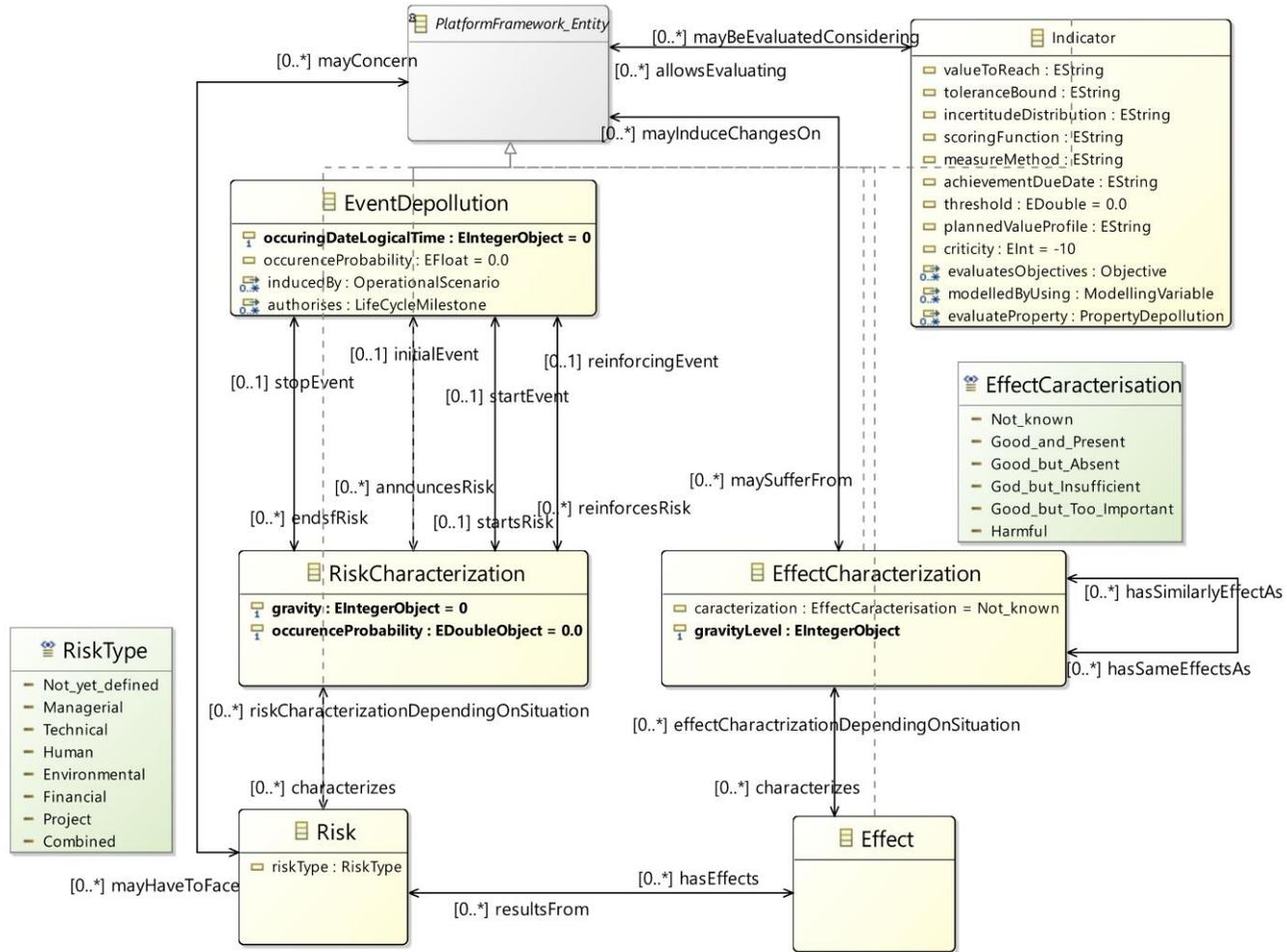


Figure 42: Risks Management DSML

### Syntaxe Concrète : Les diagrammes de Risks Management

Pour mettre en œuvre la syntaxe concrète de ce DSML, nous allons proposer plusieurs diagrammes. En effet, la gestion des risques se compose principalement de deux étapes, comme le montre la Figure 43.

La première étape est l'évaluation des risques, qui nécessite des diagrammes spécifiques. La deuxième étape est la maîtrise des risques, qui requiert bien entendu des diagrammes différents.

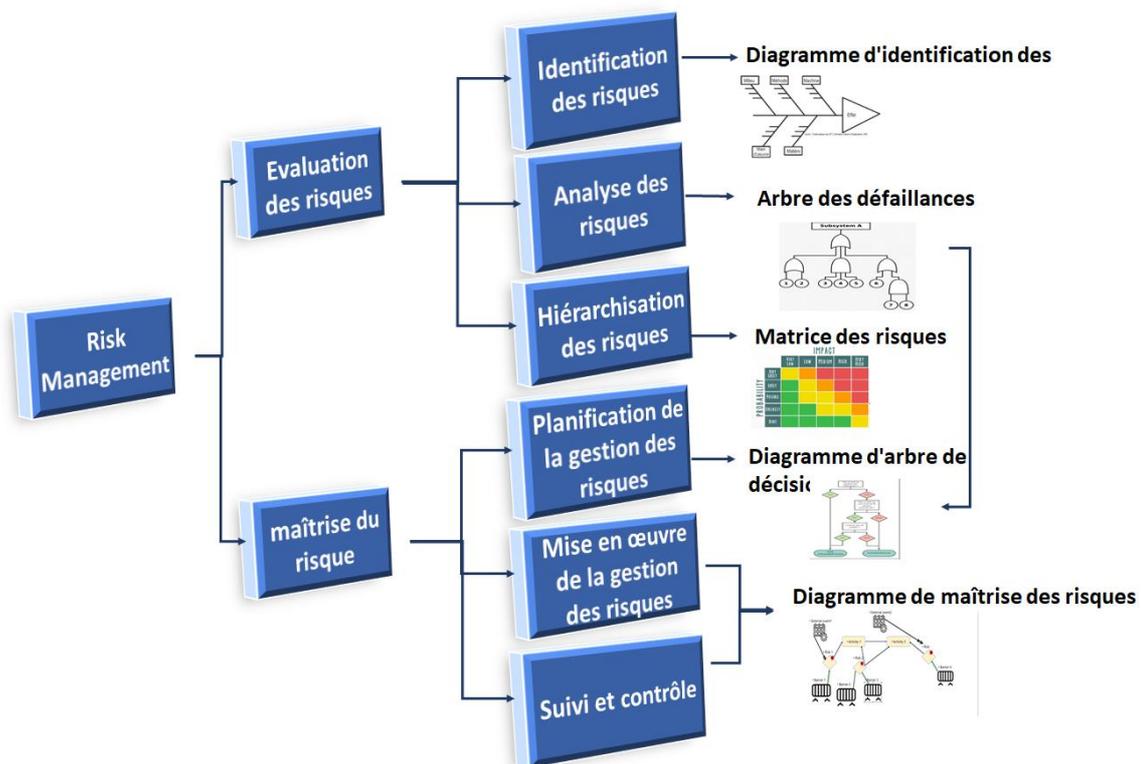


Figure 43: Diagramme associé au Risk Management DSML et modes de transition

Voici les étapes détaillées, accompagnées des diagrammes associés :

1. Identification des risques : Cela peut inclure des entretiens avec les parties prenantes, des ateliers, des analyses de scénarios ou l'étude d'incidents passés. Il est important d'utiliser des sources d'information diverses et fiables pour obtenir une compréhension globale des risques potentiels.

**Diagramme d'identification des risques :** En adaptant le diagramme d'Ishikawa (Wong, Woo et Woo 2016), nous avons développé un diagramme d'identification des risques conforme au méta-modèle. Ce diagramme classe les risques (humains, techniques, de projet, environnementaux) en causes spécifiques, la tête en arête de poisson montrant l'impact du risque.

2. Analyse des risques : Une fois les risques identifiés, il est essentiel d'évaluer leur probabilité d'occurrence et leur impact potentiel sur le projet ou l'organisation. Les méthodes d'analyse peuvent inclure des estimations qualitatives et quantitatives, ainsi que l'utilisation d'outils et de techniques appropriés pour évaluer les niveaux de risque.

**Diagramme d'analyse de l'arbre des défaillances** : L'analyse de l'arbre des défaillances (Xing et Amari 2008) évalue les risques d'un projet de dépollution en représentant visuellement la chaîne d'événements menant à un résultat indésirable à l'aide d'une structure hiérarchique et logique de portes et d'événements, sous la forme d'un diagramme en arbre.

3. Priorisation des risques : Cette étape implique de classer les risques en fonction de leur importance et de leur impact potentiel. Une approche systématique et objective doit être utilisée pour déterminer quels risques nécessitent une attention immédiate et lesquels peuvent être gérés à long terme. La priorisation permet une allocation efficace des ressources pour la gestion des risques.

**Matrice des risques** : La matrice des risques (Dumitran, et al.2010) hiérarchise les risques d'un projet de dépollution en associant la probabilité d'occurrence à l'impact potentiel. Elle se compose de deux axes : l'axe des x, ou abscisse, où est représentée la probabilité des risques, et l'axe des y, ou ordonnée, qui représente la gravité ou l'impact potentiel de ces risques.

4. Planification de la réponse aux risques : Après avoir priorisé les risques, il est nécessaire de développer des stratégies et des plans d'action pour les aborder. Cela peut inclure l'évitement des risques, la réduction, le transfert ou l'acceptation. La planification doit prendre en compte les ressources disponibles, les contraintes budgétaires et les objectifs de l'organisation ou du projet.

**Diagramme de l'arbre de décision** : Le diagramme de l'arbre de décision facilite la planification de la gestion des risques en modélisant les options, les incertitudes et les résultats d'un projet. Il représente visuellement les décisions, les risques, les probabilités, les coûts et les avantages de chaque scénario.

5. Mise en œuvre des mesures de traitement des risques : À ce stade, les plans d'action élaborés pendant la planification sont mis en place pour minimiser l'impact des risques sur l'organisation ou le projet. Il est crucial de communiquer efficacement avec toutes les parties prenantes concernées et de veiller à ce que les responsabilités soient clairement définies et attribuées.

**Diagramme de maîtrise des risques** : En nous inspirant de la méthodologie MADS-MOSAR (Hamzaoui et al. 2019), nous avons proposé une

syntaxe graphique, présentée dans le Tableau 13. Ce diagramme de maîtrise des risques illustre efficacement les risques qui influencent les activités de dépollution. Il permet de représenter les événements à l'origine de ces risques, ainsi que les barrières potentielles qui peuvent être mises en œuvre pour les éviter ou les atténuer.

6. Surveillance et contrôle des risques : La gestion des risques est un processus continu et dynamique. Il est important de surveiller régulièrement les risques identifiés, d'évaluer l'efficacité des mesures de traitement des risques mises en œuvre et d'ajuster les plans d'action en conséquence. L'examen périodique permet de s'adapter aux changements dans l'environnement, aux nouvelles informations et aux leçons tirées des expériences passées.

Tableau 13: Syntaxe concrète DSML de gestion des risques pour le diagramme de maîtrise des risques

Éléments graphique	Description de élément graphique
	Process
	Effet/ Effet découlant des risques, pouvant entraîner des changements dans d'autres éléments ou dans l'ensemble du système.
	Risque
	Barrière/ Activités planifiées ou exécutées pour faire face à un risque.
	Lien entre les processus
	Relation de causalité entre un effet et une situation de risque
	Relation de traitement entre le risque et la barrière.
	Risque peut impacter un process

### Exemple de Diagramme Risk management

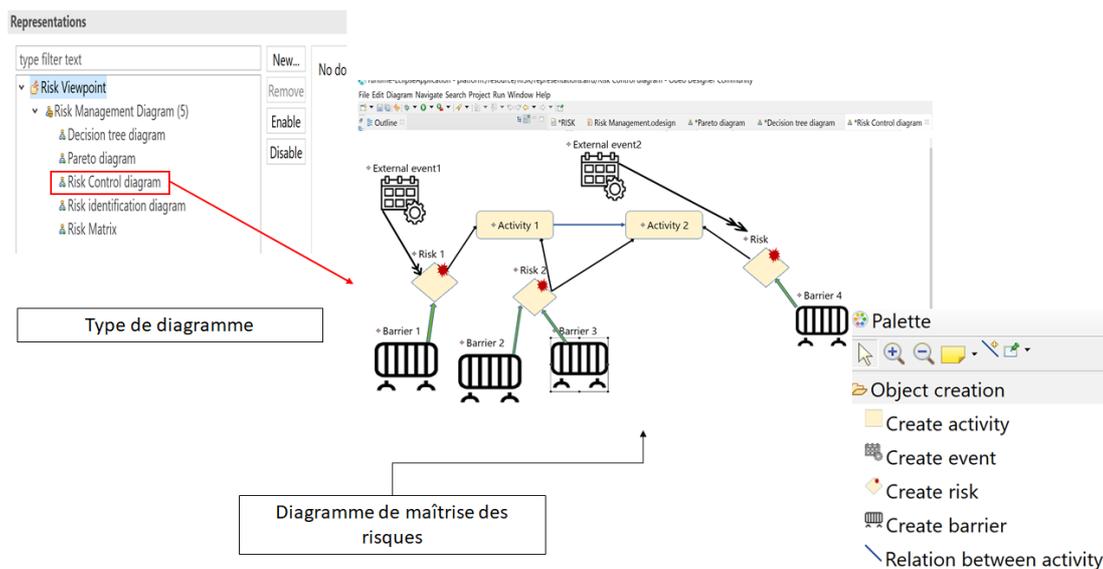


Figure 44: exemple Diagramme de maîtrise des risques

### 6.3.6. Life cycle Modeling DSML

**Nom du DSML :** Life Cycle Modeling DSML

#### **Objectifs de Modélisation**

L'objectif principal de la modélisation d'un DSML de cycle de vie est de fournir une illustration claire et détaillée des différentes phases et étapes impliquées dans la vie d'un système ou d'un projet. En particulier, cela implique de représenter le processus à partir de l'identification initiale des besoins (phase de l'espace de problème), à travers la conception et le développement (phase de l'espace de solution), jusqu'à l'exécution, l'opération, l'évolution et enfin la fin de vie du système.

Dans le contexte d'un projet de dépollution, ce DSML aiderait à identifier et à planifier les différents stades du processus de dépollution, y compris la préparation, l'installation, l'exploitation, la maintenance et enfin le démantèlement du système de dépollution. Cela permettrait de prévoir et de gérer efficacement les ressources, de minimiser les risques, d'optimiser les performances du système et d'assurer sa durabilité.

Ainsi, l'objectif de la modélisation d'un DSML de cycle de vie serait de fournir un cadre structuré et complet pour la gestion de tous les aspects du cycle de vie d'un système, permettant une prise de décision éclairée, une gestion efficace des ressources et une optimisation globale de la performance du système.

**Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Chaque acteur impliqué dans l'utilisation du DSML de cycle de vie a des rôles et des objectifs spécifiques qui correspondent à leur position et à leurs responsabilités au sein du projet. Par exemple :

**Gestionnaires de projets :** Leur rôle est d'utiliser le DSML de cycle de vie pour planifier, organiser et superviser l'ensemble du projet. Ils peuvent utiliser ce DSML pour déterminer les ressources nécessaires à chaque étape, pour estimer les délais et pour identifier les risques potentiels. Leur objectif est de s'assurer que le projet est réalisé dans les délais et le budget prévus, tout en répondant aux attentes en matière de performance et de qualité.

**Ingénieurs système :** Ils utilisent le DSML de cycle de vie pour comprendre les exigences techniques de chaque phase du projet et pour concevoir et développer des solutions appropriées. Leur objectif est de créer un système de dépollution efficace et fiable qui répond aux besoins identifiés lors de la phase de l'espace du problème.

**Opérateurs de systèmes :** Leur rôle est d'utiliser le DSML de cycle de vie pour comprendre comment le système doit fonctionner et être maintenu tout au long de son cycle de vie. Leur objectif est de garantir une exploitation et une maintenance efficaces du système, afin de maximiser sa performance et sa durabilité.

Le DSML de cycle de vie aide chaque acteur à comprendre son rôle et ses responsabilités à chaque étape du projet, et fournit un cadre pour la planification et l'exécution efficaces de leurs tâches.

### **Syntaxe abstraite**

Les principales classes utilisées dans ce DSML (Figure 45) sont présentées en gras dans le paragraphe suivant :

La vue du cycle de vie décrit l'évolution d'un système de dépollution au fil du temps. Le cycle de vie d'un système de dépollution est l'ensemble de toutes les phases « **LifeCyclePhase** » qu'il traverse, de sa conception à sa dissolution. Chaque phase se termine par un jalon « **LifeCycleMilestones** », qui souligne la décision concernant la continuation des opérations. Les jalons correspondent à un contrôle, lors duquel on vérifie l'état du projet ainsi que la qualité de sa planification et de son exécution. Les parties prenantes « **Stakeholders** » sont engagées dans une ou plusieurs phases.

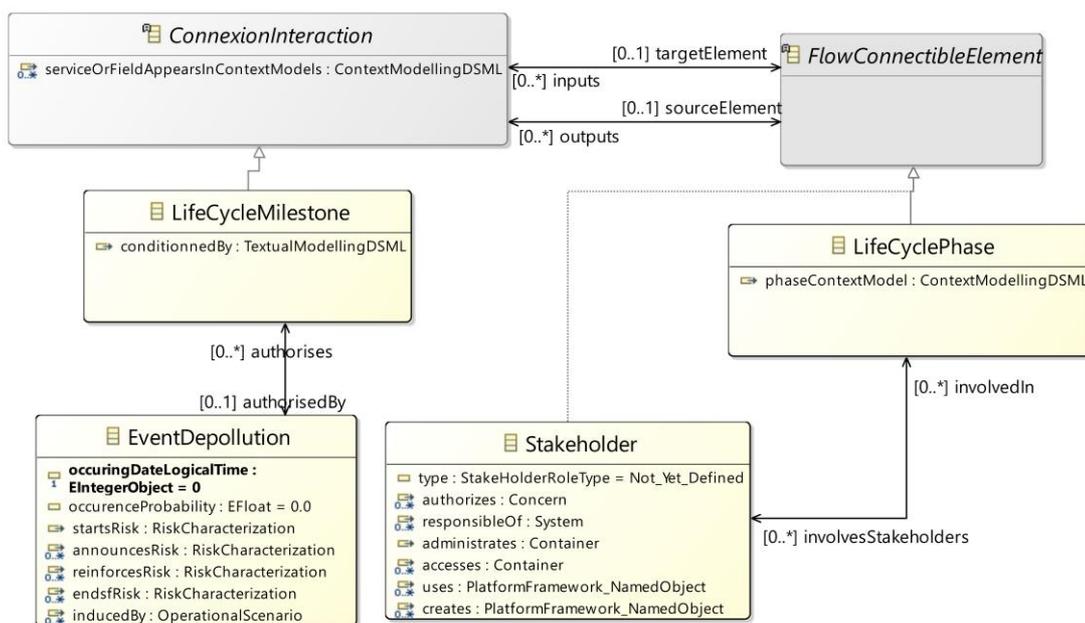


Figure 45: Life Cycle Modeling DSML

## Syntaxe Concrète

Tableau 14: Syntaxe concrète du Life Cycle Modeling DSML

Éléments graphiques	Description de l'élément graphique
	Les parties prenantes
	Événement autorisant les jalons
	Les phases
	Les jalons
	Relation entre les événements et les jalons
	Relation entre parties prenantes et les phases

## Exemple de diagramme de cycle de vie

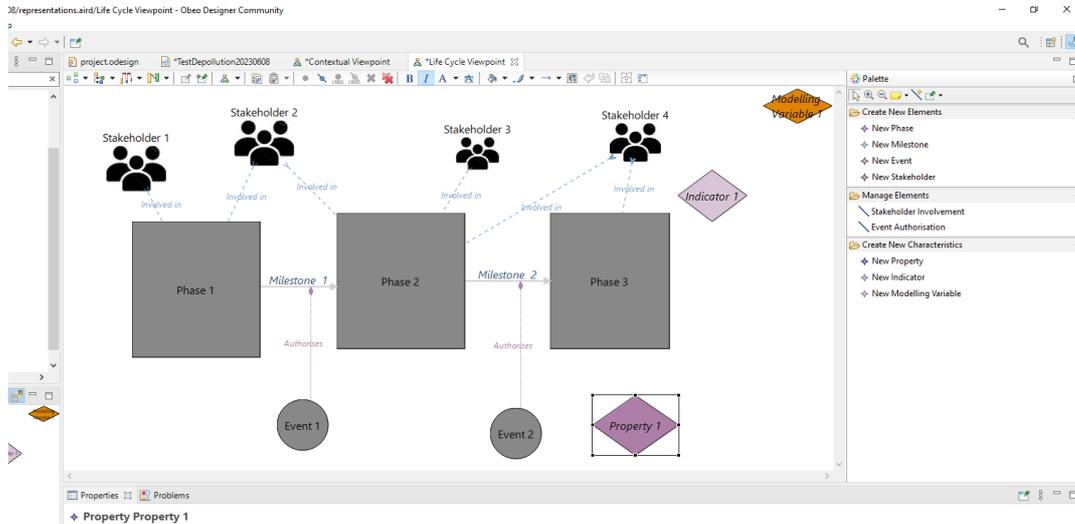


Figure 46: Life cycle diagramme

### 6.3.7. Data Management DSML

**Nom du DSML :** Data Management DSML

#### Objectifs de Modélisation

L'objectif de la modélisation du DSML de gestion des données est de formaliser et de cartographier les interconnexions entre les données et les informations générées et traitées par le système de dépollution. Il vise également à modéliser la structure du système d'information propre au système de dépollution. En cartographiant avec précision ces éléments, ce DSML facilite la navigation à travers l'écosystème complexe d'informations, et guide efficacement les équipes vers les données pertinentes nécessaires pour résoudre les divers défis rencontrés tout au long du projet. Par conséquent, le DSML de gestion des données joue un rôle crucial en fournissant une vision claire et organisée des informations, permettant ainsi une prise de décision plus éclairée et une meilleure gestion du projet de dépollution.

**Les objectifs propres à chaque professionnel métier souhaitant utiliser le DSML**

Le DSML de gestion des données est conçu pour être un outil utile pour un large éventail d'acteurs impliqués dans un projet de dépollution. Le maître d'ouvrage, par exemple, peut l'utiliser pour identifier et structurer les informations nécessaires à la réalisation du projet, en veillant à ce que toutes les données pertinentes soient prises en compte dans la planification et la mise en œuvre du système de dépollution.

Le maître d'œuvre, pour sa part, peut l'utiliser pour gérer et organiser les informations qui influencent la conception, la construction et le fonctionnement du système. Cela peut comprendre des données sur les technologies disponibles, les normes de dépollution à respecter, ainsi que des informations sur les coûts, les délais et les ressources nécessaires.

Les techniciens de maintenance peuvent également bénéficier de l'utilisation de ce DSML, car il peut leur fournir un moyen structuré d'accéder à des informations sur l'état et le fonctionnement du système de dépollution. Cela peut inclure des informations sur les composants du système, leur fonctionnement et leurs besoins en matière de maintenance, ainsi que des informations sur les éventuels problèmes ou défauts qui pourraient survenir.

Ce DSML de gestion des données est un outil polyvalent qui peut aider tous les acteurs impliqués dans un projet de dépollution à gérer et à utiliser efficacement les informations pertinentes pour leurs rôles et responsabilités spécifiques.

### **Place et cohérence dans le cycle de Vie**

Le DSML de gestion des données occupe une place centrale dans le cycle de vie d'un projet de dépollution, car il intervient à toutes les étapes du projet, depuis la conception initiale jusqu'à la maintenance et l'éventuelle mise hors service du système de dépollution :

- Phase 1 : Au stade initial du cycle de vie, le DSML de gestion des données peut aider à identifier et à structurer les données nécessaires pour la planification et la conception du système de dépollution. Cela peut inclure des données sur les technologies de dépollution disponibles, les normes réglementaires à respecter, les coûts estimés, etc.
- Phase 2 : Pendant la phase de construction et d'installation du système, le DSML de gestion des données peut aider à suivre l'évolution du projet et à identifier rapidement tout écart par rapport au plan initial. Les données pertinentes ici peuvent inclure des informations sur le progrès de la construction, les coûts réels par rapport aux estimations, les problèmes rencontrés, etc.
- Phase 3 : Une fois que le système est en place et en fonctionnement, le DSML de gestion des données peut aider à gérer les informations nécessaires pour le fonctionnement et la maintenance du système. Cela peut inclure des données sur l'efficacité du système, les problèmes de fonctionnement, les besoins de maintenance, etc.

- Phase 4 : Enfin, lorsque le système arrive en fin de vie et est mis hors service, le DSML de gestion des données peut aider à organiser les informations nécessaires pour la mise hors service, le démontage, et potentiellement le recyclage du système.

Dans chaque phase, le DSML de gestion des données contribue à assurer la cohérence et l'efficacité de la gestion de l'information, ce qui est crucial pour le succès du projet.

### Syntaxe abstraite

Les principales classes utilisées dans ce DSML (Figure 47) sont présentées dans ce qui suit :

**RECP** : Il symbolise à la fois la mémoire, la connaissance, l'expertise technique, conceptuelle et organisationnelle du système de dépollution.

**DataBase** : Un ensemble structuré d'informations stockées électroniquement, accessible et gérable via des outils.

**DocumentFile** : Un fichier numérique qui contient des informations ou des données, souvent sous forme de texte, d'images ou d'autres médias, destiné à la documentation ou à la communication d'informations.

**ElementReference** : Au cours de la modélisation, toute instance d'une classe du méta modèle est automatiquement référencé par une instance de cette classe, manipulée dans le RECP.

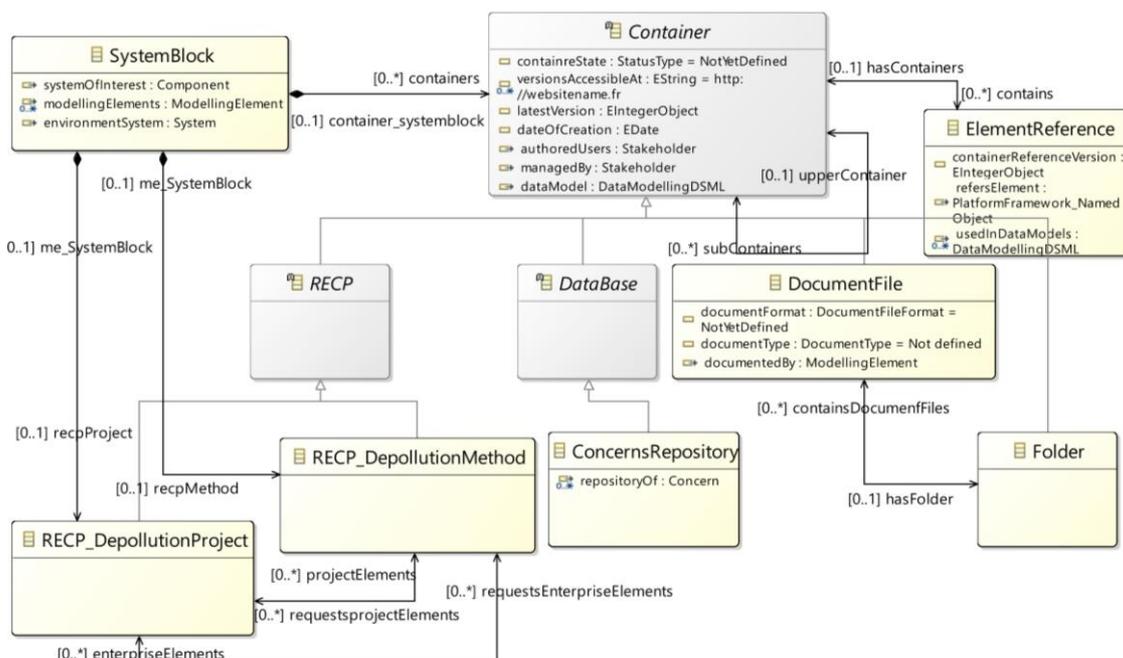


Figure 47: Data management DSML

### 6.3.8. Conclusion

Outre les 7 DSML proposés ci-dessus, deux autres langages de modélisation ont été élaborés pour enrichir ces DSML :

- Du TextualModellingLanguage, un langage de modélisation textuelle dont la syntaxe repose sur des grammaires BNF adaptées. Il est conçu pour spécifier divers éléments, tels que les événements du FunctionalDSML ou les conditions liées aux jalons du LifeCycleDSML.
- Un langage dédié à la simplification de la représentation visuelle des hiérarchies d'héritage. Ce dernier est couramment employé pour illustrer les décompositions fonctionnelles (Functional Breakdown Structure), structurelles (Product Breakdown Structure) ou relatives à l'activité (Work Breakdown Structure).

La méthode DEPOSE dispose donc maintenant d'un cadre de modélisation (Vues, DSML) sur lequel la démarche opératoire présentée dans la suite peut alors s'établir.

## 6.4. DEMARCHE OPERATOIRE

### 6.4.1. Niveau Depollution System

La démarche opératoire détaille quelles sont les activités et leur enchaînement pour que la méthode soit mise en œuvre en s'appuyant d'une part sur le méta modèle i.e. le vocabulaire métier de la dépollution, d'autre part sur les DSML proposés, enfin sur le ou les outils (informatiques ici) qui seront alors appelés à supporter la démarche opératoire et assister les utilisateurs i.e. les parties prenantes du DS ou du DN.

Chacune d'elle doit donc prendre en charge tout ou partie de certaines de ces activités selon ses compétences, aptitudes, disponibilité, ressources, besoins et savoir-faire. Cette démarche met ainsi en avant des activités de modélisation, de vérification et de validation, d'optimisation ou encore de gestion de DIC qui seront nécessairement menées de façon itérative et collaborative et couvrent indistinctement les phases de Design time et de Run time.

La démarche opératoire DEPOSE pour le DS se déroule comme suit :

#### a. Analyse de contexte du DS

- 1) Évaluer le site pollué et rassemblez toutes les données pertinentes, informations et documentations pour obtenir une compréhension complète de l'historique du lieu et les informations associées.
- 2) Scruter les enjeux et les potentialités liés au site pollué concerné.
- 3) Établir les missions, le parcours d'intervention et les plans d'action possibles.
- 4) Élaborer des stratégies opérationnelles initiales ainsi que les concepts nécessaires pour chaque phase du cycle de vie.
- 5) Assurer la traçabilité des études des mission et des procédures mises en œuvre.
- 6) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

**b. L'ingénierie des besoins du DS**

- 1) Identifier les parties prenantes
- 2) Élaborer une démarche pour identifier les attentes et les prérequis des parties prenantes.
- 3) Repérer et agencer les dispositifs, techniques et services qui faciliteront l'identification des besoins des parties prenantes.
- 4) Caractériser le contexte d'utilisation du DS lors de chaque phase de cycle de vie.
- 5) Déterminer les besoins des parties prenantes.
- 6) Catégoriser et hiérarchiser ces besoins.
- 7) Transcrire de manière formelle les besoins.
- 8) Concevoir des scénarios pour cerner les capacités du système.
- 9) Repérer les interactions entre le DS et ses utilisateurs.
- 10) Cerner les différentes contraintes.
- 11) Identifier les exigences et fonctions en rapport avec les contraintes identifiés
- 12) Formaliser le référentiel des exigences des parties prenantes.
- 13) Compléter le référentiel d'exigence
- 14) Spécifier les critères et les seuils d'acceptation

- 15) Retourner les exigences analysées aux parties prenantes concernées pour valider que leurs besoins et leurs attentes ont été capturés et exprimés de manière adéquate.
- 16) Résoudre les potentielles erreurs comme les conflits et les incohérences
- 17) Maintenir la traçabilité des besoins et des exigences des parties prenantes.
- 18) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

### **c. Ingénierie du DS**

- 1) Définir les fonctions que le DS doit réaliser.
- 2) Décomposer les fonctions en activités et des tâches.
- 3) Définir les compétences nécessaires pour chaque fonction.
- 4) Identifier les systèmes, composants, outils nécessaires pour chaque fonction.
- 5) Vérifier la compatibilité entre les fonctions et les compétences fournis par les systèmes choisis.
- 6) Vérifier la compatibilité entre les exigences des parties prenantes et les fonctions identifiées.
- 7) Résoudre les potentielles erreurs.
- 8) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

### **d. Adaptation du DS**

- 1) Déterminer les ressources matérielles, applicatives et humaines requises pour chaque élément composant le système.
- 2) Déterminer les types de caractéristiques des ressources déterminées.
- 3) Allouer chaque fonction aux ressources nécessaires.
- 4) Vérifier que les exigences restent cohérentes et suffisantes après l'allocation.
- 5) Affiner ou définir les interfaces entre les éléments du DS avec les entités externes.
- 6) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

**e. Contrôle continue du DS**

- 1) Identifier les parties prenantes de contrôle et analyse du DS
- 2) Sélectionnez les méthodes de contrôle continue du DS
- 3) Identifier et planifier les systèmes, outils et services contributeurs nécessaires pour soutenir le contrôle continue du DS.
- 4) Recueillir les données et les intrants nécessaires pour le contrôle continue.
- 5) Identifier et valider les hypothèses.
- 6) Appliquer les méthodes d'analyse sélectionnées pour effectuer le contrôle continue requise du DS.
- 7) Vérifiez la qualité et la validité des résultats de contrôle continue.
- 8) Établir des conclusions et des recommandations.
- 9) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

**f. Conception de l'architecture du DS**

- 1) Examiner les informations pertinentes et identifier les facteurs clés de l'architecture
- 2) Identifier les préoccupations (exigences, valeurs et contraintes) des parties prenantes en rapport avec l'architecture
- 3) Définir la feuille de route, l'approche et la stratégie de définition de l'architecture.
- 4) Définir les critères d'évaluation en fonction des préoccupations des parties prenantes et des principales exigences.
- 5) Identifier et planifier les systèmes ou services nécessaires pour soutenir la définition de l'architecture
- 6) Sélectionner, adapter ou développer des points de vue et des types de modèles en fonction des préoccupations des parties prenantes.
- 7) Saisir la justification du choix du ou des cadres, des points de vue et des types de modèles.
- 8) Sélectionner ou développer des techniques et des outils de modélisation de soutien.
- 9) Définir le contexte et les limites du système en termes d'interfaces et d'interactions avec les entités externes.

- 10) Identifier les entités architecturales et les relations entre entités qui répondent aux préoccupations des parties prenantes et aux exigences critiques du système.
- 11) Sélectionner, adapter ou développer des modèles des architectures candidates du système.
- 12) Composer des vues à partir des modèles conformément aux points de vue identifiés pour exprimer comment l'architecture répond aux préoccupations des parties prenantes et satisfait les parties prenantes.
- 13) Harmoniser les modèles d'architecture et les vues entre eux.
- 14) Définir les interfaces et les interactions entre les éléments du système et avec les entités externes.
- 15) Évaluer chaque architecture candidate en fonction des contraintes et des exigences.
- 16) Évaluer chaque architecture candidate par rapport aux préoccupations des parties prenantes en utilisant des critères d'évaluation.
- 17) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

#### **g. Implémentation des éléments du DS**

- 1) Définir la méthode d'implémentation
- 2) Identifier les contraintes de la stratégie d'implémentation, en fonction des exigences des parties prenantes.
- 3) Identifier et planifier les systèmes, outils et services contributeurs nécessaires pour soutenir le déploiement.
- 4) Réaliser ou adapter les éléments du système, selon la méthode, les contraintes et les procédures de mise en œuvre définies. (Hardware, software, services, ressources)
- 5) Enregistrez les résultats de l'implémentation et les éventuelles anomalies rencontrées.
- 6) Maintenir la traçabilité des éléments du système implémenté.
- 7) Fournir les éléments d'information clés qui ont été sélectionnés pour les bases de référence.

#### **h. Vérification et Validation du DS**

- 1) Sélectionner les méthodes ou techniques de vérification et validation appropriées et les critères associés pour chaque action de vérification.

- 2) Identifier les contraintes du système à partir de la stratégie de vérification et validation à incorporer dans les exigences du système, l'architecture ou la conception.
- 3) Identifier et planifier les systèmes, outils et services nécessaires pour soutenir la vérification et validation.
- 4) Définir les procédures de vérification, chacune supportant une ou un ensemble d'actions de vérification et validation.
- 5) Effectuez les procédures de vérification et validation.
- 6) Enregistrez les résultats de la vérification et les éventuelles anomalies rencontrées.
- 7) Enregistrer les incidents et les problèmes opérationnels et tracer leur résolution.
- 8) Obtenir l'accord des parties prenantes sur le fait que le système ou l'élément de système répond aux exigences.
- 9) Mettre en avant les informations cruciales qui ont été choisies comme références pour le projet.

#### **i. Clôture du DS**

- 1) Compiler tous les rapports, les données et les résultats obtenus pendant le projet. Documentez les méthodes utilisées, les défis rencontrés et les solutions adoptées.
- 2) Préparez un rapport final résumant les résultats du projet.
- 3) Mettre en place un système de surveillance pour surveiller régulièrement la zone dépolluée et s'assurer qu'aucune contamination résiduelle ne puisse se produire
- 4) Ceci peut inclure la mise en place d'équipements de surveillance ou des visites périodiques sur le site.
- 5) Informez toutes les parties prenantes (gouvernement, communauté locale, partenaires du projet, etc.) des résultats du projet.
- 6) Organisez des réunions ou des présentations pour partager les leçons apprises et discuter des prochaines étapes éventuelles.
- 7) Retirez tous les équipements et les matériaux utilisés lors du projet de la zone dépolluée.
- 8) Assurez-vous que le site est sûr et accessible pour la communauté ou pour un usage futur.

- 9) Analysez les succès et les défis du projet pour tirer des leçons qui pourront être appliquées à des projets similaires à l'avenir. Cette étape est essentielle pour l'amélioration continue.
- 10) Conservez tous les documents, données et rapports pertinents dans un endroit sûr pour référence future.

Cette démarche opératoire est modélisée sous forme d'un diagramme BPMN simplifié donné Figure 48 pour en améliorer la compréhension et la lisibilité.

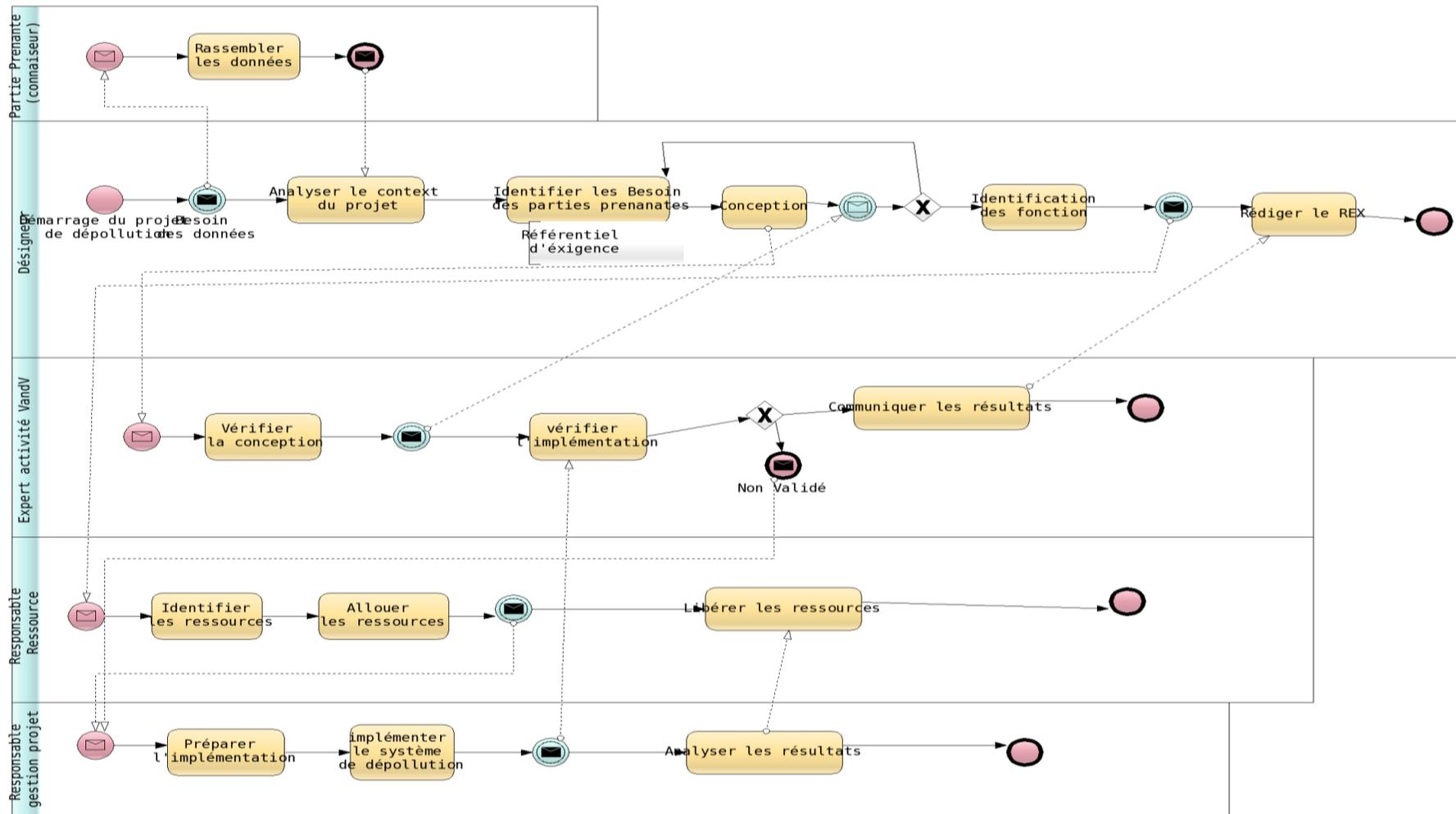


Figure 48: Démarche opératoire pour le niveau DS (BPMN simplifié)

### **6.4.2. Niveau Réseau de dépollution**

Au niveau du DN, notre approche s'appuie fortement sur les processus identifiés dans le chapitre 5. La mise en œuvre de cette démarche opératoire est cruciale pour garantir une coordination fluide et une mise en œuvre efficace des différents aspects du DN. Adopter une démarche opératoire sous forme de BPMN présente plusieurs avantages majeurs : elle offre une visualisation claire et structurée des processus, facilite la communication entre les parties prenantes, améliore l'efficacité en identifiant les goulots d'étranglement et permet une meilleure gestion des ressources en alignant les tâches selon leur priorité. Cette démarche, qui met en lumière les interactions et les flux de travail essentiels du DN, est synthétisée dans la Figure 49.

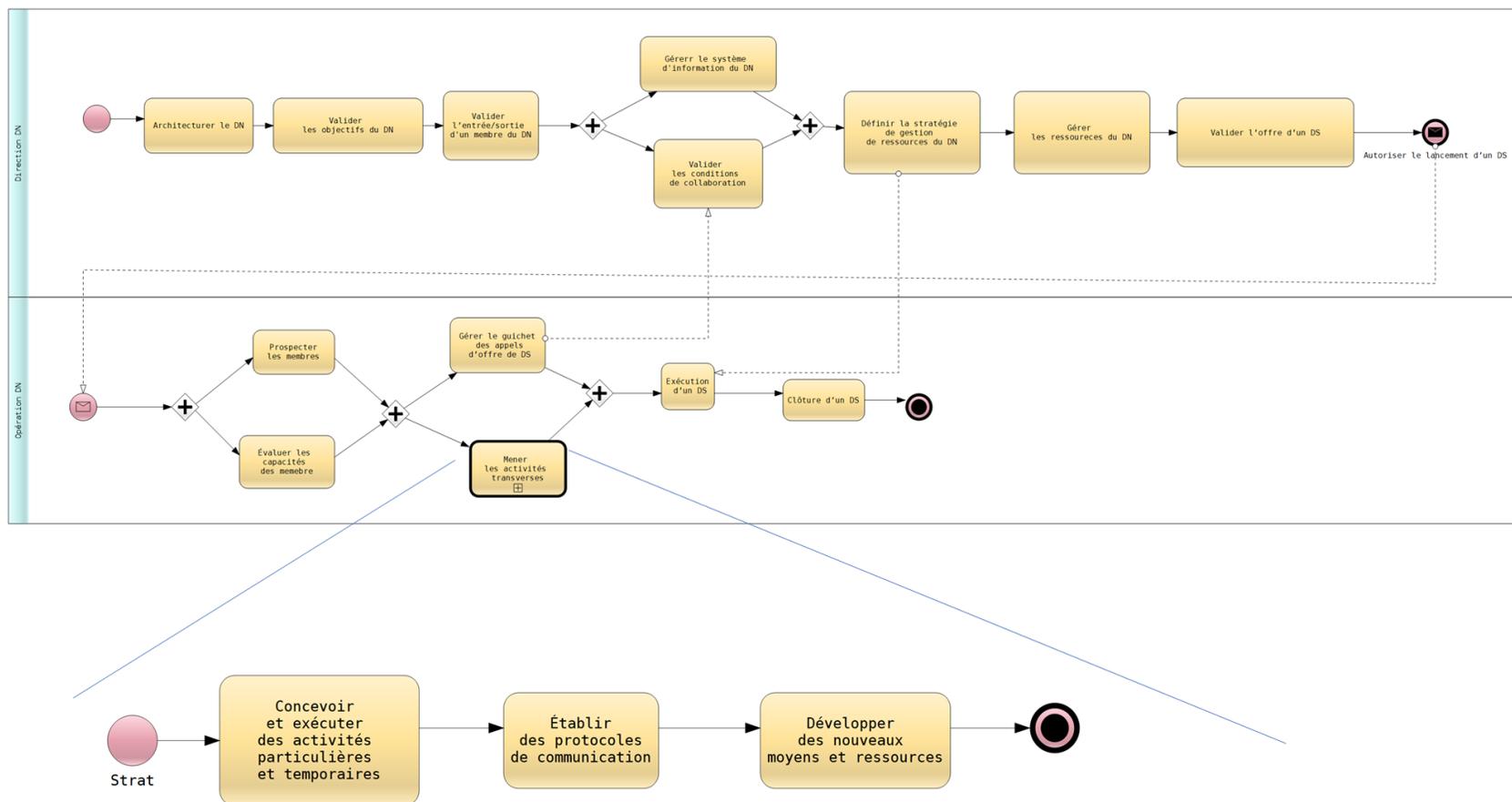


Figure 49: BPMN simplifié de la démarche opératoire pour le Niveau DN

## 6.5. RECP

Comme décrit plus haut, dans les composantes de la méthode DEPOSE, le RECP regroupe, gère et structure l'ensemble des Données, Informations et Connaissances d'une méthode. La Figure 51 synthétise comment est construit et formalisé le RECP.

Le RECP permet donc d'assister et de renforcer les activités de modélisation, ainsi que de réduire les erreurs ou les ambiguïtés. Il sert également à sensibiliser les modélisateurs, par exemple en attirant leur attention sur des modèles correspondant à des solutions qui n'ont pas pu être appliquées ou qui n'ont pas abouti. L'objectif est ainsi d'éviter de reproduire certaines erreurs passées et d'améliorer la qualité de la modélisation dans un temps court. Trois RECP cohabitent de fait dans la méthode DEPOSE, conformes au méta modèle évoqué plus haut et interagissent constamment :

- Le RECP Méthode vise l'objectif de guider et assister à comprendre la méthode DEPOSE dans ses concepts et son application selon divers contextes et besoins de réseaux et de projets ;

- Le RECP DS vise l'objectif de guider et assister les partenaires impliqués à mettre en œuvre concrètement la méthode DEPOSE sur leur propre Depollution System i.e. un projet de dépollution. On y retrouve également les principes, directives, recommandations, etc. indispensables pour la réussite d'un projet ou pour l'extension de la méthode. L'intention sous-jacente est de gagner en efficacité et en fiabilité lors de la conception et de la mise en œuvre de système de dépollution.

- Le RECP DN vise l'objectif de guider et assister des partenaires à construire puis entretenir un Depollution Network i.e. un réseau d'entreprises partenaires.

Le RECP s'appuie sur le métamodèle préalablement élaboré puisque ce dernier formalise en quelque sorte de manière ontologique le vocabulaire métier de la dépollution nécessaire pour concevoir et piloter un projet de dépollution ou mettre en œuvre et piloter un Depollution Network.

## 6.6. OUTIL

### 6.6.1. Le choix de l'environnement de modélisation

Comme évoqué dans la section 6.2, nos contributions offrent des langages de modélisation pour des systèmes de dépollution qui sont des SdS. Les méta-modèles discutés dans ce même chapitre ont été mis en œuvre via des éditeurs graphique ou textuelle. Cette réalisation a été possible grâce à l'utilisation de l'outil Obeo Designer<sup>4</sup> qui offre un ensemble d'outils nous permettant de créer notre propre environnement de modélisation avec diverses fonctionnalités propres aux DSML : vues spécifiques, couches, styles conditionnels, règles de vérification, outils de navigation, et bien plus.

Obeo Designer se révèle être un instrument efficace pour expliciter les choix de design, établir une architecture. C'est une méthode propice à l'établissement de moyens graphiques pour la conception de systèmes complexes tels que les systèmes de dépollution, tout en assurant la cohérence des données associées (architecture, références, attributs des composants, etc.). Grâce à Obeo Designer, nous avons la capacité de créer un environnement de modélisation sur mesure, entièrement adapté à n'importe quel domaine d'expertise, qui supporte le processus de conception utilisé, tout en exploitant les technologies de Modélisation Eclipse (EMF et GMF).

Un environnement de modélisation construit avec Obeo Designer comprend plusieurs éditeurs qui permettent aux utilisateurs de créer, modifier et visualiser des modèles. Ces éditeurs sont déterminés par un modèle qui établit la structure intégrale de l'environnement de modélisation, son comportement et l'ensemble des outils de navigation et d'édition. Cette caractérisation de l'environnement de modélisation Obeo Designer est interprétée dynamiquement par une exécution dans Eclipse. L'outil que nous cherchons à élaborer à partir de cet environnement de modélisation se positionne au cœur de l'ingénierie des systèmes. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de l'outil reconnu sous le nom de « Capella ».

C'est donc en se basant sur Obeo Designer que nous avons conçu notre outil de modélisation de système de dépollution. Il est structuré autour de plusieurs vues qui permettent de créer des diagrammes, en sachant que ces diagrammes sont interconnectés.

---

<sup>4</sup> <https://www.obeodesigner.com/en/>

## 6.6.2. Objectif de l'outil

La dernière composante de la méthode DEPOSE est l'outil appelé dans la suite DEPOSETOOL. Dans sa version préliminaire, de Preuve de Concept ou PoC, DEPOSETOOL permet la modélisation graphique et textuelle de certains des DSML présentés avant en restant conforme au méta-modèle. Cette première version a pour but d'illustrer puis d'analyser et d'évaluer la méthode DEPOSE. En effet, il est important de noter qu'une PoC n'est pas un produit fini. Elle a généralement une portée limitée et est développée spécifiquement pour tester une petite partie d'un système plus large ou pour démontrer qu'un certain concept est réalisable.

La Figure 50 donne une vue d'ensemble de l'outil de modélisation réalisé. Les diagrammes sont réalisés en tant que types de modèles dans Obeo Designer et mappés à des étapes spécifiques de la démarche opératoire. Grâce à cette structure, l'outil guide l'utilisateur dans le choix du bon diagramme selon l'étape de la démarche opératoire actuellement engagée. Les palettes de notation graphique sont contextualisées en fonction du type de modèle que l'utilisateur a sélectionné. À cet égard, cet outil prend en charge la modélisation multi-vues et cache la complexité à l'utilisateur. Basée sur la démarche opératoire, une procédure de modélisation a été réalisée.

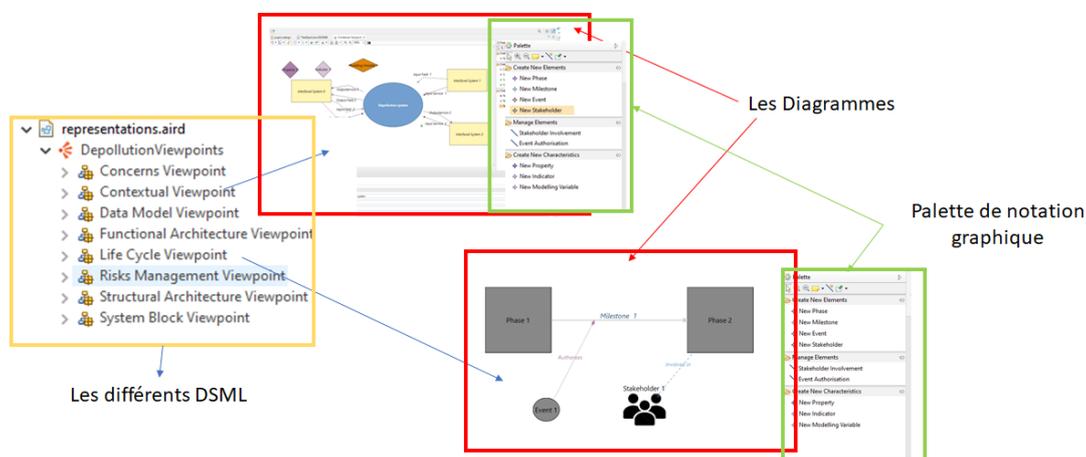


Figure 50: Aperçu de l'outil de modélisation

## 6.6.3. DEPOSETOOL

Développer un outil de modélisation sur Obeo Designer offre la possibilité de réaliser une preuve de concept pour la méthode DEPOSE. Dans le cas d'une méthode qui aiderait les parties prenantes à concevoir et piloter un projet de dépollution efficacement, la PoC aurait plusieurs objectifs.

Tout d'abord, DEPOSETOOL peut simplifier la conception et la gestion du projet. L'outil peut, par exemple, permettre de visualiser clairement le processus de dépollution, de planifier les différentes étapes et d'allouer les ressources nécessaires. Il pourrait également intégrer des fonctionnalités d'analyse des risques pour identifier et gérer proactivement les éventuelles difficultés.

De plus, la PoC permettrait de démontrer l'efficacité de la méthode. Cela pourrait se faire en comparant les résultats obtenus avec l'outil de modélisation avec ceux obtenus sans, ou en montrant comment l'outil permet d'atteindre les objectifs fixés de manière plus rapide, plus sûre ou plus économique.

Ensuite, la PoC serait également une occasion de recueillir des commentaires des parties prenantes sur l'outil et la méthode. Cela permettrait d'identifier les éventuelles améliorations à apporter avant le déploiement complet.

Enfin, un site web local a été développé (Figure 52) pour donner accès au contenu du RECP vu alors comme une base de données centralisée.

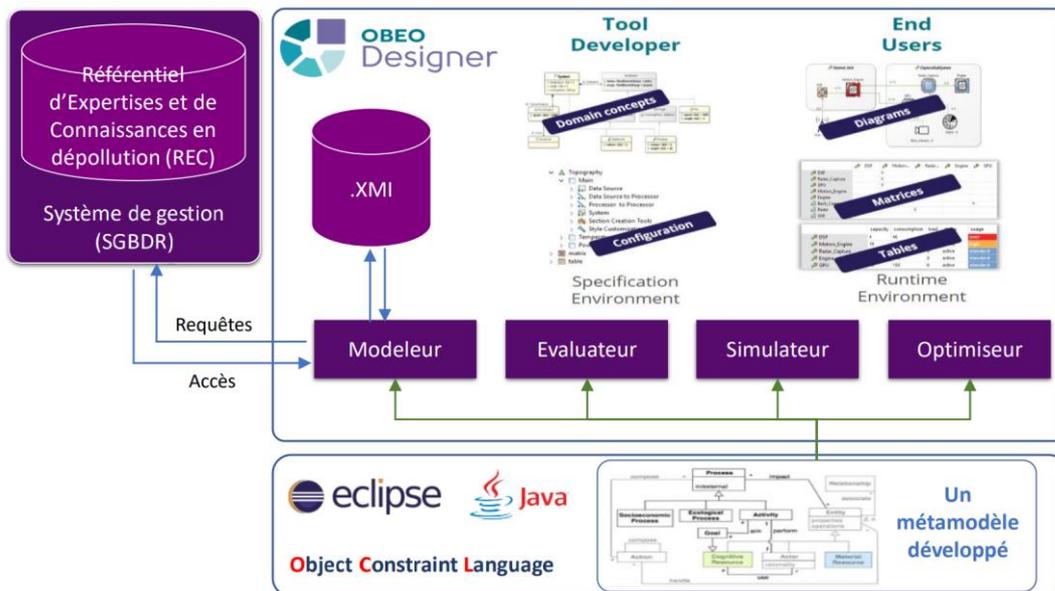


Figure 51: schéma de principe de l'intégration technique du RECP

Cette plateforme est conçue pour héberger tous les fichiers relatifs au projet de dépollution, garantissant un accès et un téléchargement aisés. Elle offre un point unique de stockage et de consultation pour toutes les informations liées à l'initiative de dépollution, assurant une gestion optimale des données et documents du projet.

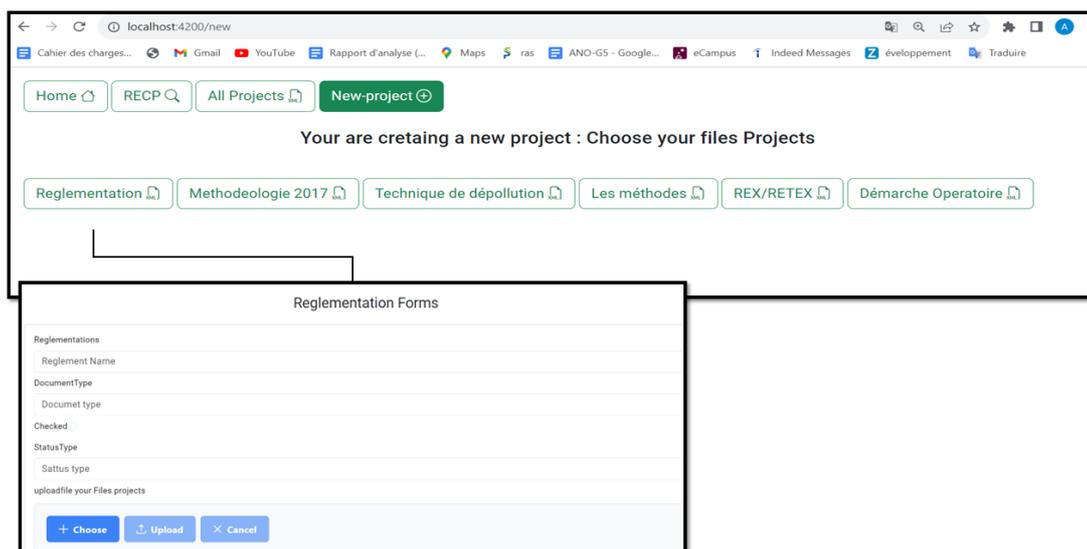


Figure 52: Extrait de RECP développé

## 6.7. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Le Tableau 15 récapitule les apports significatifs de la méthode DEPOSE au niveau DS.

Tableau 15: Contributions par la méthode DEPOSE au niveau DS

Contribution par la méthode DEPOSE au niveau DS	
<b>Concept</b>	<p><b>Approche Industrialisée</b> : La méthode DEPOSE présente une vision industrielle unifiée et reproductible pour la dépollution.</p> <p><b>Reconnaissance des Variations</b> : Elle prend en compte les nuances spécifiques à chaque site industriel pollué.</p> <p><b>Sélection Rigoureuse</b> : Ces données doivent être choisies en fonction des exigences propres à chaque situation et provenir d'une source unique.</p> <p><b>Fondements Systémiques</b> : L'approche s'ancre dans des principes systémiques, allant au-delà de simples techniques.</p> <p><b>Démarche Intégrée</b> : Elle offre une compréhension et une procédure intégrales pour la dépollution.</p> <p><b>Vision Holistique</b> : La méthode DEPOSE met en avant une stratégie globalisante, structurée et englobante, assurant une dépollution complète et durable.</p>
<b>Langages</b>	<p><b>Langage Clair</b> : Proposer un langage précis et dénué d'ambiguïté dédié à la description de la dépollution.</p> <p><b>Adaptabilité</b> : Ce langage doit être modulable, permettant l'ajout cohérent de nouveaux concepts en réponse aux spécificités des différents contextes et aux particularités des sites industriels pollués concernés.</p> <p><b>Langages Métiers</b> : Mise en place des DSML (Domain Specific Modeling Languages).</p> <p><b>Modèles</b> : Promouvoir une démarche centrée sur les MBSE.</p>
<b>Outil</b>	<p><b>Outil Multifonctionnel</b> : Utilisation d'un instrument méthodologique et informatique pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mettre en œuvre la méthode DEPOSE.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipuler les données de manière efficace.</li> </ul> <p><b>Modélisation Élaborée :</b> Cibler et représenter les éléments cruciaux du système de dépollution.</p> <p><b>Intégration de DEPOSETOOL :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilite l'instanciation et la gestion des concepts, relations et attributs.</li> <li>• Appuie sur le méta-modèle, offrant une approche unique et ajustée.</li> <li>• Garantit une précision adaptée aux besoins du processus de dépollution.</li> </ul>
<b>Démarche opératoire</b>	<p><b>Définition des Processus :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Établir des protocoles pour une intégration efficace de la méthode par toutes les parties prenantes.</li> <li>• Veiller à l'adoption effective lors de la mise en œuvre dans des projets concrets.</li> </ul> <p><b>Orchestration des Activités :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coordonner et structurer les responsabilités de chaque partie prenante.</li> <li>• Veiller à la clarté des rôles et des activités au sein du projet.</li> </ul> <p><b>Les parties prenantes dans les processus :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mettre en avant l'importance de chaque partie prenante dans le processus.</li> </ul>
<b>RECP</b>	<p>Établir une base solide d'expertises et de pratiques. Favoriser un partage et un accès facile pour toutes les parties prenantes. Conception adaptative permettant l'intégration et l'évolution des données. Enrichir chaque description de modèle avec des informations pertinentes tirées des bases de connaissances associées.</p>

## **7. APPLICATION DE LA METHODE DEPOSE**

## 7.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à l'application pratique de la méthode DEPOSE. Nous allons confronter notre méthode à un cas réel pour évaluer sa robustesse et son efficacité. Cet exercice de "preuve de concept" est essentiel pour démontrer l'application de notre méthode dans un contexte du monde réel. Pour ce faire, nous avons collaboré avec la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), qui nous a fourni des données sur des sites industriels qui ont déjà fait l'objet d'une dépollution. Un site en particulier, désigné sous le pseudonyme de "Site Alpha" pour des raisons de confidentialité et de non-divulgateur d'informations sensibles, sera notre principal cas d'étude. Ce site était classé comme Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et a nécessité un projet de dépollution complet en raison de la pollution qu'il a générée.

Tout au long de ce chapitre, nous détaillerons comment les éléments de la méthode DEPOSE ont été mis en œuvre et manipulés dans ce contexte réel. Nous commencerons par une analyse approfondie de la situation existante, identifiant les problèmes rencontrés au cours de ce projet de dépollution. Ensuite, nous adopterons la méthode proposée, l'appliquerons et la modéliserons. Une fois cela fait, nous évaluerons si la méthode a eu un impact sur les problèmes précédemment identifiés, ou non, et identifierons les éventuelles limites de cette méthode.

Ces conclusions serviront de base à la synthèse finale et à la conclusion générale de ce manuscrit, où nous établirons le potentiel de déploiement de la méthode DEPOSE dans des projets futurs de dépollution.

## 7.2. PRESENTATION DU CAS D'APPLICATION

### Présentation du Site

Le site « Alpha », anciennement exploité par « Beta France SAS » pour la production de gelcoats, peintures et résines, couvre une superficie d'environ 56 000 m<sup>2</sup> dont 8 000 m<sup>2</sup> de bâtiments. Il est situé en zone urbaine d'une commune française non divulguée. Suite à sa classification comme Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et à la pollution générée au fil des années, le site nécessite une dépollution. Ses opérations ont débuté dans les années 70, mais depuis 2010, l'activité a décliné, s'arrêtant totalement en 2014.

## Études et Investigations sur le Site

Après l'arrêt des activités, « EcoEng » fut mandaté pour les études préliminaires de dépollution et pour superviser le projet. Depuis le milieu des années 1990, de nombreuses investigations environnementales ont été menées. L'étude historique de 2019 réalisée par « EcoEng » a identifié plusieurs zones à risque, notamment des concentrations élevées en hydrocarbures totaux (HCT) et Composés Organiques Volatils (COV). Des investigations supplémentaires ont été réalisées fin 2019 et début 2020.

### Sources de Contamination Identifiées

Une contamination des sols dans différentes zones :

- zone Nord-Ouest du site, avec des impacts localisés en éthylbenzène et styrène en plusieurs points ;
- zone Centre-Ouest, avec des teneurs de bruit de fond en HCT, associées à des concentrations isolées en éthylbenzène, styrène, xylènes, plomb et chrome ;
- zone Centre-Est, qui présente un impact localisé en HCT au niveau de l'ancienne cuve aérienne de fioul domestique ;

Une contamination localisée des eaux souterraines dans la zone Nord-Ouest par :

L'éthylbenzène et le styrène, et dans une moindre mesure par l'arsenic, en corrélation avec les impacts en éthylbenzène et styrènes identifiés dans les sols de cette zone. Les voies potentielles de migration et d'exposition sur site associées aux impacts identifiés sur le site sont présentées ci-après :

Lixiviation des composés identifiés dans les sols vers les eaux souterraines au droit du site :

Volatilisation de l'éthylbenzène, du styrène et des coupes volatiles ou semi-volatiles d'hydrocarbures identifiées dans les sols et les eaux souterraines et leur migration verticale par diffusion vers la surface du sol (via les gaz du sol) puis dilution dans l'air ambiant extérieur étant donné l'absence de bâtiment sur le site, suite aux travaux de démolition.

### Plan de Dépollution

Le plan de dépollution se concentrera sur trois sources principales de pollution. L'approche envisagée est l'excavation et le traitement biologique sur place. Si nécessaire, des interventions hors site pourront être menées pour les matériaux incompatibles avec le remblaiement. Une fois la dépollution achevée, les fouilles seront remblayées avec des matériaux traités ou des matériaux inertes externes.

### **Suivi Post-Dépollution**

Un suivi de la qualité des eaux souterraines est prévu dès 2019, pendant deux ans après la fin des travaux de réhabilitation.

## **7.3. ANALYSE DE L'EXISTANT**

Dans cette partie de l'étude, l'attention est portée sur l'analyse de l'existant du projet de dépollution du site Alpha. L'objectif est d'identifier et de comprendre les défis et problèmes rencontrés à deux moments cruciaux du projet : pendant la phase de conception (ou Design time) et pendant la phase d'exécution (ou Run time).

Pour effectuer cette analyse, une série de documents et d'informations relatifs à l'étude du projet de dépollution du site Alpha a été examinée. Au total, 9 documents distincts, regorgeant d'informations détaillées et approfondies, ont été consultés. Les problèmes rencontrés lors de ce projet de dépollution sont décrits dans les chapitres ci-dessous.

## **7.4. PROBLEMES LIES AU DESIGN TIME**

### **7.4.1. Manque de validation préliminaire**

Dans l'analyse de projet de dépollution de site Alpha, nous avons identifié un problème critique lié à un manque de validation préliminaire. Plus précisément, il semble que la capacité de prédire avec précision les besoins en ressources et la performance du système avant sa mise en œuvre a été négligée.

Dans ce projet en particulier, le système de traitement biologique avait été conçu pour traiter jusqu'à 50 tonnes (chiffre indicatif) de sol pollué par jour. Cependant, en l'absence d'une validation préliminaire appropriée, comme une simulation avec un modèle, l'équipe du projet n'a pas réalisé que certaines conditions, telles qu'un type spécifique de polluant ou des variations de température, pourraient considérablement réduire cette capacité. En conséquence, lorsque le projet a été mis en œuvre, le système ne pouvait traiter que 30 tonnes par jour, alors que l'excavation produisait 50 tonnes de sol pollué par jour. Cette situation a entraîné une accumulation de sol en attente de traitement et a provoqué des retards importants dans le projet.

Cet exemple illustre clairement comment un manque de validation préliminaire, qui aurait permis d'identifier et de prendre en compte ces variables, a conduit à une sous-estimation de la capacité nécessaire pour le traitement biologique. Cela a ensuite eu un impact négatif sur la mise en œuvre du projet, entraînant des retards et probablement une augmentation des coûts. Une approche d'ingénierie des systèmes telle que le MBSE aurait pu contribuer à éviter ce genre de problèmes.

### **7.4.2. Manque de flexibilité dans la conception**

Lors de l'analyse de projet de dépollution de site Alpha, il y a eu une difficulté majeure liée au manque de flexibilité dans la conception. En particulier, il semble que le système n'était pas préparé à s'adapter à des conditions imprévues ou changeantes, ce qui a provoqué des problèmes lors de la mise en œuvre du projet.

Pour illustrer, prenons en compte la façon dont le projet avait été conçu initialement : le sol contaminé devait être excavé puis immédiatement placé dans une zone de traitement biologique sur site. Toutefois, une fois le projet lancé, l'équipe a découvert des zones de contamination bien plus profondes que prévu. Cela a engendré une prolongation de la phase d'excavation, retardant ainsi le moment où le sol pouvait être acheminé vers la zone de traitement.

Si la conception du projet avait été plus flexible, une solution telle qu'un espace de stockage temporaire sur site pour le sol contaminé aurait pu être envisagée. Ceci aurait permis de continuer l'excavation tout en commençant le traitement du sol déjà excavé, réduisant ainsi les retards potentiels.

Cependant, en raison d'un manque de flexibilité dans la conception, aucune provision pour un stockage temporaire n'avait été prévue. Par conséquent, l'excavation devait être interrompue chaque fois que la zone de traitement était pleine. Cette situation a non seulement entraîné des retards dans le projet, mais a également probablement engendré des coûts supplémentaires.

Cela souligne l'importance de la flexibilité dans la conception des projets, en particulier lorsqu'il s'agit de projets complexes tels que la dépollution du sol.

### **7.4.3. Traçabilité des exigences**

Lors de notre analyse de l'existant dans ce projet de dépollution, nous avons identifié un problème majeur lié à la traçabilité des exigences. Le manque de clarté

et de documentation précise concernant la manière dont les exigences spécifiques ont influencé les décisions de conception s'est révélé être une source de confusion et a entravé l'efficacité de la gestion du projet.

Pour mettre ce problème en contexte, une exigence spécifique de ce projet était de minimiser la perturbation du site pendant l'excavation. Cela a clairement influencé le choix des machines d'excavation, qui ont été sélectionnées pour leur capacité à opérer avec un minimum de bruit et de perturbations. Cependant, l'absence de documentation détaillée sur la manière dont cette exigence a guidé la sélection de l'équipement a engendré des incompréhensions parmi les parties prenantes. Certaines d'entre elles ont questionné le choix des machines, perçues comme moins efficaces.

Ce manque de traçabilité des exigences a compliqué la gestion du projet. Sans une compréhension claire de la manière dont chaque exigence a influencé la conception du système, il est difficile d'assurer que toutes les exigences sont correctement prises en compte et respectées. De plus, cela rend l'évaluation de l'impact de toute modification des exigences sur le système plus complexe.

Cet exemple illustre l'importance d'adopter une approche d'ingénierie des systèmes, telle que le MBSE, qui permet de documenter et de suivre précisément comment chaque exigence influence les décisions de conception. Une telle approche aurait grandement facilité la gestion des exigences dans ce projet de dépollution, évitant ainsi la confusion et contribuant à une mise en œuvre plus efficace.

## **7.5. PROBLEME LIE AU RUN TIME**

### **7.5.1. Performance insuffisante**

Dans le cadre de notre analyse du projet de dépollution du site Alpha, nous avons remarqué un problème de performance insuffisante lié au processus de bioremédiation. Plus précisément, les biopiles mises en place pour décomposer les polluants du sol n'ont pas atteint l'efficacité prévue.

Initialement, les calculs de conception avaient prévu que les biopiles seraient capables de réduire la concentration des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) de 10 000 mg/kg à 1 000 mg/kg en 30 jours. Cependant, lors de la phase de mise en œuvre, après 30 jours de traitement, il a été constaté que la concentration d'HPT n'était réduite qu'à 3 000 mg/kg.

La cause de cette performance insuffisante pourrait être multifactorielle. Parmi les facteurs potentiels figurent une évaluation erronée de l'efficacité des microorganismes utilisés dans le processus de bioremédiation ou une variation imprévue des conditions environnementales sur le site, affectant la survie et l'efficacité des microorganismes. De plus, des facteurs inhérents au sol lui-même, tels que la présence d'autres polluants inhibant l'activité microbienne, pourraient également avoir contribué à la performance inférieure aux prévisions.

Ce problème de performance insuffisante a eu des implications significatives pour le projet, entraînant des retards dans le calendrier de dépollution et probablement une augmentation des coûts.

### **7.5.2. Manque de réactivité face aux imprévus**

Dans l'analyse de l'existant du projet de dépollution sur le site Alpha, nous avons identifié un problème clé : un manque de réactivité face aux imprévus, particulièrement dans le contexte de la découverte de nouvelles sources de contamination.

Concrètement, lors de l'excavation d'une zone spécifique, l'équipe du projet a mis au jour une poche de contamination aux métaux lourds, alors que le plan initial était conçu pour traiter une pollution par des hydrocarbures. Cette découverte a posé un défi significatif car elle nécessitait une modification urgente des méthodes de traitement, avec un impact potentiel sur le calendrier du projet et son budget.

Cependant, le projet a rencontré des difficultés pour évaluer rapidement l'impact de cette nouvelle source de pollution et pour adapter le plan de traitement en conséquence. Il a fallu du temps pour comprendre comment cette nouvelle contamination affectait le reste du système de dépollution, et comment les méthodes de traitement devaient être ajustées. Pendant ce temps, le projet a subi des retards et les coûts ont commencé à augmenter.

Cette situation illustre un manque de réactivité face aux problèmes inattendus, qui pourrait être amélioré grâce à une meilleure intégration de l'ingénierie des systèmes, et en particulier de la méthode MBSE, dans le processus de planification et de gestion du projet.

### **7.5.3. Absence d'évolutivité du système de dépollution.**

Dans notre analyse du projet de dépollution du site Alpha, nous avons identifié une difficulté majeure liée à l'adaptabilité du système face à des changements imprévus concernant les parties prenantes.

Par exemple, l'entreprise XYZ, initialement responsable de l'excavation des sols contaminés, a dû interrompre ses services pour le projet. De ce fait, il a été nécessaire de trouver une autre entreprise offrant des services équivalents, dont le système d'excavation est compatible avec le procédé de traitement, notamment en termes de vitesse et de capacité. Cette transition, incluant la publication d'un appel d'offres et la sélection d'une nouvelle entité, a engendré des retards significatifs et des surcoûts.

Malheureusement, le système a été conçu avec un manque de flexibilité, ce qui rend ces ajustements difficiles et coûteux. De plus, cela entraîne un retard dans le projet, car le temps nécessaire pour adapter le système à la nouvelle machine d'excavation n'était pas prévu dans le calendrier initial du projet.

Ce problème illustre que le système de dépollution ne peut pas s'adapter à l'évolution des sous-systèmes qui le composent et qui évoluent au cours du temps.

Dans la prochaine phase du travail, l'ensemble des informations recueillies sera repris pour appliquer la méthode DEPOSE et examiner en détail le projet de dépollution. L'objectif est de modéliser le projet avec les outils spécifiques à cette méthode, pour déterminer si les problèmes identifiés lors de l'analyse précédente peuvent être résolus ou atténués.

## **7.6. APPLICATION DE LA METHODE DEPOSE**

En utilisant des éléments clés de la méthode DEPOSE, des modèles seront développés pour refléter divers aspects du projet, y compris les relations entre parties prenantes, la distribution des contaminants, le processus d'excavation, et les exigences réglementaires.

En explorant les interactions dans ce modèle, des stratégies peuvent être identifiées pour traiter les défis reconnus. Par exemple, il pourrait être possible de créer des solutions pour les problèmes de traçabilité ou d'améliorer la réactivité du projet face à des surprises.

### 7.6.1. Parties Prenantes

L'analyse des différents documents fournis par EcoEng nous a permis d'identifier la plupart des parties prenantes de ce projet. L'ensemble des parties prenantes identifiées sont classées par type dans le Tableau 16 :

Tableau 16: Classement par type des parties prenantes

Type de partie prenante	Parties prenantes identifiées
Législateur/ régulateur	Préfète / Maire de Pujaut / DREAL / Inspection des installations classées protection de l'environnement
Propriétaire	Beta France SAS
Chef de projet	Beta France SAS
Client	Beta France SAS /GelCoatCompany (utilisateur future)
Opérateurs	DeppSpecialiste
Équipe de projet	EcoEng
Fournisseurs (services)	AlphaTech/BetaServ/GammaSolutions/DeltaSystems /EpsilonLabs/ZetaControls/EtaTestings/ThetaWasteCo/IotaEnviro /KappaEng/LambdaDesigns/MuSolutions
Public	Association de riverains / élu politique / Service des eaux
Opposants	Opposants au projet

Chacune de ces parties prenantes possède une finalité propre que nous avons essayé de définir et intervient dans une ou plusieurs phases du projet. Toutes ces informations sont résumées dans le Tableau 17 :

Tableau 17: Finalité et Intervention des Parties Prenantes

Parties prenantes	Finalité	Phase(s) d'intervention
Beta France SAS	Fabriquer des composés chimiques industriels	P1 / P2 / P3 / P4
EcoEng	Assister les entreprises dans la conception et gestion de projets complexes	P1 / P2 / P3 / P4
LotaEnviro/ kappaEng/ LambdaDesigns/ MuSolutions/ NuConstruct	Investigations environnementales. Analyser des données.	P1
ZetaControls / EtaTestings	Analyser des prélèvements	P1
EpsilonLabs	Analyser des prélèvements	P1 / P3 / P4
DeltaSystems (Géomètres)	Mesurer précisément et officiellement	P1
BetaServ	Réaliser des prélèvements de sols	P1
GammaSolutions	Effectuer des chantiers de démolition	P1
DeppSpecialiste	Effectuer des travaux de dépollution et réhabilitation des sites pollués	P2 / P3 / P4

AlphaTech	Assister les entreprises dans la prévention des risques techniques et humains	P2 / P3
Maire de la commune voisine	Administrer la commune	P2 / P3 / P4
Préfet	Représenter localement l'État	P2 / P3 / P4
DREAL	Faire appliquer localement des politiques publiques des ministères d'écologie et de la cohésion des territoires	P2 / P3 / P4
Association de riverains	Vivre dans la commune	P2 / P3
Inspection des installations classées protection de l'environnement	Protéger l'environnement	P2 / P3 / P4
Opposants au projet	Faire annuler le projet	P2 / P3 / P4
Entreprises de traitement des déchets	Traiter des déchets	P3
Élu politique	Représenter les administrés et les autorités locales	P2 / P3 / P4
Futurs usagers	Exploiter le site anciennement Beta France SAS	-

Une fois les actions de chaque partie prenante identifiées, des notes de pouvoir, de légitimité et d'urgence ont été attribuées à chacune. Ces notes ont ensuite facilité le classement des parties prenantes par ordre d'importance. Le détail des notes pour chaque partie prenante est présenté dans le Tableau 18 :

*Tableau 18: Classement par note des parties prenantes*

Partie prenante	Note de pouvoir	Note de légitimité	Note d'urgence	Note Totale
Beta France SAS	3	1.5	0.75	5.25
Inspection des installations classées protection de l'environnement	3	1.5	0.75	5.25
Préfet	3	1.5	0.75	5.25
DREAL	3	1.5	0.5	5
EcoEng	3	1	0.75	4.75
Maire	3	1.5	0.25	4.75
AlphaTech	2	1	0.75	3.75
Élu politique	2	1	0.25	3.25
LotaEnviro/ kappaEng/ LambdaDesigns/ MuSolutions/ NuConstruct	2	1	0	3
GelCoatCompany	1	1	0.25	2.25
Entreprises de traitement des déchets	1	0.5	0.5	2
DeppSpecialiste	1	0.5	0.5	2
ZetaControls / EtaTestings	1	0.5	0.25	1.75

EpsilonLabs	1	0.5	0.25	1.75
DeltaSystems	1	0.5	0.25	1.75
Associations de riverains	1	0.5	0.25	1.75
Opposants au projet	1	0	0	1
BetaServ	0	0.5	0.25	0.75
GammaSolutions	0	0	0.5	0.5

## 7.6.2. Diagramme de contexte

Les différentes parties prenantes interviennent lors du cycle de vie d'un système de dépollution vu dans le Tableau 17.

Lors de la phase d'identification du problème, le système n'existe pas, il n'est donc pas possible de représenter les systèmes à l'interface ainsi que les relations entre ces systèmes et le système de dépollution.

En utilisant DESPOSETOOL, spécialement conçu pour cette méthode, la Figure 53 illustre le diagramme de contexte du système de dépollution durant la phase de conception. Il a été possible de modéliser les systèmes en interface qui interagissent avec le système de dépollution, ainsi que les services et les flux échangés.

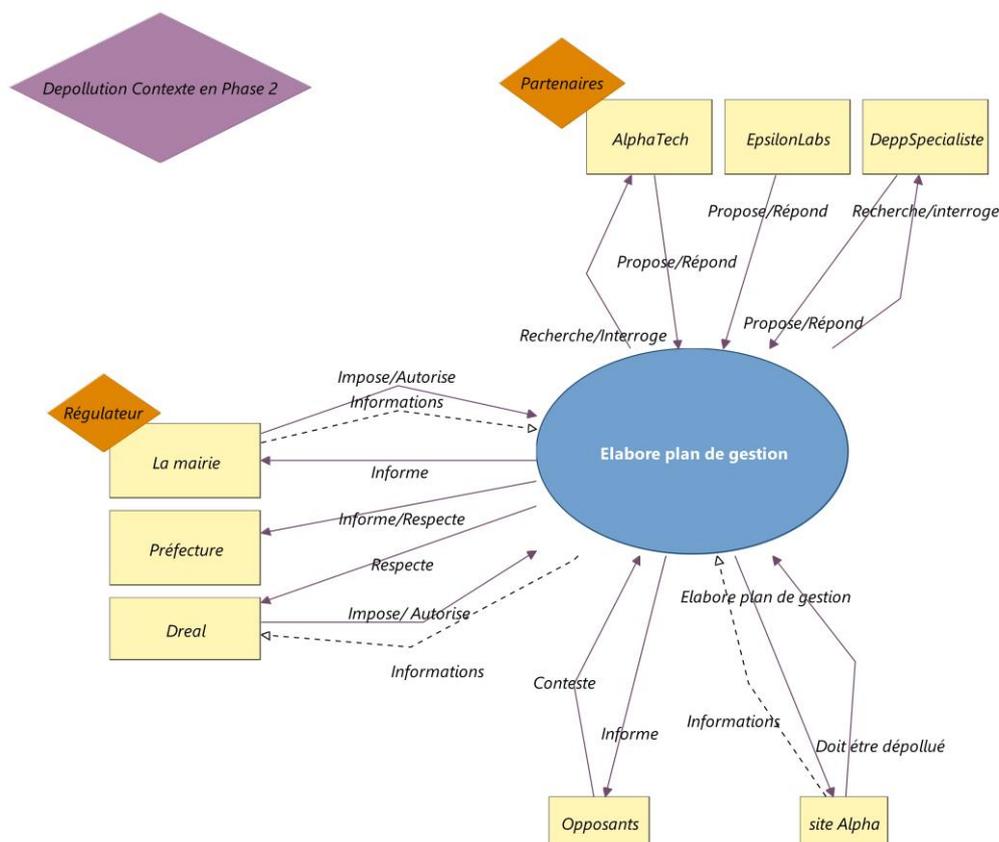


Figure 53: Diagramme de contexte phase de conception

### 7.6.3. Exigences

Les exigences du projet ont été identifiées puis catégorisées en fonction de leur nature, qu'elles soient fonctionnelles ou non fonctionnelles. Cette classification permet une meilleure organisation et une gestion plus efficace des besoins du projet dans le Tableau 19.

Tableau 19: Référentiel des exigences

Exigences	Type d'exigence
Délimiter l'extension de la pollution en hydrocarbures	Fonctionnelle
Déterminer l'impact du plomb au droit du repère EcoEng -10	Fonctionnelle
Excaver entre 1800 et 2200 m <sup>3</sup> de sols pollués	Fonctionnelle
Mettre en sécurité les zones excavées	Fonctionnelle
Concasser les dalles des bâtiments	Fonctionnelle
Remblayer partiellement les zones excavées avec les matériaux concassés	Fonctionnelle
Bio traiter en biopile ventilée pendant 6 mois	Fonctionnelle
Consigner les plaintes	Fonctionnelle
Mesurer ponctuellement la qualité de l'air	Fonctionnelle
Éliminer les déchets produits	Fonctionnelle
Établir des bordereaux de suivi des déchets	Fonctionnelle
Informersur les nouvelles sources de pollution détectées	Fonctionnelle
Informersur de tout incident ou accident susceptible de porter atteinte à l'environnement	Fonctionnelle
Surveiller la qualité des eaux de rejet	Fonctionnelle
Installer une unité de traitement des eaux	Fonctionnelle
Traiter les eaux de fond de fouille	Fonctionnelle
Traiter les eaux de ruissèlement des eaux pluviales	Fonctionnelle
Surveiller la qualité des eaux souterraines	Fonctionnelle
Surveiller la qualité des eaux souterraines pendant 2 ans après les travaux 1 fois par semestre	Non Fonctionnelle
Suivre les niveaux en arsenic, acétone, éthylbenzène, styrène et HCT	Fonctionnelle
Envoyer un rapport de synthèse des suivi	Fonctionnelle
Envoi du rapport de synthèse des suivis sous 4 mois après les campagnes de suivi	Non Fonctionnelle
Synthétiser la surveillance des eaux souterraines dans un rapport bilan	Fonctionnelle
Établissement du rapport bilan sous 4 mois après la dernière campagne de prélèvements	Non Fonctionnelle
Comblers les puits PW1 à PW3	Fonctionnelle
Envoyer un rapport de fin de travaux de comblement	Fonctionnelle
Envoi sous 4 mois après la fin des travaux de comblement	Non Fonctionnelle
Envoyer un rapport d'exécution et de contrôle des mesures de remise en état du site	Fonctionnelle
Envoi du rapport au préfet sous 6 mois	Non Fonctionnelle
Mettre à jour l'analyse des risques résiduels	Fonctionnelle
Envoyer la mise à jour	Fonctionnelle

Transmettre le dossier de servitude	Fonctionnelle
Envoi du dossier sous 1 an	Non Fonctionnelle
Proposer un dossier de demande d'institution des restrictions d'usage au préfet	Fonctionnelle
Démanteler les bâtiments	Fonctionnelle
Assurer la sécurité des opérateurs	Fonctionnelle
Seuil de réhabilitation fixé à 80 mg/kg pour l'éthylbenzène	Non Fonctionnelle
Seuil de réhabilitation fixé à 1000 mg/kg pour le styrène	Non Fonctionnelle
Seuil de réhabilitation fixé à 4000 mg/kg pour les HCT	Non Fonctionnelle
Réaliser les traitements sur la dalle de l'ancien bâtiment central	Non Fonctionnelle
Interdire l'accès aux zones pollués aux personnes non habilitées	Fonctionnelle
Interdiction visible	Non Fonctionnelle
Accès et issues fermées à clef en dehors des heures d'activité	Non Fonctionnelle
Limiter les nuisances	Non Fonctionnelle
Limiter les impacts sur l'environnement, les usagers du site et le voisinage	Non Fonctionnelle
Rejet unique des effluents dans la rivière voisine	Non Fonctionnelle
Limite d'HCT dans les eaux rejetées de 10 mg/l et 1 kg/j	Non Fonctionnelle
Limite d'éthylbenzène dans les eaux rejetées de 0.15 mg/l	Non Fonctionnelle
Limite de styrène dans les eaux rejetées de 0.15 mg/l	Non Fonctionnelle
pH des eaux de rejet entre 5.5 et 8.5	Non Fonctionnelle
Température des eaux de rejet inférieure à 30 °C	Non Fonctionnelle
Limite des MES dans les eaux de rejet de 30mg/l et 10 kg/j	Non Fonctionnelle
Limite de débit de rejet de 360 m3/j	Non Fonctionnelle

#### 7.6.4. Architecture Fonctionnelle du système de dépollution du site Alpha

- **Décomposition hiérarchique des fonctions**

La fonction « Réhabiliter le site Alpha » a été identifiée comme de niveau un et possédant huit fonctions héritières elles-mêmes raffinées d'un niveau.



Figure 54 - Décomposition hiérarchique fonctionnelle de niveau un

La fonction « Effectuer le traitement des polluants » est décomposée comme suit :

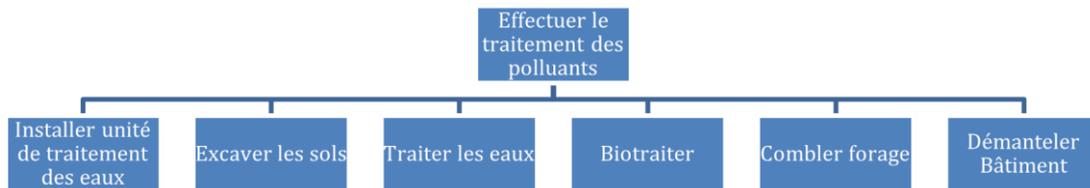


Figure 55 - Décomposition hiérarchique de la fonction « Effectuer le traitement des polluants »

La fonction « Communiquer » est décomposée en quatre sous-fonction. Cette fonction de niveau deux, rassemble les communications entrantes ou sortantes avec les systèmes à l'interface et l'environnement. La fonction de niveau trois, « Rédiger Rapport », permet la formalisation des informations échangées entre systèmes.

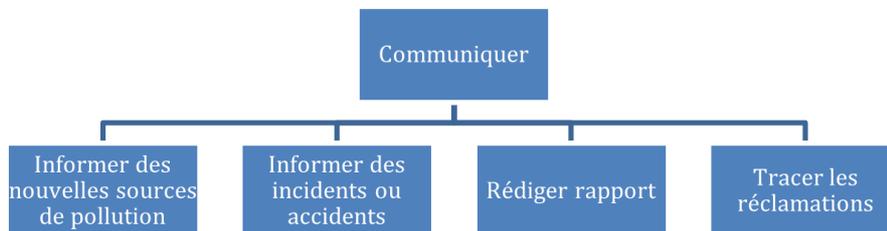


Figure 56 - Décomposition hiérarchique de la fonction « Communiquer »

- **Simulation architecture fonctionnelle**

Dans le cadre de la partie fonctionnelle, nous avons également modélisé un exemple de quelques process de la dépollution du site Alpha à l'aide d'un BPMN, en utilisant un outil qui nous permet ensuite de réaliser des simulations. Ce modèle BPMN permet aux gestionnaires fonctionnels de définir leurs objectifs, de manière simple, mais avec un haut degré de précision. Il optimise la communication avec les décideurs sur la nature et la performance d'un processus. Il permet l'identification des améliorations et leur mise en œuvre, le tout de manière collaborative.

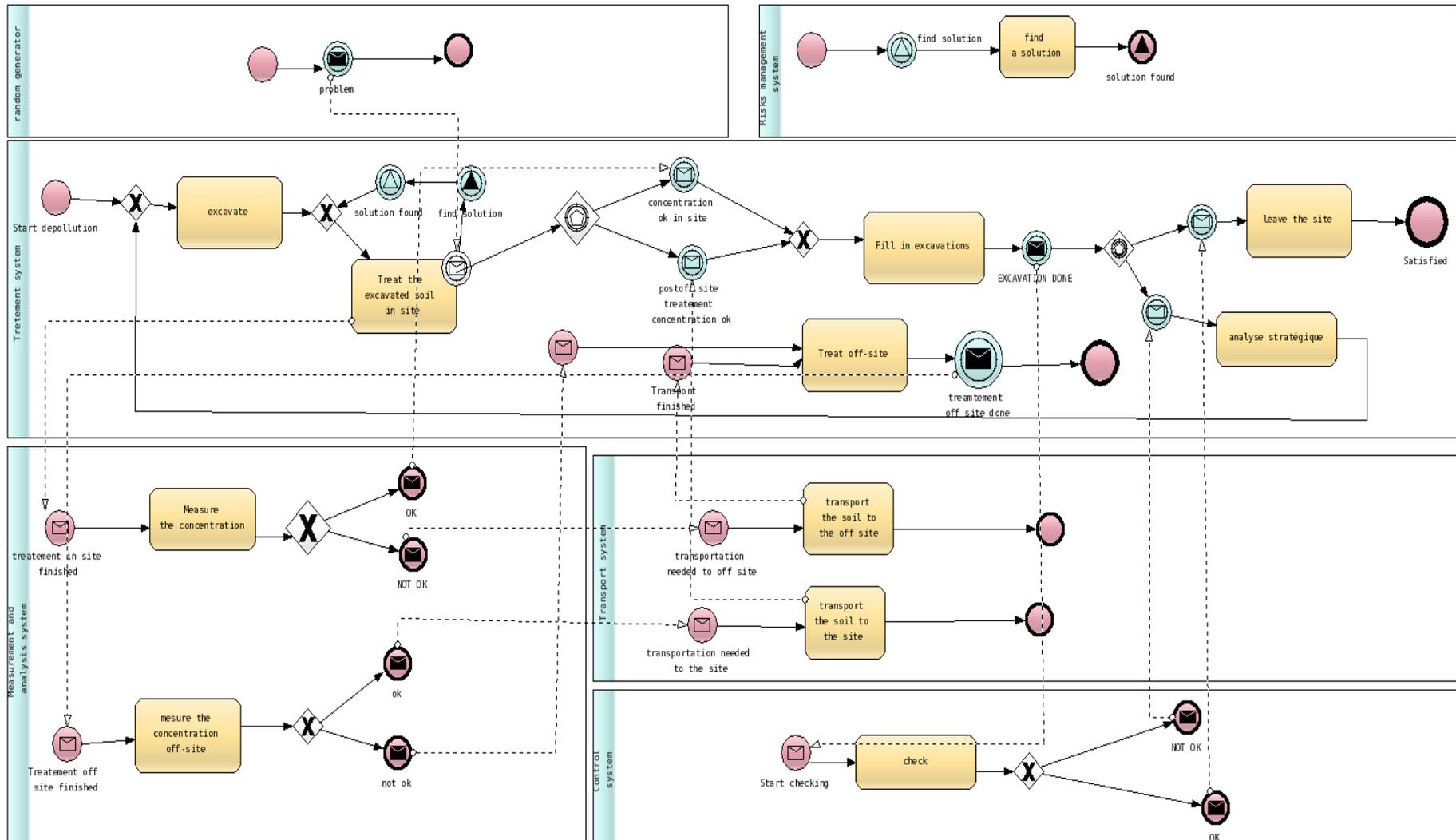


Figure 57: BPMN décrivant un processus de dépollution du projet de dépollution site Alpha



Grâce à cette modélisation BPMN, une simulation de scénarios est possible. Ces scénarios peuvent aider à toutes les phases du cycle de vie de la dépollution. L'approche basée sur les scénarios est en parfaite adéquation avec l'objectif de concevoir des futurs possibles et d'explorer les voies menant à chaque partie prenante afin de clarifier les exigences proposées. Sous la forme de scénarios, il est possible de décrire l'évolution du système de dépollution, et d'identifier, à partir d'une situation présente ainsi que des tendances dominantes, une série d'événements menant de manière logique (nécessaire) à un futur possible. Par exemple, nous pouvons simuler l'impact d'événements imprévus sur le système de dépollution. Trois types de scénarios sont ainsi retenus, qui fourniront des résultats sur le coût et le délai de l'activité de traitement. Les scénarios varient en fonction du nombre et de la fréquence des incidents lors de l'opération de traitement. Ainsi, pour chaque scénario, X incidents sont intégrés, et séparés par Y jours chacun.

- **Le scénario « Standard »** représente le fonctionnement nominal d'une opération de traitement. Dans ce scénario, le nombre d'incidents est fixé à 5 ( $X=5$ ), ils sont espacés de 10 jours ( $Y=10$ ).

- **Le scénario « Dégradé »** simule une opération dans une situation de dégradation modérée de l'opération. X prend la valeur de 20, et Y prend la valeur de 10.

- **Le scénario « Très dégradé »** simule une opération en situation de dégradation sévère. X prend la valeur de 40, et Y prend la valeur de 15.

Ces scénarios ont permis la description et la formalisation du comportement du système de dépollution lors du passage à travers certaines situations. Grâce à la simulation de ces trois scénarios, l'outil permet de mettre en évidence d'éventuels coûts supplémentaires ou retards. Des tests sur un cas d'application nous ont permis de mesurer un coût supplémentaire de 5,6% pour un scénario dégradé, et de 15,2% pour un scénario très dégradé, ainsi qu'une augmentation des retards de 12,5% et 30,9% respectivement.

En appliquant ces techniques, ici de simulation, aux modèles du système de dépollution, il a été possible de valider le futur système de dépollution en travaillant uniquement sur des modèles qui sont peu coûteux, plus faciles à manipuler. Ainsi, nous percevons ici qu'une méthode basée sur des modèles prend toute son importance et est vraiment innovante dans ce domaine de la dépollution.

### 7.6.5. Conclusion

Pour conclure, le Tableau 20 présente une synthèse de l'évaluation de la méthode DEPOSE en la confrontant au cas d'application, mettant en avant ses contributions et limites face aux problèmes identifiés.

*Tableau 20 : Evaluation de la méthode DEPOSE ( Cas d'application )*

<b>Problème identifié lors d'analyse de l'existant</b>	<b>Contributions de la méthode DEPOSE</b>	<b>Limites de la méthode DEPOSE</b>
Problème de validation préliminaire	La méthode DEPOSE offre une validation préliminaire structurée, détectant tôt les erreurs et permettant des simulations grâce à la modélisation du système.	Les modèles, basés sur des hypothèses, peuvent manquer de précision. Des interactions complexes peuvent être difficiles à modéliser, nécessitant des tests empiriques complémentaires sur le terrain.
Problème de flexibilité	La méthode DEPOSE favorise une conception modulaire, où chaque sous-système de dépollution est interconnecté et peut être modifié indépendamment, offrant ainsi une flexibilité accrue. De plus, l'approche MBSE facilite l'analyse des impacts des modifications grâce à des modèles détaillés du système.	Malgré cette flexibilité, certaines composantes du système peuvent être difficiles à modifier en raison de contraintes diverses. La mise en œuvre de changements peut être coûteuse en temps et en efforts, surtout si elle affecte de nombreux sous-systèmes.
Mauvaise traçabilité d'exigence	La méthode DEPOSE renforce la traçabilité. Grâce au MBSE, les exigences sont correctement formalisées, offrant une visualisation claire des liens entre elles et les éléments du système. L'utilisation de modèles textuelle facilite aussi la gestion des changements, en identifiant rapidement les éléments affectés par une modification d'exigence	Instaurer et maintenir un système de traçabilité exige du temps et des ressources. La traçabilité dépend de la qualité des modèles et des exigences initiales. Des exigences mal définies ou des modèles imparfaits compromettent cette traçabilité.

<p>Problème de performance</p>	<p>La méthode DEPOSE minimise les problèmes de performance en offrant une analyse systémique rigoureuse, une définition précise des exigences et une modélisation approfondie des interactions. Des simulations virtuelles peuvent permettre de tester le système dans différentes conditions avant sa mise en œuvre, détectant ainsi les éventuels problèmes de performance en amont</p>	<p>La méthode ne peut garantir une performance parfaite à chaque occasion.</p>
<p>Réactivité aux imprévus</p>	<p>La méthode DEPOSE améliore la réactivité face aux imprévus en permettant la modélisation de divers scénarios, y compris les plus inattendus. Les modèles facilitent une évaluation rapide des conséquences de ces événements et une adaptation proactive du système. Grâce au MBSE, une vue globale du système est accessible, aidant à identifier promptement les secteurs touchés par un changement et à envisager les réponses adéquates.</p>	<p>Tous les événements ne peuvent être anticipés, malgré une préparation approfondie</p>
<p>Adaptation aux évolutions des besoins</p>	<p>La méthode dépose offre une vision claire de l'architecture du système et des interactions entre ses éléments, facilitant l'adaptation aux besoins changeants. De plus, les modèles aident à simuler l'impact de modifications potentielles avant leur réalisation, minimisant les risques lors de l'évolution du système de dépollution.</p>	<p>Même un système initialement pensé comme évolutif peut se révéler coûteux ou complexe à adapter.</p>



## **8. CONCLUSION ET PERSPECTIVE**

## 8.1. SYNTHÈSE ET CONSTATS

La méthode DEPOSE proposée à l'issue de ces travaux contribue à lever différents défis en travaillant à deux niveaux.

Au niveau d'un projet particulier de dépollution i.e. d'un Système de Dépollution (Depollution System ou DS), la méthode DEPOSE lève les verrous retenus et adressés décrits dans le chapitre 1 et ce indépendamment du type, de la nature et de la complexité induite par la dépollution souhaitée. Elle reste bien évidemment à valider sur des projets nouveaux.

Au niveau de l'environnement industriel de ces projets de dépollution i.e. du Réseau de Dépollution (Depollution Network ou DN), la méthode DEPOSE fournit certaines bases pour arriver à structurer puis à faire travailler ensemble plusieurs partenaires souhaitant collaborer en restant dans leurs domaines de compétences avec des processus collaboratifs, des rôles et des responsabilités équitablement réparties. L'ensemble de ces propositions doit bien entendu être de même validé et amélioré pour prendre en compte différentes particularités de collaboration dans ce domaine de la dépollution, et sur de longues périodes.

Toutefois, outre les cas particuliers liés au projet illustratif synthétisés dans le Tableau 20, plusieurs limitations doivent être constatées lors de la mise en œuvre de la méthode DEPOSE :

**Adaptabilité organisationnelle :** Intégrer cette méthode requiert une transformation significative au sein des structures. Les processus existants, fermement ancrés, peuvent créer des résistances face aux modifications radicales suggérées par DEPOSE. Ces résistances et préoccupations nécessitent des solutions adaptées.

**Formation :** Pour mettre en œuvre DEPOSE, une compréhension fondamentale de l'ingénierie système et du MBSE est essentielle. Cela signifie qu'il est impératif de former l'ensemble des participants, une démarche qui peut être chronophage et représente un certain coût.

**Perspective globale :** DEPOSE, ayant été élaborée en fonction des spécificités et de la culture du secteur de dépollution en France, nécessiterait des ajustements si elle devait être mise en place à l'international, notamment pour s'adapter aux différentes réglementations propres à chaque pays.

**Compatibilité des outils :** La majorité des données proviennent de diverses applications numériques. Leur extraction nécessite donc une méthodologie stricte adaptée à chaque outil. Avec une variété croissante d'outils

numériques employés dans les projets de dépollution, cette procédure devient de plus en plus laborieuse en termes de charge de travail.

## 8.2. PERSPECTIVES

Du fait de ces limitations, il est possible aujourd'hui de mettre en évidence les perspectives suivantes :

**Validation sur des cas concrets et réalistes** dans le temps de chantier et de réseaux de partenaires :

- Étudier et analyser des scénarios réels du monde industriel afin d'ajuster et d'affiner la méthode ;

- Mettre en œuvre la méthode dans des industries spécialisées pour obtenir des retours d'expérience et identifier les éventuels écarts entre la théorie et la pratique ;

- Évaluer la pertinence de la méthode dans divers contextes de chantier pour assurer sa polyvalence.

**Formaliser plus avant la démarche opératoire du DN** et la confronter à la réalité terrain :

- Approfondir la documentation et les protocoles associés à la démarche du DN pour en assurer la clarté et la rigueur ;

- Effectuer des ateliers et des rencontres sur site pour tester la démarche dans des conditions réelles ;

- S'intéresser particulièrement à la mise en place organisationnelle, clarifiant les processus, définissant clairement les rôles et responsabilités ;

- Examiner la viabilité de la gouvernance basée sur l'holocratie et voir comment elle s'intègre dans différents contextes organisationnels.

**Enrichir le contenu des RECP servant de référentiels de DIC :**

- Mener des études de cas pour identifier les zones de connaissances manquantes dans les RECP actuels ;

- Collaborer avec des experts du domaine pour intégrer les dernières avancées et tendances dans le référentiel ;

- Assurer une mise à jour régulière des RECP pour garantir leur pertinence et leur actualité.

**Outil à développer et à conforter pour une mise en œuvre industrielle :**

- Investir dans des outils de modélisation avancés pour améliorer la précision et l'efficacité de la méthode ;
- Mettre en œuvre des solutions pour la vérification, la validation, la simulation, et l'optimisation, garantissant que la méthode soit robuste et fiable ;
- Centraliser la gestion des RECP pour assurer la cohérence entre eux ;
- Établir des protocoles stricts pour la gestion de la propriété intellectuelle, garantissant que les informations et les connaissances soient protégées ;
- Prioriser la traçabilité et la sécurité des DIC pour garantir l'intégrité, la confidentialité et la disponibilité des informations.

**Développement des capacités de simulation :**

- Même si la méthode DEPOSE n'a pas été conçue initialement pour simuler en détail, renforcer les capacités de simulation pour offrir une représentation plus précise des interactions et des résultats ;
- Intégrer de façon générale divers types de systèmes. Même si la méthode est principalement axée sur les systèmes de dépollution, envisager de l'élargir pour intégrer d'autres types de systèmes, comme ceux liés à l'énergie ou à l'eau. Cela nécessiterait un enrichissement du modèle pour s'adapter aux besoins spécifiques de ces domaines.

## **9. BIBLIOGRAPHIE**

- Accetturo, A, AR Lamorgese, S Mocetti, and D Pellegrino. 2018. "Housing Supply Elasticity and Growth: Evidence from Italian Cities." *Journal of Economic Geography* 21 (3): 367–96. <https://academic.oup.com/joeg/article-abstract/21/3/367/6043724>.
- ADEME. 2014. "Taux d'utilisation et Coûts Des Différentes Techniques et Filières de Traitement Des Sols et Des Eaux Souterraines Pollués En France." [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr).
- . 2023. "Les Friches : Du Foncier à Haut Potentiel." 2023. <https://infos.ademe.fr/magazine-mai-2022/dossier/les-friches-du-foncier-a-haut-potentiel/>.
- ADEME, UPDS. 2016. "Elaboration Des Bilans Coûts-Avantages Adaptés Aux Contextes de Gestion Des Sites et Sols Pollués - Guide Méthodologique," 251. [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque) , <http://www.upds.org/>.
- . 2020. "Reconversion Des Friches Industrielles //."
- Adjir, Oi, Victor Kouamé, Charles Kouadio Niangoran, Gbombélé Soro, and Jean Biémi. 2018. "Toxic Waste Spills in Côte d'Ivoire: Follow-up of the Effectiveness of the Cleanup Operation According to Residual Pollution Indicators." *Environnement, Risques et Sante* 17 (2): 147–54.
- Afnor. 2021. "Norme NF X31-620-1." 2021. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-x316201/qualite-du-sol-prestations-de-services-relatives-aux-sites-et-sols-pollues-/fa190943/81864>.
- Alaoui, Mouna El, Chapurlat V, Rabah S, Richet V, and Plana R. 2023. "An Approach for Ontology-Based Research and Recommendation on Systems Engineering Projects." *27th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2023)*.
- Appel, Wolfgang Ph ;, Rainer Behr, and Arbeitspapiere Wi. 1996. "Towards the Theory of Virtual Organisations: A Description of Their Formation and Figure."
- Article L511-1. 2021. "Article L511-1 - Code de l'environnement - Légifrance." [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000043978078](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043978078).
- ASN. 2011. "Gestion Des Sites Pollués Par Des Substances Radioactives." <https://doi.org/10.1051/jtsfen/2014reh02>.
- Bacot, Hunter, and Cindy O'Dell. 2006. "Establishing Indicators to Evaluate Brownfield Redevelopment." *Economic Development Quarterly* 20 (2): 142–61. <https://doi.org/10.1177/0891242405285749>.

- Battisti, C, G Poeta, and F Romiti. 2020. "Small Environmental Actions Need of Problem-Solving Approach: Applying Project Management Tools to Beach Litter Clean-Ups." *Environments* 7 (10): 87. <https://doi.org/10.3390/environments7100087>.
- Bedard, JC, R Hoitash, U., Hoitash, and K Westermann. 2012. "Material Weakness Remediation and Earnings Quality: A Detailed Examination by Type of Control Deficiency." *Auditing: A Journal of Practice & Theory* 31 (1): 57–78. <https://publications.aaahq.org/ajpt/article-abstract/31/1/57/5819>.
- Bertoni, Marco, Christian Johansson, and Tobias Larsson. 2011. "Innovation in Product Design." *Innovation in Product Design*, no. May 2016: 0–20. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-775-4>.
- Boardman, John, and Brian Sauser. 2006. "System of Systems - The Meaning of Of." *Proceedings 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering* 2006 (May): 118–23.
- Bourdon, Jérémy, Vincent Chapurlat, and Pierre Couterier. 2022. "Contribution Méthodologique Au Déploiement de l'évaluation d'architecture Pour Les Installations Nucléaires de Base : La Méthode EVA-CIME."
- BRGM. 1999. "Diagnostic Initial et Évaluation Simplifiée Des Risques Pour Les Activités de Traitements de Surface Guide Technique de Lecture Du Guide Méthodologique National Rapport d'étape."
- . 2023. "Landfarming | SelecDEPOL." 2023. <https://selecdepol.fr/fiche-technique/landfarming#paragraph-1144>.
- BRGM, and ADEME. 2023. "SelecDEPOL." 2023. <https://selecdepol.fr/>.
- Browne, Jim, and Jiangang Zhang. 1999. "Extended and Virtual Enterprises – Similarities and Differences." *International Journal of Agile Management Systems* 1 (1): 30–36. <https://doi.org/10.1108/14654659910266691>.
- Byrne, J. A. 1993. "The Futurists Who Fathered the Ideas." *Business Week*, 103.
- Campean, F, and Yildirim. 2017. "Enhanced Sequence Diagram for Function Modelling of Complex Systems." *Procedia Cirp* 60: 273-278. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117300549>.
- Cappuyns, Valérie. 2013. "Environmental Impacts of Soil Remediation Activities: Quantitative and Qualitative Tools Applied on Three Case Studies." *Journal of Cleaner Production* 52, 145–54. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613001571>.

- Chapurlat, Vincent, and Nicolas Daclin. 2017. "Designing Natively Interoperable Complex Systems: An Interface Design Pattern Proposal." *Enterprise Interoperability: INTEROP-PGSO Vision*, January, 43–66. <https://doi.org/10.1002/9781119407928.CH3>.
- CIRC. 2022. "INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER." 2022. <https://www.iarc.who.int/fr/>.
- Clark, DL, GR Choppin, CS Dayton, D. R. Janecky, L. J. Lane, and I Paton. 2007. "Rocky Flats Closure: The Role of Models in Facilitating Scientific Communication with Stakeholder Groups." *Journal of Alloys and Compounds* 444: 11–18.
- Collin, RW. 2006. "The Environmental Protection Agency: Cleaning Up America's Act."
- Combemale, Benoit, Julien Deantoni, Benoit Baudry, Robert B France, Jean-Marc Jézéquel, and Jeff Gray. 2014. "Globalizing Modeling Languages." *Inria.Hal.Science*. <https://inria.hal.science/hal-00994551/document>.
- "Comparaison Des Techniques Par COÛTS." 2009. [www.selecdepol.fr/Donnéescomparatives](http://www.selecdepol.fr/Donnéescomparatives).
- Corradini, Flavio, Alessio Ferrari, Fabrizio Fornari, Stefania Gnesi, Andrea Polini, Barbara Re, and Giorgio O. Spagnolo. 2018. "A Guidelines Framework for Understandable BPMN Models." *Data and Knowledge Engineering* 113: 129–54. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2017.11.003>.
- Critto, A., Lisa Cantarella, C. Carlon, S. Giove, G. Petruzzelli, and A. Marcomini. 2006. "Decision Support–Oriented Selection of Remediation Technologies to Rehabilitate Contaminated Sites." *Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal* 2 (3): 273–85. [https://doi.org/10.1897/1551-3793\(2006\)2](https://doi.org/10.1897/1551-3793(2006)2).
- Defélix, Christian, and Thierry Picq. 2013. "De l'entreprise Étendue à La « Gestion Des Compétences Étendue »: Enjeux et Pratiques En Pôles de Compétitivité." *@Grh* n° 7 (2): 41–66. <https://doi.org/10.3917/grh.132.0041>.
- Defregger, Franz. 1995. "Remediation of the Marktredwitz Chemical Factory — First Experiences of a Large-Scale Washing and Distillation Plant for Mercury Contaminated Sites in Bavaria." *Contaminated Soil '95*, 903–10. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-0421-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0421-0_15).

- DeLaurentis, Daniel A. 2005. "Understanding Transportation as System-of-Systems Design Problem." *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit - Meeting Papers*, 123.
- Dijkstra, Joris J., Johannes C.L. Meeussen, and Rob N.J. Comans. 2004. "Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soils: An Experimental and Modeling Study." *Environmental Science and Technology* 38 (16): 4390–95. [https://doi.org/10.1021/ES049885V/SUPPL\\_FILE/ES049885VSI20040426\\_100135.PDF](https://doi.org/10.1021/ES049885V/SUPPL_FILE/ES049885VSI20040426_100135.PDF).
- Dubaniowski, Mateusz Iwo, and Hans Rudolf Heinemann. 2021. "Time Granularity Impact on Propagation of Disruptions in a System-of-Systems Simulation of Infrastructure and Business Networks." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (8).
- Dumesnil, France, and Ouellet Claudie. 2002. "La Réhabilitation Des Friches Industrielles: Un Pas Vers La Ville Viable?" *La Revue Électronique En Sciences de l'environnement*. <https://journals.openedition.org/vertigo/3812>.
- Dutta, S. 2010. "Analytical Perspective on Waste Management for Environmental Remediation." *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 29 (7): 636–44. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993610001378>.
- Dzombak, David A, Chris Hendrickson, By M Cynthia Ruff, and Chris T Hendrickson. 1996. "Owner-Contractor Relationships on Contaminated Site Remediation Projects." *Ascelibrary.Org* 122 (4): 348–53. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1996\)122:4\(348\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:4(348)).
- Fosse, Elyse. 2016. "Model-Based Systems Engineering MBSE 101."
- Fosse, Elyse, and Christopher L Delp. 2013. "Systems Engineering Interfaces: A Model Based Approach." *IEEE Aerospace Conference*.
- Gatsios, E, J García-Rincón, J. L. Rayner, and R. G. McLaughlan. 2018. "LNAPL Transmissivity as a Remediation Metric in Complex Sites under Water Table Fluctuations." *Journal of Environmental Management* 215: 40–48. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718302494>.
- Géorisques. 2018. "Base Des Sols Pollués (BASOL) - Data.Gouv.Fr." <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-des-sols-pollues/>.
- Gheorghe, Adrian V., Dan V. Vamanu, Polinpapilinho F. Katina, and Roland Pulfer. 2018. *System of Systems Governance. Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality*. Vol. 34. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-69224-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-69224-1_4).

- GIFAS. 2017. “CRISEE : Cadre de Référence de l’Ingénierie Système Pour l’Entreprise.” 2017. <https://www.afis.fr/quels-sont-les-leviers-pour-ameliorer-les-competences-des-architectes/>.
- Gilmore, E. 2001. “A Critique of Soil Contamination and Remediation: The Dimensions of the Problem and the Implications for Sustainable Development.” *Bulletin of Science, Technology and Society* 21 (5): 394–400. <https://doi.org/10.1177/027046760102100508>.
- Gisèle, Jourda. 2020. “Pollutions Industrielles et Minières Des Sols : Assumer Ses Responsabilités, Réparer Les Erreurs Du Passé et Penser Durablement l’avenir.” [www.senat.fr](http://www.senat.fr).
- Gomez Sotelo, Karla I, Xin Yi, Claude Baron, Philippe Esteban, Citlalih Y A Gutiérrez Estrada, and Luis J de Laredo Velázquez. 2018. “Avez-Vous Identifié Toutes Les Parties Prenantes?” *12th International Conference on Modelling, Optimization and Simulation (MOSIM 2018)*.
- Gray-Cosgrove, Carmella, Liboiron Max, and Josh Lepawsky. 2015. “The Challenges of Temporality to Depollution & Remediation.” *SAPI EN. S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*.
- Guelton, Sonia. 2002. “Avantages Économiques d’une Politique de Dépollution Des Anciens Sites Industriels Urbains.” *Politiques et Management Public*. [https://www.persee.fr/doc/pomap\\_0758-1726\\_2002\\_num\\_20\\_4\\_2770](https://www.persee.fr/doc/pomap_0758-1726_2002_num_20_4_2770).
- Haemers, J, and MO Simonnot. 2018. “Traitement Des Sols Par Désorption Thermique Conventionnelle.”
- Harclerode, M. A., T. W. Macbeth, M. E. Miller, C. J. Gurr, and T. S Myers. 2016. “Early Decision Framework for Integrating Sustainable Risk Management for Complex Remediation Sites: Drivers, Barriers, and Performance Metrics.” *Journal of Environmental Management* 184: 57–66.
- Hatch, MJ, and AL Cunliffe. 2009. “Théorie Des Organisations: De l’intérêt de Perspectives Multiples.”
- He, L., G. H. Huang, and H. W. Lu. 2010. “A Stochastic Optimization Model under Modeling Uncertainty and Parameter Certainty for Groundwater Remediation Design-Part I. Model Development.” *Journal of Hazardous Materials* 176 (1–3): 521–26. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.11.060>.
- Hou, Deyi, and David O’Connor. 2020. “Green and Sustainable Remediation: Past, Present, and Future Developments.” *Sustainable Remediation of*

- Contaminated Soil and Groundwater*, 19–42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00002-1>.
- Hula, Richard C, and Rebecca Bromley-Trujillo. 2010. “Cleaning up the Mess: Redevelopment of Urban Brownfields.” *Economic Development Quarterly*, 24 (3): 276–87. <https://doi.org/10.1177/0891242410365711>.
- IEEE SA. 2000. “IEEE 1471-2000;IEEE Recommended Practice for Architectural Description for Software-Intensive Systems.” <https://standards.ieee.org/ieee/1471/2187/>.
- Ignatiadis, Ioannis, French Geological Survey, Dominique Morin, and French Geological Survey. 2005. “Development and in Situ Implementation of a Chemical Process for Immobilisation of the Chromate Contained in an Industrial Ground.” *Proceedings of 9th International Conference on Contaminated Soil*, no. January: 2555–64.
- Indieke, Andrew J. 2022. “The Role of Timing and Management’s Remediation Actions in Preventing Failed Remediation of Material Weaknesses in Internal Controls.” *Contemporary Accounting Research* 39 (1): 157–98. <https://doi.org/10.1111/1911-3846.12725>.
- Introna, Lucas, and Dimitra Petrakaki. 2007. “Chapter 8 Defining the Virtual Organization.” *E-Commerce and V-Business*. Routledge, 181–99.
- ISO, 24641. 2020. “ISO/IEC CD 24641:2020.” (*E, Systems and Software Engineering, Methods and Tools for Model-Based Systems and Software Engineering*).
- ISO, 26000. 2010. “ISO 26000\_Lignes Directrices Relatives à La Responsabilité Sociétal.”
- ISO, 29110. 2016. “ISO/IEC TR 29110-1:2016 - Ingénierie Des Systèmes et Du Logiciel — Profils de Cycle de Vie Pour Très Petits Organismes (TPO) — Partie 1: Aperçu Général.” 2016. <https://www.iso.org/fr/standard/62711.html>.
- ISO/IEC/IEEE, 2015. 2015. “ISO 15288:2015 Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes.”
- Ivanova, Ksenia, and Sondoss Elsayah. 2022. “Towards Integrating Systems Thinking into Systems Engineering: Theory and Application in Development of Capability Concepts.” *International Journal of System of Systems Engineering* 12 (2): 175–200. <https://doi.org/10.1504/IJSSE.2022.124976>.
- Jacq, A. 2000. “Analyse Économique Des Réhabilitations de Sites Industriels Pollués.” <https://www.theses.fr/2000BOR40013>.

- Janin, Claude, and Andres Lauren. 2008. "Les Friches: Espaces En Marge Ou Marges de Manœuvre Pour l'aménagement Des Territoires?" *Annales de Géographie* 5. <https://www.cairn.info/revue-annales-de-geographie-2008-5-page-62.htm>.
- Jaradat, Raed M., Charles B. Keating, and Joseph M. Bradley. 2014. "A Histogram Analysis for System of Systems." *International Journal of System of Systems Engineering* 5 (3): 193–227. <https://doi.org/10.1504/IJSSE.2014.065750>.
- Johannessen, Vegard. 2012. "CESAR - Text vs. Boilerplates: What Is More Efficient - Requirements Written as Free Text or Using Boilerplates (Templates)?"
- Kalinovich, I, A Rutter, JS Poland, ... G Cairns - Science of the total, and undefined 2008. 2008. "Remediation of PCB Contaminated Soils in the Canadian Arctic: Excavation and Surface PRB Technology." *Elsevier* 407: 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.006>.
- Keating, Charles B., and Polinpapilinho F. Katina. 2019. "Complex System Governance: Concept, Utility, and Challenges." *Systems Research and Behavioral Science* 36 (5): 687–705. <https://doi.org/10.1002/sres.2621>.
- Kellerhals, C, and J Mathey. 1992. "Les Politiques Urbaines En Matière de Récupération Des Friches Industrielles."
- Khalid, S, M Shahid, NK Niazi, and B Murtaza. 2017. "A Comparison of Technologies for Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils." *Journal of Geochemical Exploration* 182: 247–68. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216303818?casa\\_token=ynUzPxaf-J8AAAAA:rJpllSjeBpQMKxpfv25PtSkGynSrQvalW2JtTibMVPD9zl7uCdylUl-JMjdjLgRMqCcew1JHjg](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674216303818?casa_token=ynUzPxaf-J8AAAAA:rJpllSjeBpQMKxpfv25PtSkGynSrQvalW2JtTibMVPD9zl7uCdylUl-JMjdjLgRMqCcew1JHjg).
- Koesler, Simon. 2010. "Pollution Externalities in a Schumpeterian Growth Model." *ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper*, 10–055.
- Kozma, Dániel, and Pál Varga. 2021. "Applied Sciences System of Systems Lifecycle Management — A New Concept Based on Process Engineering Methodologies." *Applied Sciences* 11 (8): 3386.
- Krasulja, Nevena, Ivana Radojević, and Dragan Janjušić. 2016. "Holacracy-the New Management System." *The Priority Directions of National Economy Development*.
- Kumar, D Srinivas, and A Lakshumu Naidu. 2018. "The Business Philosophies for Extended Enterprise in Manufacturing Automobile Sectors." [www.tjprc.org](http://www.tjprc.org).

- Laribi, M, and A Zellagui. 2010. "Etude Des Techniques de Dépollution Des Sols Contaminés."
- Légifrance. 2000. "Directive 2000/60/CE Du Parlement Européen et Du Conseil Du 23 Octobre 2000 Établissant Un Cadre Pour Une Politique Communautaire Dans Le Domaine de l'eau - Légifrance." <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000330631>.
- Lemazurier, Lori, Vincent Chapurlat, and Alain Grossetête. 2017. "An MBSE Approach to Pass from Requirements to Functional Architecture." *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017), 7260–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1376>.
- Leprond, Nom : H. 2016. "Définir Une Stratégie de Dépollution : Approche Basée Sur La Masse de Polluant et La Capacité de Relargage d'une Pollution Rapport Final."
- Liu, L. 2005. "Modeling for Surfactant-Enhanced Groundwater Remediation Processes at DNAPLs-Contaminated Sites." *Journal of Environmental Informatics* 5 (2): 42–52. <https://doi.org/10.3808/JEI.200500045>.
- Liu, Lianwen, Wei Li, Weiping Song, and Mingxin Guo. 2018. "Remediation Techniques for Heavy Metal-Contaminated Soils: Principles and Applicability." *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>.
- Mabrouk, Mohamed, Severine Sperandio, and Philippe Girard. 2014. "Stakeholder Mapping in a Collaborative Project for a Sustainable Development." *IFIP Advances in Information and Communication Technology* 439 (PART 2): 518–25. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44736-9_63).
- Maier, Mark W. 1998. "Architecting Principles for Systems-of-systems." *The Journal of the International Council on Systems Engineering* 1 (4): 267–84.
- . 2009. "The Art of Systems Architecting." *The Art of Systems Architecting*, January. <https://doi.org/10.1201/9781420079142/ART-SYSTEMS-ARCHITECTING-MARK-MAIER>.
- Mallek, Sihem, Nicolas Daclin, and Vincent Chapurlat. 2012. "The Application of Interoperability Requirement Specification and Verification to Collaborative Processes in Industry." *Computers in Industry* 63 (7): 643–58.
- Marius, Sebastian. 2010. "Virtual Enterprise Network General Architecture," 313–16.

- Mayerhofer, Tanja, T U Wien, Philip Langer, Manuel Wimmer, and Gerti Kappel. 2013. "XMOF: Executable DSMLs Based on FUML." *Springer* 8225 LNCS: 56–75. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02654-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02654-1_4).
- Ministre de l'environnement, de l'énergie et de la Mer. 2017. "Introduction à La Méthodologie Nationale de Gestion Des Sites et Sols Pollués."
- Moigne, Jean-Louis Le. 1998. "Modéliser et Comprendre Les Comportements Socio-Économiques. Une Question Pragmatique." *Psychologie Économique, Théorie et Applications, Paris, Francia: Editions Economica*. <http://eaepe.tuwien.ac.at/downloads/moigne2.pdf>.
- Mondello, Gérard. 2009. "Logique Environnementale, Logique Économique: Etude Par Le Contentieux Des Installations Classées Pour La Protection de l'Environnement (ICPE)." <https://theses.hal.science/tel-00727231/>.
- NASA. 2007. "NASA System Engineering Handbook Revision 2." *National Aeronautics and Space Administration*, 297. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\\_systems\\_engineering\\_handbook\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf).
- Nastov, Blazo. 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."
- Normes. 2001. *Dictionnaire de l'environnement*. <https://www.eyrolles.com/Loisirs/Livre/dictionnaire-de-l-environnement-9782124730223/>.
- Nwozor, A, J Audu, IJ Adama - International Journal of Energy, and undefined. 2018. 2019. "The Political Economy of Hydrocarbon Pollution: Assessing Socio-Ecological Sustainability of Nigeria's Niger Delta Region." *Eprints.Lmu.Edu.Ng* 9. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.7058>.
- Oen, Amy Marie Patrin, Magnus Sparrevik, David N. Barton, Udaya Sekhar Nagothu, Gerald Jan Ellen, Gijs D. Breedveld, Jens Skei, and Adriaan Slob. 2010. "Sediment and Society: An Approach for Assessing Management of Contaminated Sediments and Stakeholder Involvement in Norway." *Journal of Soils and Sediments* 10 (2): 202–8. <https://doi.org/10.1007/S11368-009-0182-X>.
- OMS. 2021. "Site Officiel de l'Organisation Mondiale de La Santé." 2021. <https://www.who.int/fr>.
- Origo, Nadia. 2008. "Approche Socio-Spatiale de La Réhabilitation Des Sites Industriels Pollués." <https://www.theses.fr/2008PA040181>.

- Panetto, Herve., and Nacer. Boudjlida. 2006. "Interoperability for Enterprise Software and Applications : Proceedings of the Workshops and the Doctorial Symposium of the Second IFAC/IFIP I-ESA International Conference: EI2N, WSI, IS-TSPQ 2006."
- Pecina, Václav, David Juricka, and Michaela Galiova. 2021. "Polluted Brownfield Site Converted into a Public Urban Park: A Place Providing Ecosystem Services or a Hidden Health Threat?" *Journal of Environmental Management* 291: 112669.
- Penalva, J M. 1990. "Sagace: A Representation of Knowledge for Supervision of Continuous Process." [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:22042038](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:22042038).
- Pourabadehei, Mehdi, and Catherine N. Mulligan. 2016. "Selection of an Appropriate Management Strategy for Contaminated Sediment: A Case Study at a Shallow Contaminated Harbour in Quebec, Canada." *Environmental Pollution* 219 (December): 846–57. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.08.012>.
- Price, John, Carl Spreng, Elisabeth L. Hawley, and Rula Deeb. 2017. "Remediation Management of Complex Sites Using an Adaptive Site Management Approach." *Journal of Environmental Management* 204 (December): 738–47. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.04.009>.
- Priya, A. K., M. Muruganandam, S. S. Ali, and M Kornaros. 2023. "Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach." *Toxics* 11 (5): 422. <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/5/422>.
- Probst, Gilbert, and Andrea M. Bassi. 2017. "Tackling Complexity: A Systemic Approach for Decision Makers." *Routledge*, September, 1–186.
- Qiu, Xiuqi, Zhanqiang Fang, Xiaomin Yan, Fenglong Gu, and Feng Jiang. 2012. "Emergency Remediation of Simulated Chromium (VI)-Polluted River by Nanoscale Zero-Valent Iron: Laboratory Study and Numerical Simulation." *Chemical Engineering Journal* 193–194 (June): 358–65. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2012.04.067>.
- Ren, Wanxia, Yong Geng, Zhixiao Ma, Lina Sun, Bing Xue, and Tsuyoshi Fujita. 2015. "Reconsidering Brownfield Redevelopment Strategy in China's Old Industrial Zone: A Health Risk Assessment of Heavy Metal Contamination." *Environmental Science and Pollution Research* 22 (4): 2765–75. <https://doi.org/10.1007/S11356-014-3548-6>.

- Rust, Steven, and Megan Star. 2018. "The Cost Effectiveness of Remediating Erosion Gullies: A Case Study in the Fitzroy." *Australasian Journal of Environmental Management* 25 (2): 233–47. <https://doi.org/10.1080/14486563.2017.1393465>.
- Sadigh, Bahram Lotfi, Hakki Ozgur Unver, Shahrzad Nikghadam, Erdogan Dogdu, A. Murat Ozbayoglu, and S. Engin Kilic. 2016. "An Ontology-Based Multi-Agent Virtual Enterprise System (OMAVE): Part 1: Domain Modelling and Rule Management." *Https://Doi.Org/10.1080/0951192X.2016.1145811* 30 (2–3): 320–43. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1145811>.
- Samah, Salman F, Rodhain Florence, and Fallery Bernard. 2016. "Gouvernance de Données Dans Le Démantèlement Nucléaire: Confidentialité, Partage et Valorisation Des Données et Informations Stratégiques Entre Acteurs." *Journées Du Risque: Nucléaire, Hommes et Sociétés*. <https://hal.science/hal-01970741/>.
- Sauquet, Alexandre. 2014. "Three Contributions to the Top-down and Bottom-up Approaches to Global Environmental Problems." *Http://Www.Theses.Fr*. <http://www.theses.fr/2014CLF10429>.
- Schindel, W. 2005. "Pattern-Based Systems Engineering: An Extension of Model-Based Se." *INCOSE IS2005 Tutorial TIES 4*.
- Sébillotte, Michel. 1977. "Jachère, Système de Culture, Système de Production, Méthodologie d'étude." *Journal d'agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée* 24 (2): 241–64. <https://doi.org/10.3406/JATBA.1977.3287>.
- Selvakumar, Rajendran, Govindarajan Ramadoss, P. Menon Mridula, Karuppali Rajendran, Palanisami Thavamani, Ravi Naidu, and Mallavarapu Megharaj. 2018. "Challenges and Complexities in Remediation of Uranium Contaminated Soils: A Review." *Journal of Environmental Radioactivity*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.018>.
- Shachmurove, E, and Y Shachmurove. 2009. "US Venture Capital Meets Clean-Technology." [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1515751](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1515751).
- Shah, Vijendra, and Achlesh Daverey. 2020. "Phytoremediation: A Multidisciplinary Approach to Clean up Heavy Metal Contaminated Soil." *Environmental Technology & Innovation* 18: 100774.
- Silva, Alberto Rodrigues Da. 2021. "Linguistic Patterns, Styles, and Guidelines for Writing Requirements Specifications: Focus on Use Cases and Scenarios."

- IEEE Access* 9 (2021) 9: 143506–30.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9570334/>.
- Singh, Thangjam Somch, and Dibakar Chakrabarty. 2011. “Chance-Constrained Multi-Objective Programming for Optimal Multi-Layer Aquifer Remediation Design.” *Engineering Optimization* 43 (4): 417–32.  
<https://doi.org/10.1080/0305215X.2010.491548>.
- Soloway, DA, M Nahir, ME Billowits, and L. G Whyte. 2001. “In-Situ Bioremediation of Diesel-Contaminated Soil in Canada’s Arctic Territory: A Case Study at the Whitehorse International Airport, Yukon Territory.” *Polar Record* 37 (202): 267–72.
- Spichkova, Maria, Tawfeeq Alsanoosy, and James Harland. 2021. “Impact of Organisational Culture on the Requirement Engineering Activities.” *IEEE 29th International Requirements Engineering Conference (RE)*, 426–27.
- SSP-InfoTerre. 2017. “Méthodologie Nationale de Gestion Des Sites et Sols Pollués.” <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/methodologie/methodologie-nationale-gestion-ssp>.
- Steffi, P. F., B. Thirumalaiyammal, Rajeswari Anburaj, and P. F. Mishel. 2022. “Artificial Intelligence in Bioremediation Modelling and Clean-Up of Contaminated Sites: Recent Advances, Challenges and Opportunities.” *Omic Insights in Environmental Bioremediation*, 683–702. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-4320-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-981-19-4320-1_29).
- Torlapati, Jagadish, T. Prabhakar Clement, Charles E. Schaefer, and Kang Kun Lee. 2012. “Modeling Dehalococoides Sp. Augmented Bioremediation in a Single Fracture System.” *Ground Water Monitoring and Remediation* 32 (3): 75–83.  
<https://doi.org/10.1111/J.1745-6592.2011.01392.X>.
- Udell, KS, DG Grubb, and undefined. 1995. “Technologies for in Situ Cleanup of Contaminated Sites.” *Central European Journal of Public Health* 3.2: 67–76.  
<https://europepmc.org/article/med/7655407>.
- Ulibarri, Nicola. 2015. “Tracing Process to Performance of Collaborative Governance: A Comparative Case Study of Federal Hydropower Licensing.” *Policy Studies Journal* 43 (2): 283–308. <https://doi.org/10.1111/psj.12096>.
- Ulibarri, Nicola, S Cameron, L Tracy, and Ryan J Mccarty. 2020. “Cleanup and Complexity: Nuclear and Industrial Contamination at The Santa Susana Field Laboratory, California.” *Environmental Management* 65: 257–71.  
<https://doi.org/10.1007/s00267-019-01239-7>.

- Vaneman, Warren K., and Roger D. Jaskot. 2013. "A Criteria-Based Framework for Establishing System of Systems Governance." *SysCon 2013 - 7th Annual IEEE International Systems Conference, Proceedings*, 491–96. <https://doi.org/10.1109/SysCon.2013.6549927>.
- Vernadat, F. B. 2001. "Enterprise Integration and Management in Agile Organizations." *Agile Manufacturing: The 21st Century Competitive Strategy: The 21st Century Competitive Strategy*, 461–82. <https://doi.org/10.1016/B978-008043567-1/50024-3>.
- Vierlboeck, Maximilian, and Roshanak R. Nilchiani. 2021. "Requirement Engineering in the Age of System and Product Complexity—A Literature Review." *2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 1–8.
- Volchko, Y, J Norrman, M Bergknut, L Rosén, and T. Söderqvist. 2013. "Incorporating the Soil Function Concept into Sustainability Appraisal of Remediation Alternatives." *Journal of Environmental Management* 129: 367–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.07.025>.
- Vreeken, C., J. Van Eyk, M. Loxham, and W. Visser. 1992. "Remedial Actions at Operating Petrochemical Sites." *Geotechnique* 42 (1): 23–31. <https://doi.org/10.1680/GEOT.1992.42.1.23>.
- Wagg, Cameron, S. Franz Bender, Franco Widmer, and Marcel G.A. Van Der Heijden. 2014. "Soil Biodiversity and Soil Community Composition Determine Ecosystem Multifunctionality." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (14): 5266–70. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1320054111>.
- Wasson, CS. 2005. *System Analysis, Design, and Development: Concepts, Principles, and Practices*. Edited by John Wiley & Sons. Vol. 22.
- Wolfe, Chuck, and Lindsay Delecki. 2004. "Brownfields Planning and Process: A Multidisciplinary Primer." *Planning & Environmental Law* 56 (11): 3–8. <https://doi.org/10.1080/15480755.2004.10394419>.
- Xu, H., L. Xing, and R. Robidoux. 2009. "Drbd: Dynamic Reliability Block Diagrams for System Reliability Modelling." *International Journal of Computers and Applications* 31 (2): 132–41. <https://doi.org/10.2316/Journal.202.2009.2.202-2552>.
- Zeng, Tao, Xiaole Zhang, Saihua Wang, Hongyun Niu, and Yaqi Cai. 2015. "Spatial Confinement of a Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Catalyst in Hollow Metal-Organic Frameworks as a Nanoreactor for Improved Degradation of Organic

- Pollutants.” *Environmental Science and Technology* 49 (4): 2350–57. <https://doi.org/10.1021/ES505014Z>.
- Zhang, H, Y Luo, T Makino, L Wu, M Nanzyo - Journal of hazardous, and undefined 2013. 2013. “The Heavy Metal Partition in Size-Fractions of the Fine Particles in Agricultural Soils Contaminated by Waste Water and Smelter Dust.” *Elsevier*, 303–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.019>.